

СПРАВОЧНИК

СПУТНИКОВАЯ ПЕРЕДАЧА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ



Издание 2010 года
Бюро радиосвязи



СПРАВОЧНИК

СПУТНИКОВАЯ ПЕРЕДАЧА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

Издание 2010 года

Бюро радиосвязи



СЕКТОР РАДИОСВЯЗИ МСЭ

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

Справки по вопросам радиосвязи

Обращайтесь по адресу

ITU
Radiocommunication Bureau
Place des Nations
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Телефон:	+41 22 730 5800
Факс:	+41 22 730 5785
Электронная почта:	brmail@itu.int
Веб-сайт:	www.itu.int/itu-r

Размещение заказов на публикации МСЭ

Обращаем внимание на то, что заказы не принимаются по телефону.

Их следует направлять по факсу или по электронной почте.

ITU
Sales and Marketing Division
Place des Nations
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Факс:	+41 22 730 5194
Электронная почта:	sales@itu.int

Электронный книжный магазин МСЭ: www.itu.int/publications

ВСТУПЛЕНИЕ

Технический прогресс в целом и развитие информационно-коммуникационных технологий и приложений в частности все больше нуждаются в точном измерении времени и синхронизации различных электронных устройств.

Международный союз электросвязи проводит исследования и устанавливает международные стандарты по соответствующим шкалам измерения времени и их использованию в сетях электросвязи и компьютерных сетях, в системах электронной навигации и т. д.

В 1974 году Международный консультативный комитет по радио (МККР) (CCIR – *Comité Consultatif International des Radiocommunications*) совместно с Генеральной конференцией по мерам и весам и Международным бюро времени разработали Всемирное координированное время (UTC).

В 1978 году МККР утвердил использование UTC "для обозначения времени во всей деятельности в области международной электросвязи и во всех официальных документах Международного союза электросвязи". МККР также заявил, что UTC следует применять "в качестве окончательного эталона для излучений стандартных частот".

Всемирная административная радиоконференция МСЭ 1979 года (ВАРК-79) включила UTC в Регламент радиосвязи, имеющий статус международного договора, и с тех пор UTC используется в качестве основной шкалы времени для сетей электросвязи (проводных и беспроводных) и для других приложений, связанных со временем.

Современные спутниковые системы, обеспечивающие передачу сигналов времени и частоты по открытым, без помех, трассам с несложным моделированием задержек, являются основным источником точного времени и точной частоты – параметров, крайне важных для морских и авиационных служб, систем навигации и определения местоположения, а также для надлежащего функционирования сетей электросвязи и компьютерных сетей.

В настоящем Справочнике МСЭ впервые представлена подробная информация о применяемых методах, технологиях, алгоритмах, структуре данных и практическом использовании сигналов частоты и времени, передаваемых спутниковыми системами.

Особое внимание уделяется глобальным навигационным спутниковым системам (ГНСС), принадлежащим радионавигационной спутниковой службе. Системы ГНСС передают сигналы времени–частоты в любую точку земной поверхности и в настоящее время фактически являются основными источниками сигналов точного времени для правительственных, коммерческих, транспортных и научных применений.

Д-р Валерий ТИМОФЕЕВ,
Директор
Бюро радиосвязи

СОДЕРЖАНИЕ*Стр.*

ВСТУПЛЕНИЕ	iii
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	vii
ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ	ix
ВВЕДЕНИЕ.....	xi
ГЛАВА 1 – СПУТНИКИ И ПЕРЕДАЧА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ	1
ГЛАВА 2 – СИСТЕМА ГЛОБАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ	7
ГЛАВА 3 – СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И КОРРЕКЦИИ GPS.....	23
ГЛАВА 4 – СИСТЕМНОЕ ВРЕМЯ GPS	49
ГЛАВА 5 – НАВИГАЦИОННАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА ГЛОНАСС	55
ГЛАВА 6 – СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ	73
ГЛАВА 7 – ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ.....	81
ГЛАВА 8 – НАЦИОНАЛЬНЫЕ ЦЕНТРЫ ОТСЧЕТА ВРЕМЕНИ.....	99
ГЛАВА 9 – РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ СПУТНИКОВОЙ ПЕРЕДАЧЕ И РАСПРОСТРАНЕНИИ СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ.....	105
ГЛАВА 10 – ОРИЕНТАЦИЯ ЗЕМЛИ И ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМА	133
ГЛАВА 11 – РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН И ФАКТОРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	143
ГЛАВА 12 – ГЛОБАЛЬНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ КАК ОСНОВНОЙ ИНСТРУМЕНТ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ.....	155
ГЛАВА 13 – ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ФАЗОВЫХ И КОДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ GPS	175
ГЛАВА 14 – ДВУСТОРОННЯЯ СПУТНИКОВАЯ ПЕРЕДАЧА СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ (TWSTFT)	207
ГЛАВА 15 – КРАТКИЙ ОБЗОР РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ	219

ПРЕДИСЛОВИЕ

7-я Исследовательская комиссия по радиосвязи (ИК7), изучающая вопросы научных служб, была создана путем структурной реорганизации в 1990 году на Пленарной ассамблее МККР в Дюссельдорфе. В то время Исследовательская комиссия по космическим исследованиям и радиоастрономии (ИК2) была объединена с ИК7 по стандартам времени и частоты в целях создания новой ИК7 по вопросам научных служб.

Деятельность Исследовательской комиссии по научным службам в значительной степени посвящена развитию современных технологий использования радиоспектра для решения научных задач. В этой связи сообщество по стандартам времени и частоты долгое время сотрудничало с Международным союзом электросвязи (МСЭ), при этом целью сотрудничества являлась разработка Рекомендаций по использованию радиоспектра для облегчения распространения эталонных сигналов точного времени, а также по стандартизации методов такого распространения. Существенным результатом работы явилось составление спецификации точных стандартов частоты и методов их реализации.

ИК7 (Научные службы) Сектора радиосвязи включает четыре Рабочие группы (РГ) радиосвязи, которые работают над техническими вопросами, касающимися конкретных дисциплин, под эгидой научных служб. Деятельность Рабочей группы 7А (Излучения сигналов времени и стандартных частот) связана с генерацией и распространением сигналов времени и эталонных частот наземными и космическими службами радиосвязи. За прошедшие 15–20 лет услуги точного времени и эталонных частот, которые предоставляются спутниковыми системами, преимущественно навигационными спутниками, стали основными средствами распространения, а функциональные возможности этих служб существенно возросли. Это привело к повышению потенциала и развитию таких спутниковых систем, в связи с чем стало нелегко идти в ногу с их развитием и их влиянием на сообщество, занимающееся временем и частотами, а также на сообщества, имеющие отношение к радиосвязи и электросвязи в целом.

В настоящем Справочнике представлена всесторонняя техническая информация и информация об эксплуатационных особенностях существующих спутниковых систем, используемых для распространения сигналов точного времени и эталонных частот.

Я как Председатель ИК7 с большим удовольствием представляю настоящий Справочник вышеупомянутым сообществам пользователей и я уверен, что он станет для них незаменимым справочным руководством в проводимой ими работе.

Настоящий Справочник является результатом нескольких лет подготовки и напряженной работы по сбору информации о развитии спутниковых технологий и постоянно расширяющихся функциональных возможностях, которые они обеспечивают. Выпуск этого Справочника был бы невозможен без вклада со стороны многих администраций, принимавших участие в работе ИК7 и входящей в ее состав РГ 7А. Особую благодарность следует выразить председателю РГ 7А г-ну Рональду БЕРДУ как руководителю данного проекта. Нашей особой благодарности также заслуживает г-н А. ВАСИЛЬЕВ из Бюро радиосвязи, который принимал активное участие в подготовке, редактировании и публикации Справочника.

ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Докладчики провели серьезнейшую работу над различными разделами Справочника, и мы хотели бы поблагодарить тех, кто принял в этом участие, а также многих других, кто вложил свое время и силы в данный Справочник.

Спутниковые системы:

АКСЕЛЬРАД П.
КЛЕПЧИНСКИЙ В.И.
БРУНЕТ М.
ИМАЭ М.
БАРТЕНЕВ В.
КЛИМОВ В.
КОСЕНКО В.
КРАСИЛЬЩИКОВ М.
РЕВНИВЫХ С.
РЕЙНХАРДТ В.
ВАСИЛЬЕВ А.

Шкалы времени, хронометрия и справочные системы:

КОРДАРА Ф.
МакКАРТИ Д.
НЕЛЬСОН Р.
АРИАС Е.
БАУХ А.

Методика:

ЛЕВАНДОВСКИЙ В. и АЗУБИБ Ж.
КЛЕПЧИНСКИЙ В.И.
КИРХНЕР Д.
Де ЙОНГ Г.
РЭЙ Дж.
СЕНЬОР К.

Распространение и факторы окружающей среды:

КЛОБУЧАР, Джон А.

Особую благодарность выражаем Председателю РГ 7А г-ну Рональду БЕРДУ за руководство данным проектом, за сделанный им вклад и редактирование настоящего Справочника, а также Советнику ИК7 по радиосвязи г-ну Александру ВАСИЛЬЕВУ из Бюро радиосвязи, предоставившему дополнительные тексты и осуществлявшему редактирование и подготовку Справочника к публикации.

Винсент МИНС,
Председатель 7-й Исследовательской
комиссии по радиосвязи

ВВЕДЕНИЕ

Углубимся немного в историю...

Давным-давно люди отмечали время по движению солнца и других звезд, по фазам Луны, по смене времен года и по смене поколений. Интервалы времени измерялись при помощи песочных и водяных часов, а также механических устройств. Частота звучания музыкальных инструментов настраивалась по вилочным камертонам и камертонам-дудкам.

Истории известны оригинальные способы измерения времени, временных интервалов и частот. Изобретенное египтянами около 1500 лет до н. э. устройство, похожее по форме на изогнутую рейшину, измеряло ход времени по тени, отбрасываемой поперечной перекладной по нелинейному закону. С утра буква Т была ориентирована в восточном направлении. В полдень устройство поворачивалось таким образом, что оно могло отбрасывать тень в направлении, соответствующем вечернему времени.

Еще в 1000 году до нашей эры китайцы создали стандарты частоты путем подсчета количества бобовых зерен, которые помещались в трубу духового инструмента. Для труб, имеющих одинаковый диаметр, частота (высота звука) определялась количеством зерен, необходимых для заполнения трубы.

Испанцы в XIII веке измеряли интервалы времени по горящим свечам, установленным на рычагах. Свечи по мере сгорания теряли вес, и рычаг перемещался, отображая ход времени.

Китайцы сжигали специальные благовония в качестве часов, отмечая время по изменению запаха, издаваемого слоями благовоний, пропитанными различными видами масел. Таблицы затмений спутников Юпитера, предсказанных Кассини, использовались для проведения не зависящих от положения измерений времени с точностью до нескольких минут при составлении карт Франции в 1679 году. Хронометр Гаррисона, работа над которым была завершена в 1759 году, позволял отсчитывать время на борту корабля с точностью, укладывающейся в диапазон 10 секунд, в течение недель [Dana and Penrod, 1990].

Еще в 1450 году астрономы предложили определять долготу по углу неподвижных звезд по отношению к Луне, однако эти таблицы звезд были неверными. В 1675 году король Карл II построил Гринвичскую обсерваторию, и тогда же (в качестве опорного) был принят Гринвичский меридиан. Понадобилось 100 лет, чтобы подготовить первый Морской альманах. Торговля с Новым Светом имела чрезвычайно большое значение в этот исторический период.

Критически важным определением долготы стало в 1707 году при трагических обстоятельствах, когда флот под командованием адмирала сэра Клаудсли Шовелла налетел на скалы у островов Силли. Потери составили четыре корабля и 2000 человек. Британская корона отреагировала на эти события, назначив вознаграждение в 20 000 фунтов стерлингов (около 2 миллионов долларов в пересчете на современные деньги) за хронометр, способный определять долготу с точностью до 30 миль.

Джон Гаррисон, уроженец Йоркшира, которому в то время было 21 год, принял вызов и посвятил свою жизнь созданию хронометров из дерева и металла. Один из созданных им приборов имел деревянные зубчатые колеса, а его погрешность составляла не более одной секунды в месяц в течение 14 лет. Хронометр Гаррисона № 4 использовался в плавании из Плимута в Мадеру, обеспечивая точность определения местоположения примерно в 1 милю. Королевский астроном подверг сомнению данный результат. Еще одно путешествие было предпринято, когда Джону исполнилось 70 лет, – на этот раз на Барбадос. После пятимесячного плавания его хронометр № 4 предсказал местоположение Барбадоса с точностью до 10 миль. Еще десять лет у Гаррисона ушло на утомительные тяжбы, чтобы получить причитающиеся ему денежные вознаграждения, однако сделать это полностью ему так и не удалось.

Несмотря на существенный прогресс в области навигационных хронометров в результате работы Гаррисона, следующий важный шаг был сделан лишь в 1920-х годах. Это десятилетие

ознаменовалось открытием и разработкой генератора колебаний на кварцевых кристаллах. На основе этого открытия были разработаны кварцевые часы, способные обнаруживать нестабильности скорости вращения Земли, UT1. Благодаря созданию этих часов во всех областях хронометрии был сделан большой шаг вперед – для навигации и других применений [Allan, 1995].

Разработка радара и радиосвязи на сверхвысоких частотах в 1930-х и 1940-х годах XX века дала возможность генерировать разновидности электромагнитных волн (микроволны), необходимых для взаимодействия с атомами. Исследования, направленные на разработку атомных часов, в первую очередь были посвящены резонансам микроволн в молекуле аммиака.

Первые атомные часы на основе аммиака были созданы в 1948 году и представлены в 1949 году. Однако их функциональные характеристики (около 1×10^{-10}) не сильно отличались от существующих стандартов, и внимание практически сразу переключилось на более перспективные атомно-лучевые устройства на основе цезиевого атомного резонанса. Первый применимый на практике цезиевый атомный эталон частоты был создан в Национальной физической лаборатории Англии в 1955 году. С тех пор атомное время отсчитывается непрерывно.

Описание используемых в настоящий момент стандартов точной частоты и времени, а также их характеристики, шкалы времени, методологии измерений, существующие системы и опыт эксплуатации представлены в Справочнике МСЭ-R "Выбор и использование систем точной частоты и точного времени".

Важность определения точного времени, точной частоты и обеспечения синхронизации времени

Точная частота и точное время стали основой многих технических и жизненных процессов. Сегодня определение точного времени используется:

- во всех системах связи;
- в большинстве навигационных систем;
- в телекоммуникационных и компьютерных системах и относящихся к ним сетях;
- в учетных и банковских системах;
- в системах управления воздушным и морским движением;
- во многих научных исследованиях;
- в системах обнаружения неисправностей и контроля эффективности электросетей;
- в большинстве военных систем;
- в исследовании и освоении космоса;
- при обнаружении землетрясений и в глобальной тектонике;
- при зондировании окружающей среды;
- при измерениях уровня океана и океанических течений; в системах предотвращения столкновений самолетов и точной посадки;
- при слежении за автомобилями в автопарках;
- при составлении карт автомобильных маршрутов.

Ежегодно выпускается более двух миллиардов кварцевых резонаторов, а количество находящихся в эксплуатации атомных часов составляет около ста тысяч.

Качество самих часов хотя и имеет большое значение, не является единственным фактором, влияющим на точность измерения времени. Еще одним важным фактором является качество линий передачи точного времени, используемых для сравнения показаний часов и их синхронизации. Один из примеров – сети электросвязи и компьютерные сети. Работа большинства сетей электросвязи и компьютерных сетей основывается на показаниях часов. Отсутствие временной синхронизации связного/компьютерного оборудования может привести к следующим весьма негативным последствиям:

- к сбою в работе в связи с нарушением надлежащей последовательности событий, инициированной соответствующим программным обеспечением (протоколами), данными резервных программ и т. д.;
- к потере данных – некорректная временная метка может стать причиной ошибочного изменения информации в базах данных, некоторые приложения могут выполнить некорректное действие и даже привести к аварийному сбою;
- к образованию бреши в системах безопасности – поскольку в журналах доступа к серверу обобщается информация от различных хост-узлов, корректность временных меток имеет существенное значение. Некорректное измерение времени может поставить под угрозу безопасность сервера, поскольку из-за неточностей в файлах журналов администраторы не смогут отследить действия хакеров.

Спутниковые системы, предназначенные для распространения сигналов точного времени и точной частоты

С начала XX века для передачи и распространения сигналов времени использовались радиоволны. Однако с самого начала было известно, что радиосигналы точного времени проходят трассу от наземного передатчика до наземного приемника с некоторой задержкой и что точность принимаемого сигнала времени не может быть выше известных сведений о величине задержки распространения. Наземные передатчики посылают сигналы, обладающие задержкой распространения, которую трудно рассчитать, поскольку ее величина постоянно меняется из-за перемены условий прохождения сигнала в ионосфере. Некоторые из этих проблем не столь существенны для сигналов в пределах прямой видимости, обладающих небольшой зоной покрытия.

На самом деле задержки на трассе, не имеющей препятствий, между спутниковым передатчиком и наземным приемником являются более стабильными и могут быть определены более точно, чем задержки сигнала между наземными станциями. Данный фактор является важным преимуществом, поскольку точность любого метода распространения почти всегда ограничена неопределенностью, связанной с выбором метода компенсации времени, затрачиваемого на прохождение сигнала от источника до места назначения.

Передача сигналов времени с объекта, расположенного на большой высоте над Землей, по трассе между передатчиком и приемником, не имеющей препятствий, как правило, обладает более высокой точностью, чем передача сигналов от наземных станций. Кроме того, сигнал, переданный со спутника, может быть принят в обширной зоне, поэтому спутниковые системы могут поддерживать распространение сигналов времени и частоты на большой территории гораздо эффективнее, чем любые из наземных систем. Более того, задержка распространения между спутниковым передатчиком и наземным приемником может быть смоделирована более точно, чем аналогичная задержка между станциями полностью наземной системы.

Настоящий Справочник предназначен в качестве вводного материала в области спутниковой передачи и распространения сигналов времени и частоты. В первой главе представлен обзор спутниковых систем, используемых для распространения сигналов времени и частоты. С учетом преимущественной роли глобальных навигационных спутниковых систем, в частности системы глобального определения местоположения (GPS), Глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС), и спутников связи в распространении сигналов времени в главе приведено описание процесса формирования этих сигналов и их соотношение с международной шкалой времени. Вслед за описанием спутниковых систем приведен обзор формирования и поддержки международной шкалы времени – Всемирного координированного времени (UTC). Эта шкала времени формируется на основе данных, полученных от многих национальных центров и лабораторий измерения времени. Так, одна из глав посвящена описанию структуры и функционирования национальных центров измерения времени, поддерживающих формирование и распространение данной шкалы времени. Передача и распространение сигналов времени между этими центрами измерения времени и отдельными пользователями производится при помощи радиопередатчиков. Релятивистские эффекты и эффекты распространения, влияющие на такие передачи, рассматриваются перед заключительными главами, описывающими основные применяемые методы передачи сигналов времени и частоты.

Ссылки

- ALLAN D.W. [5-7 June 1995] The Impact of Precise Time in Our Lives, 50th Anniversary Annual Meeting, Institute of Navigation, Colorado Springs, Colorado, United States of America
<http://www.ALLANstime.com/Publications/DWA/PDF/95jungps.pdf>.
- DANA P. and PENROD B. [July-August, 1990] The Role of GPS in Precise Time and Frequency Dissemination, GPS World (http://www.pdana.com/PHDWWW_files/gpsrole.pdf).
- МСЭ-R [1997] Справочник по выбору и использованию систем точной частоты и точного времени. Женева, Швейцария (<http://www.itu.int/publ/R-HDB-31/en>).

ГЛАВА 1

**СПУТНИКИ И ПЕРЕДАЧА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ СИГНАЛОВ
ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ**

	<i>Стр.</i>
1.1 Введение.....	2
1.2 Космические службы радиосвязи и спутниковые системы, используемые для передачи и распространения сигналов времени и частоты.....	2
1.2.1 Служба стандартных частот и сигналов времени	3
1.2.2 Глобальные навигационные спутниковые системы	4
Ссылки	5

1.1 Введение

За последние несколько десятилетий атомные часы прошли путь от лабораторной новинки до устройств с широким диапазоном применения. Улучшение технологий кварцевых генераторов и спутниковых систем отсчета времени стало дополнением к десятилетиям совершенствования атомных часов. Подобные усовершенствования оказались крайне полезными для систем навигации, связи и энергоснабжения. Определение точного времени из новшества превратилось в необходимость. Таким образом, элементы определения точного времени необходимы для решения многих прикладных задач.

Глоссарий и определения терминов времени и частоты, которые используются в настоящем Справочнике, приведены в Рекомендации МСЭ-R TF.686 "Глоссарий и определения терминов времени и частоты".

1.2 Космические службы радиосвязи и спутниковые системы, используемые для передачи и распространения сигналов времени и частоты

Началом космической эры стал запуск в октябре 1957 года российского аппарата *Спутник-1*, за которым всего четыре месяца спустя последовал запуск первого американского спутника, получившего название *Explorer-1*. Первые спутники использовались для исследований солнца и атмосферы, но очень скоро акценты сместились в сторону электросвязи. Пассивный спутник-ретранслятор *Echo-1*, запущенный Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства (НАСА) в августе 1960 года, выступал в роли "зеркала", отражающего радиосигналы обратно на Землю [Whalen, 2002]. Ранние исследования распространения сигналов, проведенные с использованием *Echo-1* в 1960 году [Jakes, 1961], иногда считаются первыми экспериментами по определению времени при помощи спутника. Вероятно, первый эксперимент по определению точного времени был проведен при помощи активного спутника-ретранслятора *Telstar-1* в августе 1962 года. Данный эксперимент позволил Военно-морской обсерватории Соединенных Штатов (USNO), Национальной физической лаборатории Соединенного Королевства (NPL) и Гринвичской королевской обсерватории (RGO) провести трансатлантическое сравнение часов при помощи нового метода, называемого двусторонней спутниковой передачей сигналов времени.

Все спутниковые системы, принадлежащие различным космическим службам радиосвязи (радиовещательной, фиксированной, подвижной спутниковой и другим службам), тем или иным способом используют функции передачи сигналов времени и частоты [Lowe *et al.*, 2007]. Передача сигналов времени необходима в телеметрии, системе слежения и управления, для целей измерения расстояния и регистрации времени. Однако требования к точности частоты и времени для многих спутников связи (особенно коммерческого использования) в целом ограничиваются необходимостью поддержания назначенной полосы радиочастот и осуществления вышеупомянутых функций. В то же время некоторые спутниковые системы связи, например использующие многостанционный доступ с временным разделением (TDMA), для осуществления связи требуют точного времени.

Спутниковые системы исследования Земли, а также метеорологические спутниковые системы нуждаются в механизмах точного определения времени для измерения различных параметров окружающей среды (например, уровня моря) и в течение длительного времени используются для распространения сигналов точного времени [Lombardi, Hanson, 2005; EUMETSAT Satellite Jason-2, 2006].

Некоторые системы, особенно те, которые принадлежат спутниковой радионавигационной службе [Регламент радиосвязи, 2008 г.], весьма активно участвуют в распространении сигналов точного времени и частоты. Передача сигналов времени и частоты играет критически важную роль в функционировании таких систем, поскольку их основной задачей является предоставление эффективных услуг по определению местоположения, измерению скорости и времени в глобальном масштабе. В состав указанных систем входят источники сигналов точного времени и частоты, расположенные на борту спутников, а также высокоэффективные наземные сегменты, осуществляющие контроль за работой этих спутников и обеспечивающие точность бытовых источников сигналов времени и частоты.

В Регламенте радиосвязи (РР) МСЭ определена специальная космическая служба радиосвязи, задачей которой является распространение сигналов точного времени и частоты по всему миру, под названием "спутниковая служба стандартных частот и сигналов времени".

1.2.1 Служба стандартных частот и сигналов времени

Признавая важность стандартных частот точного времени для многих отраслей экономики, научных организаций и электросвязи в чрезвычайных ситуациях, Международный союз электросвязи включил определения [Регламент радиосвязи, 2008 г.] *службы стандартных частот и сигналов времени* и относящихся к ней станций радиосвязи в принятый им Регламент радиосвязи, имеющий статус международного договора. Определения, приведенные в Регламенте радиосвязи (издание 2008 года), представлены ниже.

1.53 *Служба стандартных частот и сигналов времени – служба радиосвязи для научных, технических и других целей, обеспечивающая передачу определенных частот, сигналов времени или тех и других установленной высокой точности, предназначенных для всеобщего приема.*

1.54 *Спутниковая служба стандартных частот и сигналов времени – служба радиосвязи, использующая космические станции, установленные на спутниках Земли, для тех же целей, что и служба стандартных частот и сигналов времени.*

Эта служба может включать также фидерные линии, необходимые для ее работы.

1.95 *Станция стандартных частот и сигналов времени – станция службы стандартных частот и сигналов времени."*

На Всемирных конференциях радиосвязи (ВКР) часть радиочастотного спектра была распределена службе стандартных частот и сигналов времени. В Таблице 1-1 приведена выдержка из таблицы распределения частот Регламента радиосвязи с описанием полос частот, распределенных спутниковой службе стандартных частот и сигналов времени.

ТАБЛИЦА 1-1

**Полосы частот, распределенные спутниковой службе стандартных частот
и сигналов времени
(Регламент радиосвязи, издание 2008 года)**

Полоса частот	Распределение	Статус	Комментарий
400,05–400,15 МГц		Первичный	Применяются пп. 5.261, 5.262 РР
4 202 ± 2 МГц	Космос-Земля		Разрешено п. 5.440 РР при условии достижения согласия в соответствии с п. 9.21
6 427 ± 2 МГц	Земля-космос		Разрешено п. 5.440 РР при условии достижения согласия в соответствии с п. 9.21
13,4–13,75 ГГц	Земля-космос	Вторичный	
13,75–14 ГГц	Земля-космос	Вторичный	
20,2–21,2 ГГц	Космос-Земля	Вторичный	
25,25–25,5 ГГц	Земля-космос	Вторичный	
30–31 ГГц	Космос-Земля	Вторичный	
31–31,3 ГГц	Космос-Земля	Вторичный	Применяется п. 5.149 РР

Согласно статье 26 Регламента радиосвязи (см. текст, извлеченный из Регламента радиосвязи издания 2008 года, который приводится ниже) государства – члены МСЭ должны осуществлять деятельность по обеспечению эффективной работы систем передачи стандартных частот и сигналов времени (включая спутниковые), а также по защите этих систем от вредных помех.

СТАТЬЯ 26

Служба стандартных частот и сигналов времени

26.1 § 1 1) Для облегчения более эффективного использования радиочастотного спектра и содействия другой технической и научной деятельности администрации, обеспечивающие или намеревающиеся обеспечивать службу стандартных частот и сигналов времени, должны координировать в соответствии с положениями настоящей Статьи установление и эксплуатацию такой службы на всемирной основе. Следует обратить внимание на распространение этой службы на те районы мира, которые не обслуживаются должным образом.

26.2 2) С этой целью каждая администрация должна принять меры для координирования с помощью Бюро любой новой передачи стандартной частоты или сигнала времени или любого изменения в существующих передачах в полосах стандартных частот. Для этого администрации должны обмениваться между собой и представлять в Бюро всю соответствующую информацию. По этому вопросу Бюро необходимо консультироваться с другими международными организациями, которые имеют непосредственную и большую заинтересованность в данном предмете.

26.3 3) Насколько это возможно, никаких новых частотных присвоений в полосах стандартных частот не должно производиться и заявки на них не должны направляться в Бюро до тех пор, пока не будет завершена соответствующая координация.

26.4 § 2 Администрации должны сотрудничать между собой в целях уменьшения помех в полосах частот, которые распределены службе стандартных частот и сигналов времени.

26.5 § 3 Администрации, которые обеспечивают эту службу, должны сотрудничать при посредстве Бюро в сравнении и распространении результатов измерений стандартных частот и сигналов времени, а также в отношении изменений характеристик сигналов частот и времени.

26.6 § 4 При выборе технических характеристик передачи стандартных частот и сигналов времени администрации должны руководствоваться соответствующими Рекомендациями МСЭ-R.

Следует отметить, что не существует спутниковых систем, предназначенных исключительно для распространения стандартных частот и сигналов времени. Как упоминалось выше, оборудование для передачи сигналов точного времени и точной частоты, как правило, используется на совместной основе для выполнения других прикладных задач на борту того же спутника.

Некоторые страны не имеют присвоений в *спутниковой службе стандартных частот и сигналов времени*, так как они используют в качестве источника точного времени и точных частот спутниковые системы, принадлежащие другим службам радиосвязи. Эти системы (например, ГНСС) способны передавать высокоточное время в любую точку Земли.

1.2.2 Глобальные навигационные спутниковые системы

В настоящее время (2010 год) глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), принадлежащие *радионавигационной спутниковой службе* (РНСС) [Регламент радиосвязи, 2008 г.], являются практически основным средством передачи сигналов точного времени и точных частот на глобальной основе.

Существуют две действующие системы ГНСС и три спутниковые системы контроля и коррекции (SBAS):

- система глобального определения местоположения США (GPS), обеспечивающая глобальное покрытие;
- российская глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС), обеспечивающая покрытие, близкое к глобальному.

Системы SBAS, обеспечивающие дополнительное локальное навигационное покрытие:

- широкозонная система контроля и коррекции (WAAS) предоставляет дополнительные сигналы ГНСС при помощи геостационарного спутника "Инмарсат" для увеличения зоны покрытия в Соединенных Штатах Америки;
- европейская геостационарная служба навигационного покрытия (EGNOS) предоставляет дополнительные сигналы ГНСС при помощи "Инмарсат" для увеличения покрытия в Европе;
- многофункциональная спутниковая система контроля и коррекции (MSAS) использует специально выделенные спутники MSAS для предоставления дополнительных сигналов ГНСС в Японии и соседних азиатских странах.

Подробное описание систем GPS, ГЛОНАСС и SBAS представлено в следующих главах.

Несколько других национальных и международных систем находятся на различных этапах проектирования и разработки, в частности COMPASS (Китай), Galileo (Европейское космическое агентство), Индийская региональная спутниковая система навигации (IRNSS) (Индия) и QZSS (Япония).

Краткие описания вышеупомянутых систем и основные технические характеристики их космических сегментов приведены также в Рекомендации МСЭ-R М.1787 "Описание систем и сетей радионавигационной спутниковой службы (космос-Земля и космос-космос) и технические характеристики передающих космических станций, работающих в полосах частот 1164–1215 МГц, 1215–1300 МГц и 1559–1610 МГц".

Ссылки

- JAKES Jr. W.C. [1961] Participation of Bell Telephone Laboratories in Project Echo, Bell System Technical. Journal, 40, 975-1028.
- LOMBARDI M.A., HANSON D.W., [March-April 2005] The GOES Time Code Service, 1974-2004: A Retrospective. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 11, 2 (<http://nvl.nist.gov/pub/nistpubs/jres/110/2/j110-2lom.pdf>).
- Low Earth Orbiting (LEO) satellite Jason-2 Space segment, the European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), 2006 (http://www.eumetsat.int/Home/Main/What_We_Do/Satellites/Jason/SpaceSegment/?l=en).
- LOWE J., HEIDECKER J., SWIDAN M., HISHAM A., SAMUEL A.S. [2007] Standard time and frequency dissemination via egyptian digital satellite. 39th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. Long Beach, California, USA (<http://tf.nist.gov/timefreq/general/pdf/2274.pdf>).
- WHALEN D. J. [2002] The origins of Satellite Communications: 1945-1965. Smithsonian History of Aviation and Spaceflight Series, Smithsonian Books.

Публикации МСЭ-R

- Регламент радиосвязи, издание 2008 года. Том 1, статья 1. Термины и определения. Международный союз электросвязи, 2008 (<http://www.itu.int/publ/R-REG-RR-2008/en>).
- Рекомендация МСЭ-R TF.686-2. Глоссарий и определения терминов времени и частоты (<http://web.itu.int/rec/R-REC-TF.686-2-200202-I/en>).
- Рекомендация МСЭ-R М.1787. Описание систем и сетей радионавигационной спутниковой службы (космос-Земля и космос-космос) и технические характеристики передающих космических станций, работающих в полосах частот 1164–1215 МГц, 1215–1300 МГц и 1559–1610 МГц (<http://www.itu.int/rec/R-REC-M.1787-0-200908-I/en>).

ГЛАВА 2

СИСТЕМА ГЛОБАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ

	<i>Стр.</i>
2.1 Общее описание и принципы работы.....	8
2.2 Основные положения GPS	8
2.2.1 Коды PRN для CDMA и измерения дальности	9
2.2.2 Спектр GPS	11
2.2.3 Навигационное сообщение.....	11
2.3 Сегменты GPS	13
2.3.1 Космический сегмент	13
2.3.2 Управляющий сегмент.....	14
2.3.3 Пользовательский сегмент	14
2.4 Роль системы отсчета времени и синхронизации в проводимых работах.....	15
2.4.1 Измерения дальности и факторы характеристик системы.....	15
2.4.2 Стабильность и прогнозирование точности спутниковых часов	16
2.5 Оценка эксплуатационных характеристик спутниковых часов GPS	16
2.5.1 Задержки распространения спутникового сигнала.....	18
2.5.2 Соображения, связанные с теорией относительности	19
2.6 Влияние часов приемника на работу системы	19
2.6.1 Часы навигационного приемника.....	20
2.6.2 Часы приемника синхронизации	20
2.7 Определение и поддержка синхронизации.....	21
2.7.1 Действия, выполняемые управляющим сегментом	21
2.7.2 Управление отсчетом времени GPS	22
Ссылки	22

Служба передачи сигналов времени и частоты играет критически важную роль в процессе функционирования системы глобального определения местоположения (GPS) и, в свою очередь, совершенствуется в связи с ее широкомасштабным применением. В настоящей главе подчеркиваются роль сигналов часов, времени и частоты в процессе работы GPS, а также функциональные возможности и ограничения GPS, связанные с предоставлением механизма распространения этих параметров.

2.1 Общее описание и принципы работы

GPS предоставляет инфраструктуру для глобального определения местоположения, скорости и времени (PVT), а также является базовой системой для других прикладных задач, выполняемых исходя из этих основных функциональных возможностей. Данная система состоит из трех так называемых сегментов – космического, управляющего и пользовательского.

Наиболее известным является космический сегмент – группировка, номинально состоящая из 24 спутников на полусинхронных (11 ч 58 мин) орбитах, непрерывно передающих сигналы измерения дальности с расширенным спектром в направлении Земли. Все спутники ведут передачу на одинаковых (около 1,5 ГГц (диапазон L)) частотах, модулированных несколькими идентифицирующими псевдослучайными шумовыми кодами.

Управляющий сегмент осуществляет наблюдение за техническим состоянием, статусом и характеристиками спутников, формирует информационное сообщение, которое передается спутниками, и предпринимает действия, для того чтобы представить отчет о любых отклонениях в работе спутников и их устранению. Пользовательский сегмент включает как военные, так и гражданские приемники во всем мире. Спутники GPS работают на основе рубидиевых или цезиевых стандартов (либо и тех и других), предоставляющих эталон для формирования сигналов измерения дальности, передаваемых спутниками.

2.2 Основные положения GPS

Большинство ключевых характеристик GPS приведено в Таблице 2-1. Каждый спутник GPS передает два (или более) несущих сигнала в диапазоне L, модулированных двумя или более псевдослучайными шумовыми (PRN) кодами, и поток двоичных данных. Коды PRN необходимы для многостанционного доступа с кодовым разделением, позволяющего всем спутникам использовать одни и те же частоты с минимальными помехами. Эти коды также позволяют выполнять высокоточные односторонние измерения дальности. Для этого приемник создает локальную реплику ожидаемого кода спутника и производит поиск правильной корректировки сигнала реплики как по задержке, так и по доплеровскому сдвигу. Информационное сообщение под названием NAV-MSG содержит данные о спутниковых часах, точном местоположении спутника, альманах группировки спутников, данные о техническом состоянии и статусе и т. д. Существует целый ряд всеобъемлющих справочных материалов по GPS, в которых основные принципы работы системы рассматриваются гораздо более подробно, чем в настоящем Справочнике. В частности, в учебных пособиях авторов Мисра и Энге [Misra and Enge, 2001] и Каплан [Kaplan and Hegarty, 2006] представлены подробные и доступные описания всех аспектов GPS. В работе Паркинсона [Parkinson, *et al.*, 1996] представлено наиболее всестороннее изложение материала, содержащее расширенное обсуждение прикладных задач, а также принципы работы системы. Здесь мы приводим лишь краткий обзор, с тем чтобы подготовить основу для обсуждения роли синхронизации в этой важной системе.

ТАБЛИЦА 2-1

Система GPS

Частота сигнала	Коды с расширенным спектром	Кодовые скорости
L1 1575,42 МГц	Clear Acquisition (легко распознаваемый код) – код C/A	1,023 МГц
	Precision (код точного сопровождения) – код P	10,23 МГц
	Код Y (сигнал военного назначения)	10,23 МГц
	NAV-MSG (данные спутника)	50 бит/с
L2 1227,60 МГц	Precision – код P	10,23 МГц
	Код Y (сигнал военного назначения)	10,23 МГц
	NAV-MSG (данные спутника)	50 бит/с

Система GPS была разработана в начале 1970-х годов, и ее основной задачей являлось предоставление эффективных услуг определения местоположения, скорости и времени для пользователей в Министерстве обороны США и союзников США. Требования, на основании которых была сформирована исходная архитектура системы, практически полностью определялись задачами, выполняемыми Министерством обороны. Однако по прошествии определенного времени GPS приобрела характерные признаки системы "двойного назначения". По некоторым оценкам, в 2002 году только в США система GPS обслуживала приблизительно 300 тыс. пользователей в Министерстве обороны и 4 млн. гражданских лиц и предпринимателей. Роль гражданских пользователей не была недооценена, и в настоящее время эта система управляется совместной структурой по реализации программы, в которую входят представители Министерства обороны, НАТО и Министерства транспорта США, которое отвечает за гражданские применения.

Правительство США признало важность двойного использования системы, и в связи с этим была сформирована исполнительная руководящая группа для координирования и управления использованием системы с учетом ее двойного назначения. Сопредседателями Исполнительного комитета по определению местоположения, навигации и измерению времени (PNT) являются первые заместители министров обороны и транспорта, а также представители других правительственных учреждений. Поддержку деятельности Исполнительного комитета по контролю над руководством данной программой осуществляет координационное бюро.

2.2.1 Коды PRN для CDMA и измерения дальности

Псевдослучайные шумовые коды (PRN) используются в GPS как для измерения дальности, так и для обеспечения многостанционного доступа на общей частоте. Двумя исходными кодами GPS являются код точного сопровождения (код P) и легко распознаваемый код (код C/A). Коды C/A GPS выбираются из семейства кодов Голда длиной 1023 бита, генерируемых на спутнике на частоте 1,023 МГц.

Каждый спутник GPS передает уникальный код C/A, с тем чтобы пользовательский приемник мог беспрепятственно его распознать. Небольшая длительность кода C/A (1 мс) способствует его быстрому обнаружению, но при этом делает его уязвимым для помех. Длительность каждого бита кода C/A приблизительно равна 900 нс или 300 м. Устройство слежения за кодом пользовательского приемника, как правило, измеряет соответствие кода с точностью от 1/100 до 1/1000 бита.

Код P обладает гораздо большей длиной и генерируется на частоте 10,23 МГц. Таким образом, выполнение всего кода на этой частоте занимает 37 недель. Каждому спутнику GPS назначается однонедельный сегмент кода P, передача которого начинается в начале новой недели – в полночь с субботы на воскресенье.

В процессе, известном как A/S или антиспуфинг, код P, как правило, не передается, а заменяется зашифрованным кодом P с похожими характеристиками, так называемым кодом Y. Для обозначения данного компонента сигнала обычно используется терминология P(Y). Сигнал P(Y) гораздо более устойчив к помехам, чем C/A, и благодаря меньшей длительности бита потенциально обладает более высокой точностью измерения.

Выбор кодов C/A и P(Y) обусловлен их параметрами взаимной корреляции и автокорреляции. Слабая взаимная корреляция между кодами одного семейства уменьшает помехи многостанционного доступа для всех спутников, одновременно ведущих передачу.

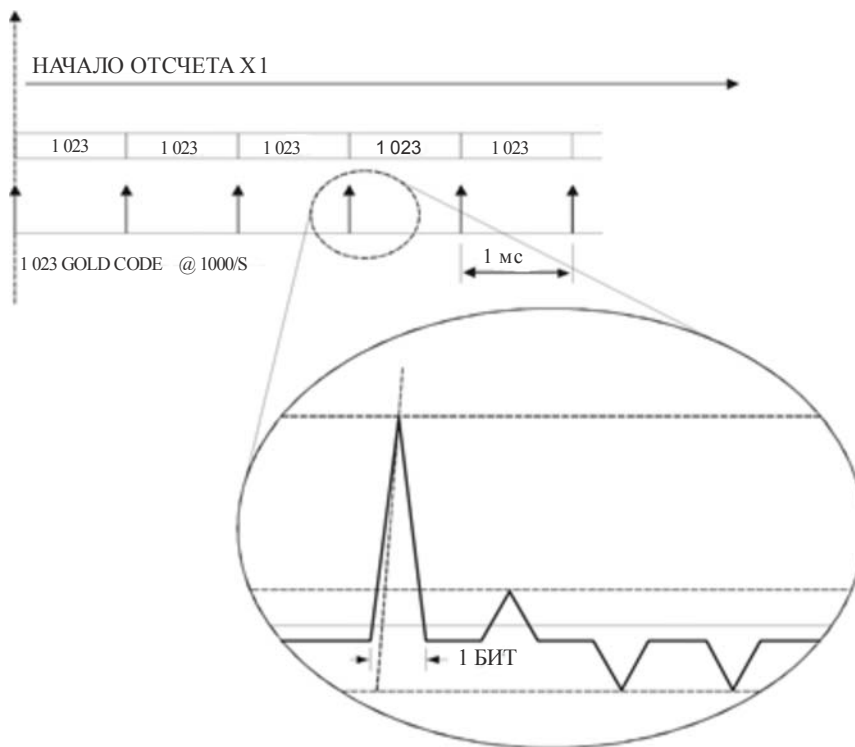
По параметрам автокорреляции коды PRN аналогичны гауссовому белому шуму. При значениях задержки, отличных от нуля, данный код точно не совпадает сам с собой. Это важно, поскольку позволяет приемнику однозначно и с высокой точностью сопоставить реплику кода с входным сигналом GPS. На Рисунке 2-1 изображены параметры корреляции кодов C/A GPS.

В настоящее время для нового поколения спутников GPS определяется и вводится ряд новых наборов кодов. К частоте L2 добавляются новые гражданские коды под названием L2C, кроме того, вводятся совершенно новая частота 1176,45 МГц, известная как L5, и новый набор военных кодов, известных как коды M.

В схемах новых кодов используются усовершенствования в кодировании, коррекции ошибок и цифровой обработке сигналов, произошедшие с 1970-х годов. Ожидается, что новые коды первоначально будут введены при запуске следующей группы спутников, называемых спутниками серии Block IIF, а в конечном счете будут передаваться всем созвездием после пуска в эксплуатацию спутников GPS следующего поколения, известных как GPS III.

РИСУНОК 2-1

Параметры корреляции кода C/A GPS



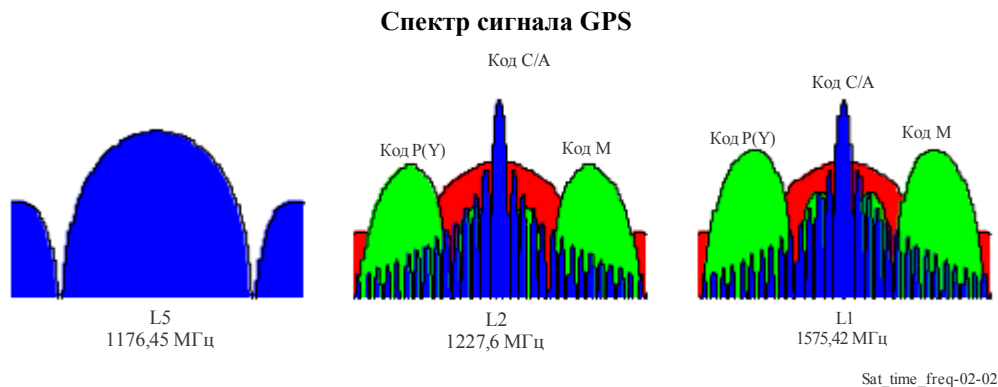
Sat_time_freq-02-01

2.2.2 Спектр GPS

На Рисунке 2-2 отображен действующий и модернизированный спектр сигнала GPS. Все частоты на борту спутников GPS являются производными от эталонного атомного стандарта частоты 10,23 МГц, известного как атомные часы. В настоящее время действующими несущими являются сигналы L1 на 1575,42 МГц и L2 на 1227,6 МГц.

По состоянию на 2002 год сигнал L2 является несущим только для кода P(Y) на частоте 10,23 МГц, а сигнал L1 – как для P(Y), так и для C/A со сдвигом по фазе на 90°.

РИСУНОК 2-2



Большинство недорогих приемников в настоящее время отслеживают только сигналы кода C/A на частоте L1. Приемники, принадлежащие Министерству обороны США, чаще всего способны отслеживать коды P(Y) на обеих частотах L1 и L2. Серийные радиоприемники с улучшенными эксплуатационными характеристиками, предназначенные для научных и других задач, требующих высокой точности, также способны отслеживать оба несущих сигнала, используя разнообразные методы доступа к базовым РЧ-сигналам, несмотря на значительное снижение коэффициента сигнал/шум [Misra and Enge, 2001].

Модернизированный спектр GPS позволяет сформировать сигнал L2C и усовершенствованную версию навигационного сообщения под названием CNAV путем добавления двух отдельных узкополосных гражданских сигналов PRN к сигналу L2. Разделенный спектр кода M добавляется к L1 и L2. Новый гражданский сигнал L5C предназначен для обеспечения безопасности человеческой жизни и, как ожидается, будет доступен с первым запуском спутника IIF GPS (2010 г.) [Kaplan and Hegarty, 2006]. На частоте L5 передаются два кода PRN измерения дальности – синфазный код (именуемый кодом I5) и код со сдвигом по фазе на 90° (именуемый кодом Q5). Оба кода имеют длину 10 230 битов и передаются на частоте 10,23 МГц с частотой повторения 1 мс. Поток I5 модулируется 10-битовым кодом Неймана–Хоффмана с тактовой частотой 1 кГц, а код Q5 также модулируется 20-битовым кодом Неймана–Хоффмана с тактовой частотой 1 кГц.

Помимо преимуществ, предоставляемых дополнительной частотой, структура сигналов и коды предназначены для:

- усовершенствования структуры сигнала в целях улучшения эксплуатационных характеристик;
- увеличения мощности примерно на 3 дБ;
- поддержки десятикратного выигрыша в обработке благодаря большей ширине полосы.

2.2.3 Навигационное сообщение

Навигационное сообщение (NAV-MSG) включает всю информацию, необходимую приемнику для выработки решения о местоположении, скорости и времени на основе измеренной псевдодальности и/или доплеровского сдвига [IS-GPS-200 rev D, 2006]. На Рисунке 2-3 изображены

элементы сообщения NAV-MSG. Оно состоит из кадра длиной 1500 битов, сформированного из пяти субкадров длиной 300 битов каждый. Каждый субкадр передается со скоростью 50 бит/с, а его выполнение занимает 6 с. Однако в совокупности кадры 4 и 5 составляют 1/25 от всего альманаха созвездия. Это означает, что передача всего альманаха занимает 12,5 минут.

РИСУНОК 2-3

Навигационное сообщение



Sat_time_freq-02-03

В начале каждого субкадра находится ключевое слово или HOW. HOW содержит важную информацию о временных характеристиках, необходимую для приемников системы точного определения местоположения (PPS) для "переключения" с отслеживанием кода C/A на код P(Y). HOW предоставляет абсолютное время недели, относящееся к началу следующего субкадра в единицах, равных 1,5 с. Таким образом, приемник, расшифровавший HOW, может на основе этой величины однозначно установить собственное внутреннее время.

Первые два субкадра содержат информацию, относящуюся к передающему спутнику. Эти данные, которые в совокупности называются эфемеридой, включают параметры орбиты и прогнозы, касающиеся ошибок часов. Субкадр 1 содержит три параметра часов, которые моделируют отклонение спутниковых часов от времени GPS при помощи квадратного многочлена. Сдвиг временной диаграммы в секундах за эталонное время (t_{oc}) – это слагаемое af_0 ; погрешность частоты в с/с за эталонное время – это слагаемое af_1 ; а уход частоты в c/c^2 – слагаемое af_2 .

Дополнительное слагаемое синхронизации, входящее в состав субкадра 4 навигационного сообщения, – это поправка UTC-GPS. Время UTC может быть вычислено исходя из GPS и этих параметров. Оно также может быть смоделировано при помощи слагаемых смещения и ухода частоты. В том случае если к UTC применяется дополнительная секунда, в данном субкадре содержатся сведения о неделе, в которую это происходит, а также информация о том, когда дополнительная секунда будет добавлена к итоговому времени.

Когда сигналы L2C и L5 будут задействованы, они будут передавать усовершенствованную версию NAV-MSG, которая называется сообщением CNAV. Каждый из этих сигналов в действительности представляет собой набор модуляций на несущей частоте. Средство обнаружения, не содержащее данных и называемое пилот-сигналом, в ряде случаев параллельно передает сигнал данных в качестве вспомогательного средства обнаружения. Предполагается, что этот не содержащий данных сигнал обнаружить проще, чем зашифрованный сигнал данных. Если этот сигнал будет успешно обнаружен, то он может использоваться для приема сигнала данных.

Данный метод облегчает обнаружение сигнала GPS и повышает уровни мощности на корреляторе. Сообщение CNAV передается с сигналом данных и включает ту же информацию, что и сообщение предыдущего типа, в формате псевдопакетов сообщений длиной 300 битов и длительностью 12 с, а не в виде кадра. В этом сообщении применяется упреждающая коррекция ошибок сверточным кодом со скоростью 1/2. Полученный в результате поток данных со скоростью 100 символов в секунду затем добавляется к синфазной несущей сигнала для формирования сигнала данных. Несущая со сдвигом по фазе 90° в этом случае не содержит данных и становится пилот-сигналом.

2.3 Сегменты GPS

GPS согласно общему описанию состоит из трех сегментов – спутники, система управления и пользователи. Обязанности по генерации сигнала распределяются между спутниковым и управляющим сегментами.

2.3.1 Космический сегмент

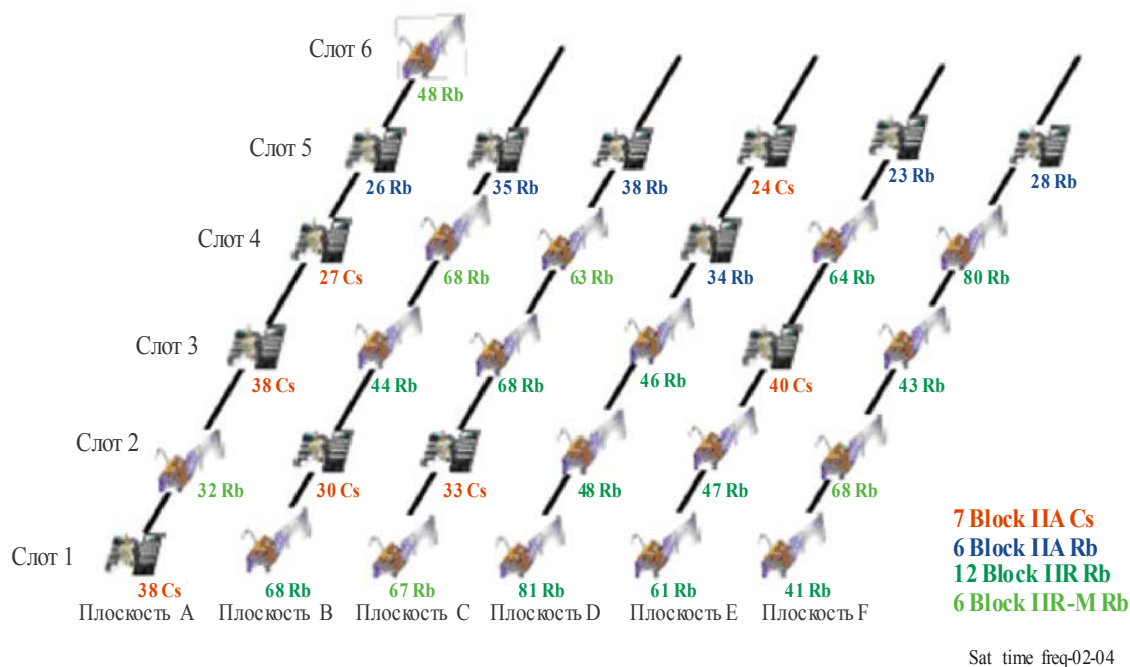
Номинальное или оперативное созвездие GPS состоит из 24 спутников, находящихся на полусинхронных орбитах. Спутники развертываются в шести орбитальных плоскостях с наклоном 55° , по четыре спутника в каждой плоскости. Как показано на Рисунке 2-4, в действующем созвездии номинальное количество (24 работающих спутника) превышено.

Положение спутников стабилизируется по трем осям таким образом, чтобы передающая антенная решетка была направлена в сторону Земли, а панели солнечных батарей – в сторону Солнца. Разработано несколько "блоков" спутников, начиная с опытных образцов серии Block I и заканчивая новейшими спутниками серии Block IIF. В настоящее время ведется проектирование следующего поколения спутников – Block III.

Сигналы GPS передаются при помощи решетки из 12 спиральных антенн, формирующей профилированную диаграмму направленности, ориентированную в направлении Земли, обеспечивая практически постоянную мощность принимаемого сигнала на земной поверхности. Такая конструкция позволяет свести к минимуму межспутниковые помехи и улучшить эксплуатационные характеристики для пользователя. Бортовое навигационное оборудование GPS включает трое или четверо атомных часов и электронные устройства, формирующие сигналы с расширенным спектром, полученные от этих часов. Использование атомных часов необходимо было для более точного прогнозирования орбиты и расширения возможностей функционирования спутника в автономном режиме в том случае, если наземный управляющий сегмент неработоспособен. Таким образом, в отличие от обычных спутников связи, которые просто ретранслируют сигналы, генерируемые наземными станциями, спутники GPS на борту формируют эталонные сигналы. На Рисунке 2-4 изображены типы часов на борту каждого спутника в созвездии по данным на 2008 год. Одновременно используются только одни часы, а остальные бездействуют до тех пор, пока не произойдет отказ или ухудшение характеристик работающих часов. Часы на борту спутника служат в качестве генератора эталонной частоты для формирования кодов C/A и P(Y), а также несущих сигналов L1 и L2.

РИСУНОК 2-4

Спутники и часы GPS по данным на декабрь 2008 года



2.3.2 Управляющий сегмент

Управляющий сегмент включает главную управляющую станцию (Master Control Station, MCS), находящуюся на военно-воздушной базе в Шривере, около г. Колорадо-Спрингс, и специальные станции контроля Министерства обороны США, расположенные на Гавайях, острове Вознесения, островах Диего-Гарсия и Кваджалейн. Национальное агентство геопространственной разведки США (NGA) также осуществляет эксплуатацию дополнительных пунктов контроля, передающих результаты измерения параметров GPS управляющему сегменту GPS для улучшения эфемерид и повышения точности часов. На станциях контроля установлены приемники GPS с функцией точного определения местоположения (PPS), которые подключены к антеннам с высоким коэффициентом усиления, отслеживающим перемещение спутников GPS в небе. Приемники станций контроля непрерывно записывают результаты измерений псевдодалности, доплеровского смещения и фазы несущей на частотах L1 и L2 с интервалом 1,5 с.

Станция MCS отвечает за анализ данных, собранных станциями контроля в целях определения технического состояния и характеристик бортового навигационного оборудования спутника GPS. Результаты измерений станций контроля также обрабатываются на станции MCS в целях определения орбит спутника и ошибок часов. Эфемериды и временные параметры, содержащиеся в навигационном сообщении, рассчитываются на основе прогнозирования орбит и временных поправок на ближайшие 24 часа. Передача навигационных сообщений на спутник, как правило, выполняется один или два раза в день.

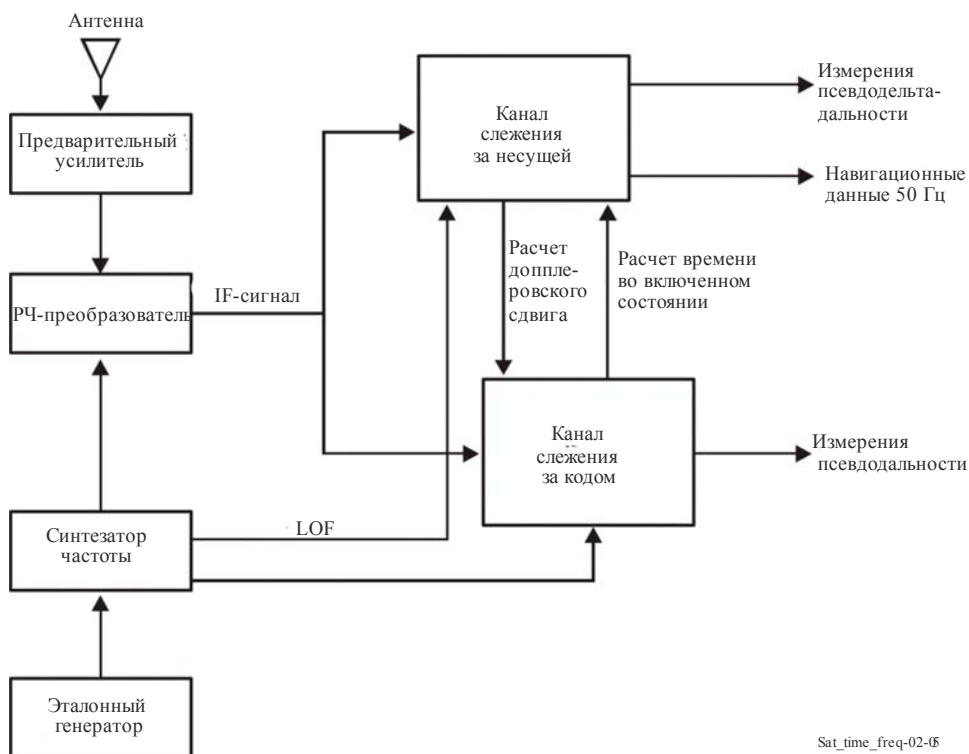
2.3.3 Пользовательский сегмент

Пользовательское оборудование для GPS предназначено для пассивного приема и отслеживания сигналов GPS. На Рисунке 2-5 показаны основные элементы приемника GPS – антенна, генератор колебаний и синтезатор частот, понижающий преобразователь и аналого-цифровой преобразователь (АЦП), каналные или сигнальные процессоры, а также навигационный процессор.

В типовом навигационном приемнике эталоном частоты является генератор колебаний на кварцевом кристалле, тогда как в приемнике для передачи сигналов точного времени (time transfer receiver) может использоваться внешний эталонный генератор. Антенны имеют, как правило, полусферическую форму, при этом в некоторых случаях используются так называемые антенны с дроссельным кольцом для ослабления отражений сигнала от расположенных поблизости поверхностей [Misra and Enge, 2001]. В результате преобразования с понижением частоты и дискретизации формируются IF-отсчеты спектра GPS с преобладанием шума. При помощи корреляции принятых отсчетов с локальными репликами кодов GPS этот приемник может принимать сигналы и производить измерения дальности до каждого из видимых спутников.

РИСУНОК 2-5

Общая блок-схема приемника GPS



2.4 Роль системы отсчета времени и синхронизации в проводимых работах

В данном разделе описывается важная роль точного отсчета времени в процессе нормального функционирования GPS для навигации и других применениях.

2.4.1 Измерения дальности и факторы характеристик системы

Измерения односторонней временной задержки и доплеровского сдвига являются ключевыми измерениями в GPS. Псевдодальность определяется исходя из измерения задержки между предполагаемым временем прибытия сигнала на приемник и временем передачи сигнала от спутника GPS.

В виде уравнения

$$PR = c(t_R - t_T) . \tag{2-1}$$

Псевдодальность соотносится с положением приемника следующим образом:

$$PR = R + b_R - b_T + I + T + MP + \epsilon . \tag{2-2}$$

Таким образом, ошибки в предполагаемом времени передачи сигнала, связанные с отклонениями в отсчете времени на спутнике GPS (b_T); ошибки во времени приема сигнала, связанные с отклонениями в отсчете времени на приемнике (b_R); ошибки, связанные с ионосферными задержками (I), тропосферными задержками (T), многолучевостью, и ошибки приемника (γ) вносят вклад в погрешность измерения псевдодальности. Схемы для внесения поправок в отношении задержек при распространении встроены во все приемники GPS. Ошибки слежения приемника (ϵ), как правило, являются высокочастотными, а усреднение во времени способствует уменьшению их влияния. Суммарная погрешность, выделенная для прогнозирования спутниковых часов, приведена в Таблице 2-2 [Parkinson *et al.*, 1996].

Часы приемника, не всегда являющиеся атомным генератором колебаний, вносят, по существу, неограниченную составляющую погрешности. Таким образом, необходимо произвести расчет этого параметра в системе навигации приемника или его устранение на сетевом уровне путем двойного дифференцирования.

ТАБЛИЦА 2-2

Суммарная погрешность системы GPS

Источники ошибок	Космический (м)	Управляющий (м)	Пользовательский (м)	Система (м)
Нестабильность подсистемы часов и навигации	2,7	2,7	–	2,7
Прогноз возмущения орбиты спутника	1,0	1,0	–	1,0
Другие источники	0,5	0,5	–	0,5
Прогноз эфемерид и точности часов	–	2,5	–	2,5
Компенсация ионосферной задержки	–	–	2,3	2,3
Тропосферная задержка	–	–	2,0	2,0
Шум и разрешение приемника	–	–	1,5	1,5
Многолучевость	–	–	1,2	1,2
Прочее	–	–	0,5	0,5
RSS	3,0	3,8	3,6	
Системная ошибка (1σ)				5,3

2.4.2 Стабильность и прогнозирование точности спутниковых часов

Спутниковые часы GPS являются основным элементом, генерирующим все передаваемые сигналы. Согласно описанию, приведенному в п. 2.3.1, на борту каждого спутника имеется резерв из трех или четырех атомных часов, причем в любой момент времени функционируют только одни часы. Реальная вероятность прогнозирования этих часов определяет погрешность, вносимую в определение местоположения, и точность передачи абсолютного времени, которые могут быть обеспечены для отдельного пользователя, а также необходимую частоту обновлений навигационного сообщения.

2.5 Оценка эксплуатационных характеристик спутниковых часов GPS

Морской центр космических технологий научно-исследовательской лаборатории ВМС (NCST/NRL) контролирует эксплуатационные характеристики спутниковых часов GPS и по результатам контроля составляет ежеквартальные отчеты. Важным аспектом поддержки программы в целом является оценка эксплуатационных характеристик атомных часов космического аппарата на орбите в целях содействия разработке новых и усовершенствованных космических атомных часов, оценки функциональных концепций системы и измерения эксплуатационных характеристик системы. Возможность точной оценки эксплуатационных характеристик подсистем GPS обеспечивается

обширной интерактивной базой данных, содержащей значения псевдодальности космических аппаратов (SV) и станций мониторинга (MS) NAVSTAR, полученные экспериментальным путем.

Эта база данных включает непрерывный поток информации о функционировании каждого из запущенных аппаратов SV NAVSTAR. Данные, полученные от сегмента оперативного управления GPS (OCS) и станций мониторинга NGA, а также точные эфемериды NGA, прошедшие постобработку, используются для получения тактовых сигналов от каждого атомных часов, работающих в системе.

Эта работа была начата в рамках программы NAVSTAR Block I, в процессе совместного слежения NCST/NRL и Управления совместных программ (JPO) GPS за демонстрационными спутниками Navigation Technology Satellite Two и Block I, работающими с сегментом временного управления. Затем работа была продолжена с действующими спутниками Block II/IIA и IIR и оперативным управляющим сегментом.

В 2004 году лаборатория NRL начала предоставлять расчетные показатели часов, полученные из результатов измерений фазы несущей, и точные эфемериды, полученные от Международной службы ГНСС (IGS). IGS представляет собой объединение более чем 200 национальных агентств, университетов и исследовательских институтов более чем из восьмидесяти стран.

Каждый участник вносит вклад в разнообразную деятельность по сбору данных GPS и анализу полученных результатов. Результатом такой совместной работы является усовершенствование схем, методик анализа и предоставляемых продуктов обработки данных, что в свою очередь приносит пользу каждой из участвующих организаций. IGS эксплуатирует более 350 постоянно и непрерывно работающих станций слежения GPS, использующих многоканальные двухчастотные приемники слежения за кодом и несущей.

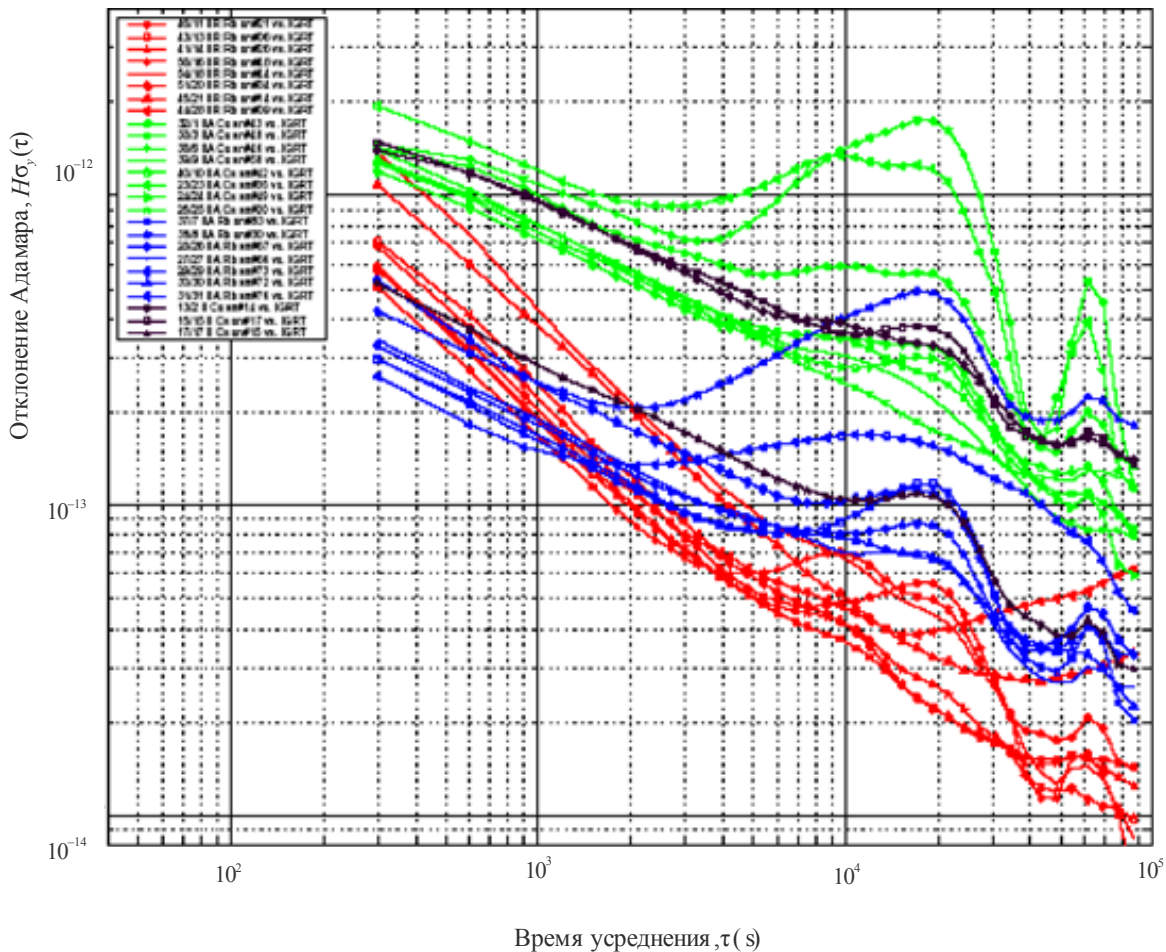
Разработаны и приняты общие стандарты хранения и обмена данными. Результаты обработки показаний часов, предоставляемые IGS, содержат расчеты показаний часов GPS и часов наземных станций в виде как быстрых, так и конечных продуктов. Распределенные шкалы времени (IGRT и IGST) создаются в NCST/NRL и обеспечивают стабильные эталонные величины для анализа показаний часов GPS, которые не зависят от часов отдельных наземных станций.

Стабильность частоты каждого действующего атомных часов на борту SV и на станциях MS вычисляется на основе информации, полученной из орбитальной базы данных, а конечная оценка формируется на основе непрерывной серии данных. Этот анализ является независимым и дополняет анализы, выполненные другими агентствами. Данные взаимных сравнений с другими анализами зачастую согласуются неформальным образом, в качестве тестового показателя, для обеспечения независимого результата. Номинальные характеристики излагаются в квартальных отчетах, а по результатам наблюдений, содержащим необычные или аномальные характеристики, проводится подробный анализ. Интерактивный архив орбитальной информации в базе данных GPS может использоваться для анализа ранее зарегистрированных нормальных и аномальных эксплуатационных характеристик часов. Эта интерактивная база данных дает возможность рассчитать стабильность частоты на основе диапазонов непрерывных данных с временем усреднения в диапазоне от 5 минут до нескольких лет, привязанным к общему стандарту.

На Рисунке 2-6 показана стабильность частоты спутниковых часов созвездия GPS.

РИСУНОК 2-6

Стабильность атомных часов спутника GPS



Военно-морская исследовательская лаборатория США,
22 декабря 2003 года, 13 ч 28 мин

Sat_time_freq-02-06

2.5.1 Задержки распространения спутникового сигнала

Помимо изменчивости параметров бортового оборудования отсчета времени, задержки на трассе распространения или отклонения в структуре спутника GPS также могут внести ошибки в отсчете времени в систему передачи сигналов времени конечному пользователю. В частности, должны учитываться различия в задержках распространения между трассами прохождения сигналов L1 и L2, различия в задержках фазы и кода, а также отклонения фазового центра антенн.

Поправки часов af_0 и af_1 , передаваемые в навигационном сообщении, вычисляются для двухчастотных приемников, использующих код P(Y). Данное решение основано на использовании двухчастотных результатов наблюдения, полученных от станций контроля управляющего сегмента GPS. Таким образом, эта поправка включает влияние разности хода сигнала на трассе распространения сигнала на комбинацию P1 и P2 без учета ионосферы. Пользователи с одночастотным оборудованием должны применять к широковещательным значениям часов поправку, которая называется групповой временной задержкой (tgd). Одно время для всех спутников использовалось одно значение tgd. Однако для каждого спутника были выполнены индивидуальные измерения групповых задержек, и в настоящее время они включаются в широковещательное сообщение.

До недавних пор погрешности, меньшие 1 цикла несущей (0,6 нс), не считались существенными для передачи сигналов времени. Однако с появлением систем передачи времени на базе фазы несущей [Larson and Levine, 1999] отклонения фазового центра в антеннах GPS в настоящее время представляют все больший интерес. При наличии антенны с правой круговой поляризацией если

космический аппарат должен сделать полный оборот вокруг направления на точку надира, то фаза несущей будет повернута на один полный цикл (19,04 см или 0,6 нс). Аналогичным образом пользователи, принимающие сигналы GPS в различных частях Земли, обнаружат различные значения фазы сигнала. Коррекция этих смещений в настоящее время доступна для прикладных задач, требующих высокой точности [Larson *et al.*, 2000].

2.5.2 Соображения, связанные с теорией относительности

Теория относительности играет заметную роль в отсчетах времени GPS, поэтому данному вопросу посвящено множество статей и глав в книгах. Более подробная информация по этому важному вопросу содержится в одной из следующих глав. Здесь мы рассмотрим лишь ключевые элементы.

Исходя из того что высота спутника GPS составляет 20 000 км над геоидом, часы на его борту подвержены влиянию двух релятивистских эффектов, которые изменяют генерируемую ими частоту. Комбинация растяжения времени и гравитационного сдвига частоты заставляет спутниковые часы GPS идти быстрее, чем эквивалентные часы на геоиде, на 38,59 мкс в день.

Для того чтобы спутники могли более точно вырабатывать требуемые частоты сигнала, как видно на геоиде, генераторы колебаний на борту космического аппарата компенсируют вышеуказанные эффекты, обеспечивая замедление на 38,59 мкс в день, поэтому частоты принятых сигналов соответствуют координатному времени на геоиде. Кроме того, второй релятивистский сдвиг частоты происходит из-за того, что орбиты спутников не являются идеально круговыми. Приблизительное выражение для погрешности, полученной в результате этого сдвига, задается формулой

$$\Delta t_r = \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E = \frac{2 \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{c^2}, \quad (2-3)$$

где:

\mathbf{r} и \mathbf{v} – позиция и скорость спутника, а Δt_r корректируется в процессе обработки в приемнике GPS с использованием данных об эксцентриситете, полученных из широковещательного навигационного сообщения.

Значение ошибки синхронизации, вызванной эксцентриситетом орбиты GPS, составляет десятки наносекунд и является одинаковым для всех приемников, следящих за конкретным спутником GPS.

2.6 Влияние часов приемника на работу системы

В структуре приемника GPS, так же как и на спутниках GPS, все отсчеты времени выполняются на основе сигналов общего генератора колебаний. Однако большинство серийных и военных приемников используют для получения эталонного сигнала кварцевый, а не рубидиевый или цезиевый стандарт. Погрешности частоты генератора приемника и нестабильность в секции синтеза частот приемника проявляются в измерении доплеровского сдвига и накопленном доплеровском сдвиге или фазе несущей. Погрешности отклонения часов приемника или смещения синхронизации и задержки на трассе распространения в приемнике от антенны до АЦП отражаются на результатах измерения псевдодальности и фазы несущей, а также на временных метках наблюдений и при определении местоположения. Если измерения выполняются одновременно для всех спутников, то во всех результатах измерений присутствуют одинаковые погрешности частоты и отклонения.

Как правило, установка времени в приемнике GPS состоит из нескольких этапов. Это базовое время называется временем приемника или местным временем. После включения в режиме "теплого" старта время приемника устанавливается на основе значений, хранящихся в энергонезависимой памяти. В зависимости от конкретного приемника вероятная точность установки времени составляет от одной секунды и выше. В режиме "холодного" старта сведения о времени отсутствуют и время старта изначально задается произвольным образом.

После расшифровки первого сообщения, содержащего эфемериды спутников, местное время может быть установлено в пределах от 1 до 10 мс на основе значения времени недели (TOW), содержащегося в навигационном сообщении. Точность установки начального времени определяет оставшееся время, которое должно быть скорректировано впоследствии. В перерыв,

соответствующий началу отсчета следующего измерения, местное время устанавливается равным TOW передачи плюс расчетное время, необходимое для прохождения сигнала во время передачи от спутника до места расположения приемника во время приема. Расчет позиции с точностью до 100 км является вполне достаточным для установки этого времени в пределах 1 мс. (Для приемника на земной поверхности время передачи охватывает диапазон от примерно 67 мс для спутникового передатчика GPS, находящегося непосредственно над головой, до примерно 85 мс для передатчика, находящегося у горизонта.)

Как только значение местного времени установлено в пределах 1 мс, отклонение часов рассчитывается в процессе обработки данных в рамках прикладных задач. В некоторых приемниках отклонение фиксируется способом, получившим название "коррекция бумажных часов". Это означает, что для уменьшения отклонения часов физическая настройка не применяется, но значение контролируется и включается в отчет. В некоторых приемниках для компенсации отклонения часов настраивается синхронизация времени измерений таким образом, с тем чтобы измерения фактически проводились в односекундные периоды отсчета времени GPS. Это особенно важно для геодезических приемников, где результаты измерений, полученные от нескольких приемников, координируются для достижения высокой точности кинематического или статического относительного позиционирования. И наконец, в некоторых приемниках не настраивается фактическое время проведения измерений, а корректируются заявленные временные метки и результаты измерения отклонений.

2.6.1 Часы навигационного приемника

Для большинства применений в области навигации фактическое отклонение часов не имеет существенного значения. Синхронизация измерений с периодами отсчета времени GPS необходима только в том случае, если должна выполняться координация с результатами измерений других приемников, и даже в этом случае она является критичной только для применений, требующих точности от сантиметра до миллиметра. Точная фиксация времени при проведении измерений и в навигации важна для быстро движущихся платформ, таких как скоростные воздушные суда и спутники. Одним из нюансов системы отсчета времени для спутников на околоземной орбите является то, что погрешность фиксации времени в 1 мс приводит к ошибкам позиционирования в направлении трассы порядка 7 м. Ошибки позиционирования в несколько метров также возможны при аналогичных погрешностях фиксации времени на других платформах, обладающих высокой динамикой.

Отклонения псевдодальности и погрешности частоты, являющиеся результатом отклонений часов приемника, могут быть достоверно скорректированы в рамках системы навигационного позиционирования и измерения скорости. Как правило, эти значения не представляют интерес для навигационных применений. В относительной навигации и исследовательских применениях популярным методом является использование двойного дифференцирования фазы несущей [Misra and Enge, 2001]. Этот метод заключается в удалении параметра отклонения часов из расчетов путем дифференцирования пар результатов одновременных наблюдений от двух приемников и двух спутников. Если значения корреляции измерений обрабатываются должным образом, то результаты по точкам двойного дифференцирования эквивалентны результатам по относительным позициям, в которых корректируются показания часов.

2.6.2 Часы приемника синхронизации

2.6.2.1 Соображения, связанные с теорией относительности

В приемниках, специально разработанных для передачи сигналов времени, внутренним генератором колебаний, как правило, пренебрегают в пользу входного сигнала от внешнего опорного генератора и эталонного сигнала с частотой один импульс в секунду (1 PPS). Для корректировки частоты и ошибок синхронизации спутниковых часов GPS необходимо применять релятивистские поправки. Аналогичные релятивистские эффекты наблюдаются на часах приемника в случае высокочастотных платформ. Эти сдвиги являются общими для всех измерений, поэтому они не влияют на точность навигационных расчетов. При передаче сигналов времени на быстро движущиеся платформы релятивистские сдвиги эталонного генератора должны быть скомпенсированы.

2.6.2.2 Поправки "бумажных часов"

Как упоминалось выше, большинство приемников GPS не изменяют свою внутреннюю систему отсчета времени для коррекции расчетных погрешностей часов. Эти погрешности оцениваются и обозначаются как поправки "бумажных часов". В ряде случаев такие поправки применяются к отображаемым и передаваемым значениям времени, а также к передаваемым результатам измерений.

2.6.2.3 Скорректированные выходные сигналы часов. Частота и 1 PPS

В приемнике синхронизации, необходимом для вывода скорректированной частоты и сигнала 1 PPS, при формировании этих синхронизированных выходных сигналов должны применяться внутренние поправки часов. Такие поправки могут производиться при помощи настройки контура обратной связи внутреннего генератора или секции синтеза частоты приемника либо путем использования контура без обратной связи для генерации скорректированных сигналов. Если коррекция выполняется в контуре с обратной связью, то управление должно применяться таким образом, чтобы не нарушить функции отслеживания сигнала.

2.7 Определение и поддержка синхронизации

Основой всех измерений GPS является так называемое время GPS (GPST). GPST – это непрерывная база времени, началом которой является точка отсчета времени GPS – 00:00, 6 января 1980 года UTC. GPST относится к международной шкале времени – Всемирному координированному времени (UTC) в форме UTC (USNO) [ICD-GPS-202B Navstar, 2001]. Однако в отличие от шкалы времени UTC, в GPST не применяются интервалы дополнительной секунды, поэтому оно постоянно уходит от UTC со смещением, составляющим в настоящее время 14 с. Управляющий сегмент отвечает за поддержку GPST на основе данных, полученных от USNO, а также за контроль параметров синхронизации каждого спутника GPS. Спутниковые передачи привязаны к GPST, и путем использования измерений параметров спутников GPS приемник может подключить свое местное время к GPST, а затем к UTC (USNO).

2.7.1 Действия, выполняемые управляющим сегментом

С 17 июня 1990 года время GPST определяется комбинацией или совокупностью атомных стандартов частоты на главной станции управления (MCS), станциях контроля GPS и часах на борту спутников. Фактическое время GPST физически не поддерживается ни одними часами в составе системы. Оно вычисляется косвенным образом при помощи фильтра Калмана, действующего в рамках анализа и функции прогнозирования MCS. Результаты измерений, полученные при помощи отдельных стандартов частоты, взвешиваются в соответствии с их стабильностью в течение интервала оценки.

Таким образом, время GPST является средневзвешенной величиной совокупности показателей атомных часов. Поправки "бумажных часов" для каждого стандарта частоты также вычисляются на основе поправок спутниковых часов GPS, формируя основу для параметров, передаваемых в широкоэвещательном сообщении.

Станция MCS использует результаты измерений, полученные от станций контроля, для расчета орбит и часов спутников GPS, погрешностей часов на станциях контроля и других параметров. Блок оценки MCS разбивает результаты измерений и информацию о состоянии, подлежащие оценке, на несколько разделов, в каждом из которых обрабатываются данные одного подмножества спутников GPS и всех станций контроля. Разбивка на разделы возникла вследствие ограниченной вычислительной мощности первых поколений компьютеров MCS, однако в настоящее время она по-прежнему применяется в целях снижения вычислительной нагрузки и упрощения локализации проблем отдельных спутников [Hutsell, 1994]. Каждый раздел включает информацию о состоянии до шести спутников и пяти станций контроля GPS. Отдельный алгоритм "урегулирование несоответствий между разделами" настраивает состояния станций MS для обеспечения согласованности этих разделов.

Показатель "общее среднее" по всем разделам предоставляет MCS наилучшие оценки отклонений часов станций контроля и спутников от GPST.

Военно-морская обсерватория США (USNO) отвечает за поддержку эталона физического времени для Министерства обороны США. UTC (USNO) представляет собой отображение UTC в реальном времени для Министерства обороны США. USNO также обслуживает альтернативные основные часы USNO (USNO/AMC) станции MCS GPS на базе ВВС США в Шривере.

USNO контролирует службу стандартного определения местоположения (SPS) и передачи PPS спутников GPS, используя специализированные приемники синхронизации, расположенные в Вашингтоне, округ Колумбия. Результаты измерений собираются от отдельных спутников с 6-секундными интервалами на траектории движения длительностью 13 мин. Траектории движения всех спутников используются в целях формирования двухдневного линейного приближения для оценки параметров коррекции, a_0 и a_1 , GPS-UTC (USNO). Среднеквадратическое значение для траекторий движения длительностью 13 мин составляет порядка 15–20 нс. Результаты наблюдения отдельных спутников и линейные расчеты отправляются на станцию MCS и вводятся в программное обеспечение MCS вручную, для того чтобы обеспечить закрытость системы GPS без поступления внешних входных данных.

2.7.2 Управление отсчетом времени GPS

В интерфейсном контрольном документе содержится требование о поддержке GPST в пределах ± 1 мкс UTC (USNO) за исключением смещений на дополнительную секунду [ICD-GPS-202B Navstar, 2001]. Таким образом, для соблюдения данного требования время GPST регулируется в целях приведения в соответствие с UTC (USNO). Управление осуществляется при помощи анализа ежедневных расчетов отклонения GPS-UTC (USNO) и определения необходимости управления в течение следующего дня для поддержания значения смещения GPS-UTC (USNO) в рамках технических условий.

Управление отсчетом времени заключается в установке положительного или отрицательного фиксированного ухода смещения в GPST на один день. До 18 марта 1994 года использовалось фиксированное значение ухода, равное $\pm 2 \times 10^{-19}$ с/с², а после этой даты используется значение, равное $\pm 1 \times 10^{-19}$ с/с². Управление осуществляется путем изменения широкоэмитательных поправок спутниковых часов и корректировок GPS-UTC и является прозрачным для пользователей [Hutsell, 1994]. Если применялось управление, в котором не было необходимости, то пользователи GPS обнаружат это в виде нестабильности GPST.

Ссылки

- HUTSELL S.T. [Sep 20-23, 1994] Recent MCS Improvements to GPS Timing. Proc. ION GPS-94, Salt Lake City, UT, p. 261-273.
- KAPLAN E.D. and HEGARTY C.J., Editors [2006] Understanding GPS: Principles and applications. 2ed., Artech House, Inc., 685 Canton Street, Norwood, MA 02062.
- LARSON K.M., *et al.* [March 2000] Assessment of GPS Carrier-Phase Stability for Time-Transfer Applications. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 47, 2, p. 484-494.
- LARSON K.M., and LEVINE, J. [July 1999] Carrier-Phase Time Transfer, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 46, 4, p. 1001-1012.
- MISRA P. and ENGE P. [2001] Global Positioning System – Signals, Measurements, and Performance, Ganga-Jamuna Press.
- Naval Observatory Time Transfer Interfaces ICD-GPS-202B [31 October, 2001] Navstar GPS Control Segment/U.S.
- Navstar Global Positioning System Interface Specification IS-200 rev D [2006] Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces, IRN-200D-001, ARINC Engineering Services, LLC, El Segundo, CA 90245.
- PARKINSON B.W., *et al.*, Editors [1996] Global Positioning System: Theory and Applications, AIAA Press.

ГЛАВА 3

СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И КОРРЕКЦИИ GPS

	<i>Стр.</i>
3.1 Введение.....	24
3.2 Описание системы SBAS.....	24
3.3 Описание системы WAAS (Соединенные Штаты Америки).....	24
3.4 Описание системы MSAS (Япония)	26
3.4.1 Обзор	26
3.4.2 Функция двойного кода псевдослучайного шума	27
3.4.3 Регулирование мощности на линии вверх.....	28
3.5 Описание системы EGNOS (Европа)	28
3.5.1 Обзор наземного сегмента EGNOS	29
3.5.2 Обзор характеристик системы EGNOS, связанных с измерением времени.....	29
3.5.3 Синхронизация часов на станциях RIMS и генерация сигналов ENT	29
3.5.4 Привязка ENT ко времени GPS	30
3.5.5 Поправки спутниковых часов	31
3.5.6 Широковещательная передача ENT через спутники на геостационарной орбите Земли (GEO).....	31
3.5.7 Расчет разности между шкалами времени ENT и UTC	31
3.5.8 SBAS и время.....	32
3.5.9 Время и GEO.....	34
3.5.10 SBAS и передача сигналов времени.....	42
3.5.11 Передача сигналов времени между двумя лабораториями.....	43
3.5.12 Передача сигналов времени между двумя системами SBAS.....	44
Ссылки	47
Дополнение А	48

3.1 Введение

В историческом плане системы навигации всегда зависели от времени. Одним из наглядных примеров стало плавание в 1761 году корабля Ее Величества "Deptford" с хронометром Гаррисона на борту, которое доказало, что при помощи данного инструмента мореплаватели смогли впервые точно и достоверно определить долготу. Взаимосвязь между навигацией и временем стала причиной неослабевающего интереса хронометристов к использованию систем навигации для распространения сигналов времени. И в наши дни высокоразвитые технологии в часовой индустрии являются сердцем системы GPS. В отличие от навигаторов, определяющих свое местоположение по четырем спутникам GPS, специалистам по измерению времени, местоположение которых известно, для определения времени достаточно лишь одного спутника. Результаты наблюдений, полученные с единственного спутника, позволяют специалистам по измерению времени выполнять удаленную синхронизацию часов по всему миру.

3.2 Описание системы SBAS

Спутниковые системы контроля и коррекции (SBAS) являются одной из последних разработок в плане развития навигационных систем. Хотя по принципу действия системы SBAS схожи с дифференциальными системами GPS, они предоставляют национальным руководящим структурам гражданской авиации и воздушной навигации значительно более высокий уровень эксплуатационных характеристик по сравнению с другими дифференциальными системами GPS (DGPS). Методы контроля и коррекции, используемые системами SBAS, позволяют обеспечить не только повышенную точность, но и улучшить показатели готовности, целостности и непрерывности предоставления услуг. Эти параметры обеспечиваются путем непрерывного контроля сигналов GPS, передаваемых с наземных опорных станций, и при помощи корректирующего сообщения, передаваемого с геостационарных спутников связи (GEO). Сигнал со спутника GEO при использовании той же частоты, что и L1 GPS, отличается по формату и скорости передачи битов.

Содержание сообщения, передаваемого со спутника GEO, предоставляет пользователю информацию, которая позволяет не только уточнить его местоположение, определяемое по сигналам GPS, но также предоставляет данные о достоверности этой информации. Сигнал со спутника GEO может также использоваться в качестве дополнительного средства измерения дальности для целей навигации. Однако для этого поступающие сигналы должны быть синхронизированы со временем GPS.

Таким образом, сигналы, получаемые со спутника GEO, могут также использоваться для распространения и передачи сигналов времени. Проводимые в настоящее время исследования по применению SBAS в целях синхронизации показывают, что эти системы уже работают на уровне систем точного определения местоположения GPS (PPS). Можно не без основания надеяться на повышение уровня точности и достоверности по мере развития данных систем.

3.3 Описание системы WAAS (Соединенные Штаты Америки)

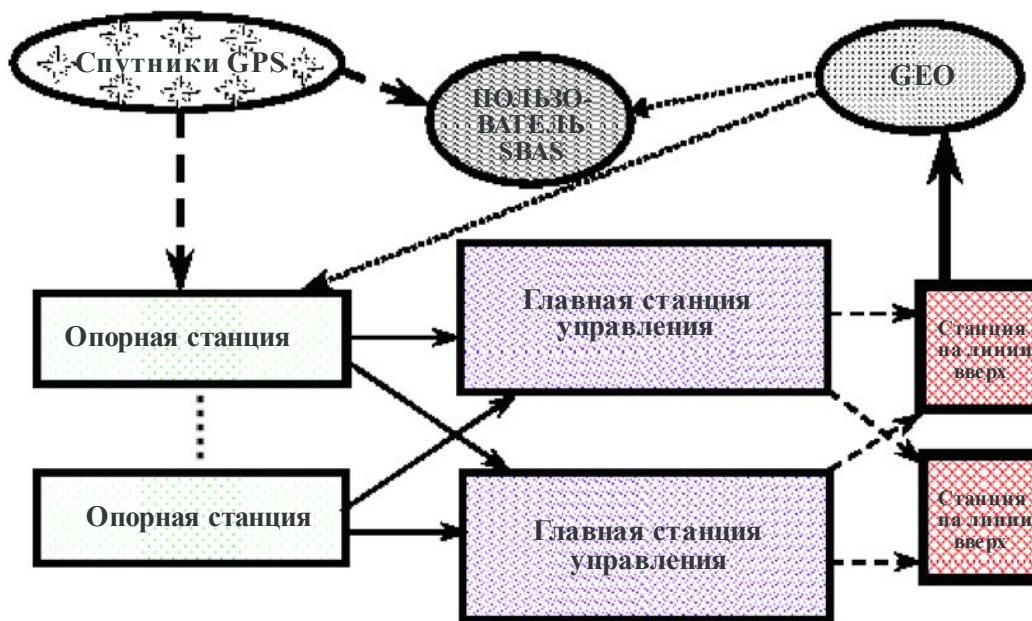
На Рисунке 3-1 схематически изображен процесс работы широкозонной системы контроля и коррекции (WAAS). Основным блоком системы является опорная станция WAAS (WRS). На опорной станции расположено оборудование, включающее резервные цезиевые лучевые эталоны частоты или другие виды атомных часов, несколько 12-канальных двухчастотных приемников WAAS/GPS и специализированные широко- и узкополосные GPS-приемники слежения за фазой. Каждая опорная станция в непрерывном режиме осуществляет слежение за несколькими спутниками GPS и GEO, которые она способна наблюдать и принимать от них сигналы.

Каждая станция WRS выполняет функции сбора данных, проверки их целесообразности, а также обработки, записи и передачи данных. На каждой станции WRS размещен тройной резервный комплект оборудования широкозонной опорной станции (WRE), смонтированный на стойке. Задачей этого оборудования является сбор независимых наборов данных, включая наблюдаемые параметры спутников GPS и наблюдаемые параметры спутников GEO, а также передача данных на все основные станции WAAS (WMS), входящие в состав системы. Независимость наборов данных обеспечивается получением наблюдаемых параметров при помощи независимых комплектов аппаратуры, которые

необходимы для поддержания функции проверки данных, выполняемой станцией WMS. Частота сбора этих данных зависит от ожидаемого уровня их изменений, т. е. при медленном изменении погодных условий сбор данных может производиться не так часто, как со спутников GPS. Перед отправкой информации на станции WMS проверяется целесообразность собранных данных на оборудовании WRE. Данные, не прошедшие проверку, получают соответствующие метки, а затем перенаправляются на станции WMS. Для обеспечения готовности данных на станциях WMS каждая станция WRS передает данные на каждую станцию WMS через два независимых базовых узла наземной подсистемы связи (TCS).

РИСУНОК 3-1

Простой высокоуровневый обзор системы SBAS



Sat_time_freq-03-01

Каждая из станций WMS выполняет функции обработки поправок, определения орбиты спутника, определения целостности, верификации, подтверждения правильности и формирования сообщения WAAS. Один раз в секунду станция WMS собирает данные, полученные от всех станций WRS, и обрабатывает их в целях поддержки вышеперечисленных функций. Подобной обработке подвергаются все доступные данные WRS, в результате чего раз в секунду производится передача форматированного 250-битового сообщения WAAS. Эти сообщения WAAS отправляются на все геостационарные подсистемы линии вверх (GUS).

Синхронизация обработки на станциях WMS планируется таким образом, чтобы обеспечить широкополосную передачу сообщения WAAS от спутника GEO одновременно с началом периода отсчета следующего односекундного легко распознаваемого (C/A) кода GPS [Peck *et al.*, 1997]. Система WAAS подтверждает правильность сигнала в космосе (SIS) путем проверки сообщений на линии вниз для обеспечения их идентичности сообщениям, передаваемым на спутники GEO, и путем сравнения результатов навигационного определения местоположения в системе WAAS/GPS с результатами измерений местоположения с помощью станции WRS. На каждой станции WMS установлена консоль управления и обслуживания (O & M), с которой через интерфейс "человек-компьютер" может осуществляться управление системой WAAS. Во избежание конфликтов только

одна станция WMS в рамках системы WAAS может быть назначена управляющей станцией WMS (с активной консолью O & M) в любой момент времени.

Геостационарная система связи (GCS) выполняет функции широковещательных передач и измерения дальности. Каждая система GCS WAAS состоит из подсистемы двух генераторов сигналов (SGS), двух подсистем линии вверх на РЧ (RFU) и одного спутника на геостационарной околоземной орбите (GEO). В совокупности SGS и RFU образуют GEO-станцию на линии вверх (GUS). Функция широковещательной передачи GCS начинается с приема 250-битовых форматированных сообщений WAAS один раз в секунду от каждой из станций WMS, входящих в состав системы. В целях повышения готовности сообщений WAAS каждая станция GUS подключается к двум опорным узлам WAAS в подсистеме TCS. Станция GUS выбирает одну станцию WMS в качестве своего источника сообщений и шифрует принятое сообщение при помощи сверточного кода с упреждающей коррекцией ошибок со скоростью $1/2$. Полученное в результате 500-битовое сообщение модулируется сигналом типа GPS и передается на спутник GEO. Каждый спутник GEO обслуживается двумя станциями GUS:

- одна из них работает в качестве первичной линии вверх; а
- другая – в качестве станции "горячего" резерва.

Две станции GUS, обслуживающие спутник GEO, функционально независимы и расположены на географически разнесенных наземных станциях (GES), находящихся на расстоянии не менее 300 миль друг от друга. Станция GES – это объект, состоящий из одной или нескольких станций GUS и предоставляющий для них помещение, электропитание, а также оперативно-производственное и техническое обслуживание. Прямой ретранслятор типа "прямая дыра" спутника GEO смещает частоту сигнала и передает его пользователям системы WAAS. Переход между основной и резервной станциями GUS производится по необходимости для поддержания готовности космического сигнала WAAS.

Система GCS выполняет функцию измерения дальности путем передачи сигнала пользователям на частоте L1 GPS со следующими данными:

- 1) точно синхронизированный псевдослучайный шумовой (PRN) код, который присваивается каждому спутнику GEO;
- 2) точная эфемерида, которая содержится в навигационном сообщении спутника GEO, периодически отправляемом в режиме широковещательной передачи.

Структура этого сигнала формируется аналогично структуре сигнала GPS, за исключением того, что точная синхронизация кода PRN выполняется на Земле, а не на спутниках GEO. Данная функция позволяет пользователям использовать спутники GEO в качестве дополнительных спутников GPS, что приводит к повышению общей готовности системы.

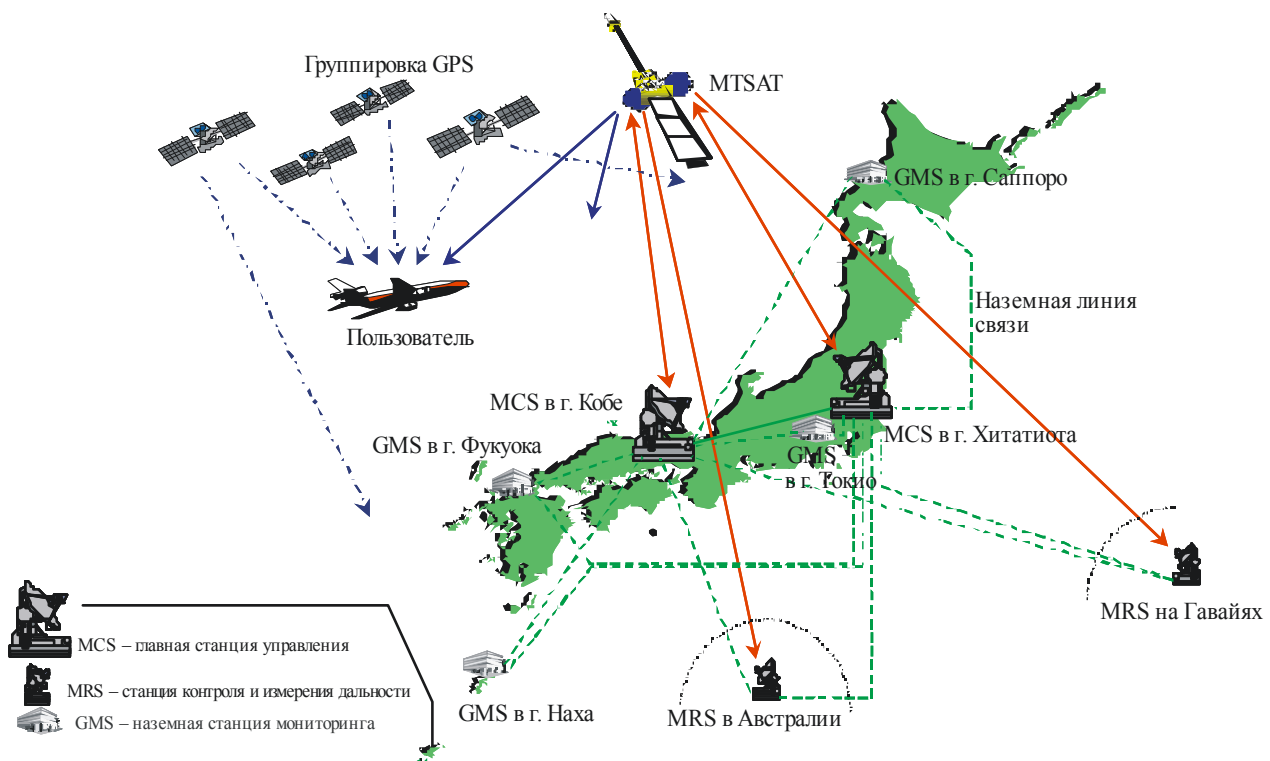
3.4 Описание системы MSAS (Япония)

3.4.1 Обзор

Конфигурация MSAS – спутниковой системы контроля и коррекции на базе многофункциональных транспортных спутников (MTSAT) – показана на Рисунке 3-2. Данные со спутников GPS принимаются наземными станциями контроля (GMS), расположенными в четырех пунктах на территории Японии: Саппоро, Токио, Фукуока и Наха. Данные со спутника GPS и сигнал геостационарного спутника MTSAT также принимаются станциями контроля и измерения дальности (MRS), расположенными в других четырех местах – Кобе, Хитатиота, Гавайи и Австралия. Полученные данные отправляются на главные станции управления (MCS), расположенные в двух пунктах на территории Японии – Кобе и Хитатиота.

РИСУНОК 3-2

Конфигурация системы MSAS



Sat_time_freq-03-02

На станции MCS подсистема центрального пункта обработки данных (CPF) производит расчет поправок для спутников и точек ионосферной сетки (IGP), предварительно заданных в MSAS, а также осуществляет контроль целостности данных. Сетевое время MSAS (MNT), которое является внутренним сетевым временем системы MSAS, поддерживается таким образом, чтобы его отклонение от времени GPS находилось в заданных пределах. Подсистема навигационных земных станций (NES) формирует сообщения MSAS, используя данные, полученные от CPF, и модулирует их в диапазоне Ku. Сообщения MSAS усиливаются мощным усилителем (HPA) и передаются на спутник MTSAT от совмещенной наземной земной станции (GES). Кроме того, связь между наземными средствами поддерживается сетевыми подсистемами связи (NCS).

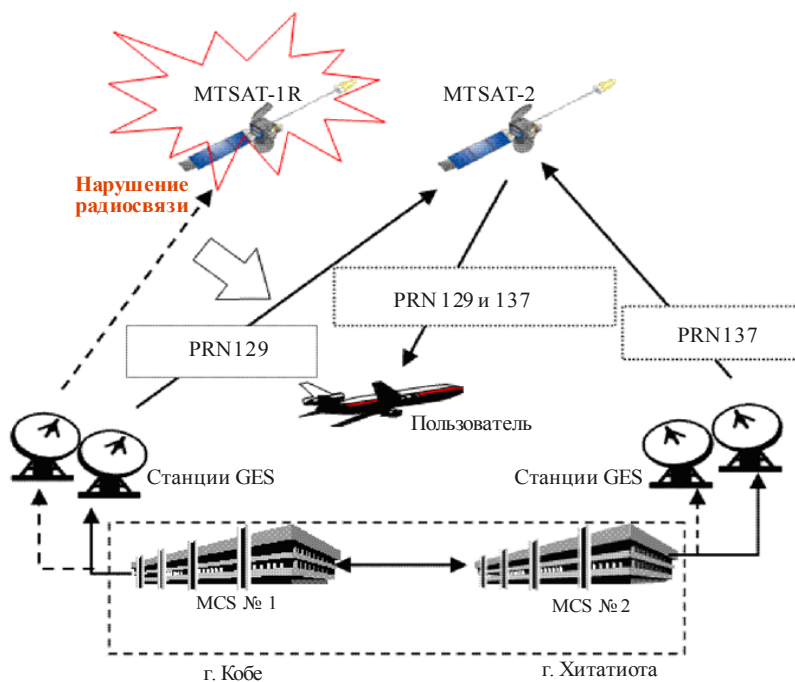
Наземные средства MSAS и система WAAS имеют много общих функций. С другой стороны, система MSAS обладает собственными характеристиками, т. е. функцией двойного кода PRN, позволяющей работать с двумя видами кода PRN для одного геостационарного спутника, и функцией регулирования мощности на линии вверх (UPC) в целях компенсации затухания в дожде в диапазоне Ku.

3.4.2 Функция двойного кода псевдослучайного шума

Система MSAS, как правило, работает с двумя геостационарными спутниками MTSAT (MTSAT-1R, MTSAT-2), как показано на Рисунке 3-3. Разные коды псевдослучайного шума (PRN) по отдельности передаются на два спутника MTSAT. Даже в том случае, если ни одна из станций MCS недоступна по причине неисправности наземного оборудования или в связи с сильным дождем, один из кодов PRN продолжает рассылаться пользователям, поскольку пользователи способны принимать более двух каналов с сигналами от геостационарных спутников MTSAT, чтобы предотвратить ухудшение показателей непрерывности и готовности. В случае отказа одного из геостационарных спутников MTSAT система MSAS может переключиться в режим работы с использованием двойного кода PRN.

РИСУНОК 3-3

Работа с использованием двойственной функции PRN



Sat_time_freq-03-03

В режиме двойного кода PRN с двух станций MCS на один геостационарный спутник передаются различные коды PRN. Прерывание функционирования линии вверх из-за затухания в дожде является незначительным фактором, способствующим ухудшению показателя непрерывности MSAS. В режиме двойного кода PRN, даже если затухание в диапазоне Ku из-за сильного дождя превышает величину компенсации путем UPC на одной из станций MCS, работа продолжается при помощи кода PRN, передаваемого от другой станции MCS, при этом никакой коммутации между станциями MCS не требуется.

3.4.3 Регулирование мощности на линии вверх

Во время дождя станция MSAS управляет мощностью на линии вверх при помощи регулировки по замкнутой цепи для компенсации затухания сигнала в дожде на линии вверх в диапазоне Ku в целях стабилизации линии связи между геостационарными спутниками MTSAT и станциями GES. При регулировании мощности на линии вверх (UPC) используются данные $L1-C/N_0$ геостационарных спутников MTSAT, полученные приемником UPC, установленным в мощном усилителе (HPA). Регулировка по замкнутой цепи осуществляется путем управления аттенуатором, расположенным в HPA, на основе измеренного значения $L1-C/N_0$ и предварительно заданного требуемого значения C/N_0 .

Кроме того, для осуществления управления используется также значение C/N_0 в диапазоне Ku.

3.5 Описание системы EGNOS (Европа)

Система EGNOS состоит из четырех сегментов: наземного сегмента, космического сегмента, пользовательского сегмента и средств технического обслуживания, аналогично сегментам, указанным в описании систем WAAS и MSAS.

- 1 Космический сегмент системы EGNOS состоит из ретрансляторов, расположенных на борту спутников GEO.

- 2 Пользовательский сегмент системы EGNOS состоит из стандартных приемников GNSS, разработанных в соответствии со стандартом RTCA MOPS DO-229.
- 3 Сегмент технического обслуживания системы EGNOS включает ряд средств, необходимых для поддержки развития, функционирования и квалификационных испытаний системы.

Наконец, наземный сегмент системы EGNOS описывается в п. 3.5.1.

3.5.1 Обзор наземного сегмента EGNOS

Наземный сегмент системы EGNOS состоит из станций измерения дальности и контроля целостности (RIMS), подключенных к комплекту резервных средств управления и обработки данных, который называется центром управления полетами (ЦУП). ЦУП определяет целостность данных, эфемериды и дифференциальные поправки часов для каждого из наблюдаемых спутников, ионосферные задержки, а также формирует эфемериды спутников GEO. Эта информация отправляется в виде сообщения на наземную сухопутную навигационную станцию (NLES), а затем передается по линии вверх вместе с сигналом измерения дальности GEO на спутники GEO. Спутники GEO передают данные по линии вниз на частоте Link 1 (L1) GPS со схемой модуляции и кодирования, аналогичной такой схеме в системе GPS. Все компоненты наземного сегмента подключены к широкозонной сети связи EGNOS (EWAN).

3.5.2 Обзор характеристик системы EGNOS, связанных с измерением времени

В следующих разделах в соответствии с требованиями представлены описания каждой из функций времени и ожидаемые характеристики на основе анализа и экспериментальных данных.

Как GPS, так и ГЛОНАСС используют разность времени между моментами прихода сигналов (TDOA) в качестве основы для проведения измерений расстояния от приемника до спутника. Следовательно, используемые значения точности часов приемника и спутника напрямую влияют на достижимую точность измерений дальности. Спутники, как GPS, так и ГЛОНАСС, предоставляют информацию при помощи широкоэмитательных навигационных сообщений, которые дают возможность пользователям системы корректировать ошибки спутниковых часов, т. е. смещение показаний отдельных спутниковых часов относительно номинальной шкалы времени спутниковой системы. Точность этих поправок находится в пределах нескольких наносекунд.

Однако в случае системы GPS эти поправки не учитывают дитеринг (введение псевдослучайного шума) для получения избирательной доступности (SA), и до тех пор пока они не будут оценены и проблема не будет снята, характеристики определения местоположения пользователя будут снижены. Кроме того, для приложений с высоким уровнем интеграции желательно производить независимые оценки погрешностей спутниковых часов, для того чтобы отслеживать поправки широкоэмитательной передачи.

Для выполнения точных вычислений погрешностей спутниковых часов и распространения их среди пользователей система EGNOS осуществляет три базовые функции часов на оборудовании, расположенном в центре обработки данных:

- синхронизацию часов RIMS и генерацию сигналов сетевого времени EGNOS (ENT);
- привязку ENT ко времени GPS;
- определение смещений в показаниях спутниковых часов относительно ENT.

Вычисление разности между ENT и UTC.

3.5.3 Синхронизация часов на станциях RIMS и генерация сигналов ENT

Синхронизация часов на станциях RIMS осуществляется при помощи метода *составного сигнала синхронизации*. При использовании метода составного сигнала синхронизации сетевое время ENT определяется как неявное среднее по множеству всех показаний часов RIMS, и в процессе синхронизации формируются оценки смещения и ухода каждого отдельного часа RIMS по отношению к ENT. Эти оценки в дальнейшем могут использоваться для привязки всех результатов измерения псевдодальности RIMS к ENT. Данный процесс синхронизации необходим, для того чтобы

одновременно наблюдаемые результаты измерения псевдодалности нескольких станций RIMS могли быть объединены в рамках одной функции, которая вычисляет погрешности спутниковых часов.

Более простой альтернативный метод синхронизации – это метод *синхронизации по главным часам*, при котором назначаются одни часы станции RIMS, формирующие сетевое время, а все другие часы RIMS синхронизируются по этим часам. Метод составного сигнала синхронизации обладает двумя значительными преимуществами по сравнению с этим методом. Во-первых, метод главных часов имеет один существенный недостаток – если главные часы выходят из строя, то данные времени ENT утрачиваются. В отличие от этого в методе составного сигнала синхронизации сетевое время ENT поддерживается до тех пор, пока в комплекте имеются двое часов. Во-вторых, стабильность ENT, полученного методом главных часов, безусловно, ограничена стабильностью самих часов. При использовании метода составного сигнала синхронизации стабильность ENT равна стабильности неявного среднего по множеству всех часов RIMS. Если предположить, что множество состоит из n одинаковых независимых часов, то это дает повышение стабильности, равное \sqrt{n} . Эта последняя особенность составного сигнала синхронизации имеет важное побочное действие – повышение способности системы обнаруживать и локализовывать неисправности часов.

Алгоритм составного сигнала синхронизации выполняется при помощи фильтра Калмана. Результаты измерений, полученные при помощи данного фильтра, представляют собой линейно независимый набор *одновременных наблюдений* с минимальным начальным расхождением. Режим одновременных наблюдений для пары станций RIMS формируется путем вычитания одновременно полученных результатов измерения псевдодалности до общего спутника. Перед вычитанием значения псевдодалности подвергаются *предварительной обработке* для удаления значений геометрического расстояния от антенны RIMS до антенны спутника и уменьшения нежелательных погрешностей, в частности задержек из-за многолучевого распространения и теплового шума. Полученные в результате одновременные наблюдения представляют собой данные прямых измерений смещения часов RIMS плюс остаточные погрешности.

Состояния этого фильтра представляют собой значения смещения и ухода часов на каждой станции RIMS по отношению к гипотетической *идеальной* шкале времени. Следствием данной формулировки является то, что при помощи фильтра рассчитываются значения смещения и ухода по отношению к *неявному* средневзвешенному значению показаний всех часов RIMS. Это неявное среднее по множеству, в сущности, задает шкалу времени ENT системы EGNOS. Относительное взвешивание показаний часов, используемое в фильтре, зависит от нескольких факторов, однако в значительной степени определяется моделями шума при обработке сигнала, связанными с каждым часами. Эти модели характеризуют стабильность часов RIMS.

Поскольку для фильтра доступны только измерения разности показаний часов, модель фильтра имеет не поддающиеся наблюдению компоненты, которые приводят к тенденциям длительного роста в ковариационных матрицах ошибок состояния. Для устранения этих тенденций должны быть приняты специальные меры. В противном случае они приведут к числовой нестабильности внутри фильтра. Можно показать, что при удалении из ковариационной матрицы динамики длительного роста, связанной с наличием не поддающихся наблюдению компонентов модели системы, результирующая ковариантность описывает ошибки в оценках состояний фильтра по отношению к неявному среднему по множеству, а не к идеальной шкале времени.

3.5.4 Привязка ENT ко времени GPS

Для того чтобы ограничить динамический диапазон поправок спутниковых часов, тем самым уменьшая размер сообщений часов WAD и повышая эффективность процесса распространения сообщений, необходимо привязать время ENT к шкале времени GPS. Привязка ENT к временной шкале GPS выполняется при помощи низкочастотного цифрового фильтра второго порядка. Входной сигнал привязки представляет собой мгновенный расчет смещения по шкале времени ENT-GPS. Он вычисляется на основе оценочных значений смещения спутниковых часов относительно ENT и поправок широкопередаточной передачи сигналов спутниковых часов GPS, которые вычисляются по значениям смещения спутниковых часов относительно шкалы времени GPS. Частота среза

фильтра выбирается таким образом, чтобы обеспечить наиболее эффективное снижение избирательной доступности (SA), избегая при этом значительных задержек, связанных с относительным уходом ENT относительно шкалы времени GPS. Чем стабильнее ENT, тем ниже может быть установлена частота среза, и тем больше снижается SA.

Базовый вариант системы EGNOS вполне удовлетворяет требованию, согласно которому привязка к шкале времени ENT–GPS должна составлять не более 50 нс. Исследование всех вариантов с цезиевыми часами показало, что можно добиться точности привязки <3 нс. К этим результатам следует относиться критически, так как они базируются на наборах смоделированных данных и идеальных моделях часов SA и RIMS. Тем не менее эти результаты согласуются с другими выводами, такими как упомянутые в [Benedicto *et al.*, 1998].

Точность привязки <3 нс позволяет автономно синхронизировать значения ENT, полученные от различных CPF, при этом наличия специальной функции синхронизации ENT-A – ENT-B не требуется. Однако если эта функция необходима, эксперименты, проведенные с реальными и смоделированными данными, показывают, что синхронизация различных ENT может без затруднений выполняться с точностью, превышающей 3 нс (2σ). Данное системное требование введено, для того чтобы переключения с одного CPF на другой были прозрачными для пользователей EGNOS.

3.5.5 Поправки спутниковых часов

Поправки и частота корректировки спутниковых часов вычисляются при помощи всех доступных результатов измерений псевдодальности и доплеровского сдвига, выполненных функцией предварительной обработки. Результаты измерений привязываются к ENT при помощи параметров синхронизации RIMS, а затем группируются по спутникам. Для каждого спутника методом взвешенных наименьших квадратов выполняются оценки смещения часов и скорости изменения по отношению к ENT. Затем значения смещения разделяются путем низкочастотной фильтрации, аналогичной той, которая используется в функции привязки ENT, на медленные и быстрые компоненты, из которых формируются корректирующие сообщения спутниковых часов. Оценки скорости изменения используются для проектирования поправок на будущее с учетом ожидаемых задержек в системе.

3.5.6 Широковещательная передача ENT через спутники на геостационарной орбите Земли (GEO)

Быстрые и медленные поправки спутниковых часов распространяются среди пользователей EGNOS в виде отдельных сообщений при помощи спутника GEO. Приемник пользователя EGNOS расшифровывает полученные сообщения, восстанавливает комбинированные смещения спутниковых часов от ENT для каждого отслеживаемого им спутника и применяет их к имеющимся значениям псевдодальности наряду с другими поправками WAD, предоставленными системой EGNOS. Таким образом, в пользовательском навигационном оборудовании шкала времени ENT заменяет шкалу времени GPS или ГЛОНАСС. В результате приемник не только выполняет более точную оценку местоположения на основе поправок WAD, но также вычисляет смещение внутренних часов относительно времени ENT.

Значения ENT по мере их получения на наземных станциях должны в точности передаваться на борт спутников GEO. В действительности время GEO определяется на выходе бортовой аппаратуры спутника GEO, точно в центре фазы антенны L1. Данная функция осуществляется при помощи сервомеханизма под названием Long Loop (длинная петля), принцип действия которого основан на практически полной симметрии между линиями вверх и вниз, связывающими станцию NLES и спутник GEO.

3.5.7 Расчет разности между шкалами времени ENT и UTC

Поскольку UTC представляет собой теоретическое среднее значение показаний множества часов по всему миру, то невозможно установить прямую связь между ENT и UTC. Вместо этого необходимо использовать физические часы, при помощи которых формируется UTC.

Таким образом, разница во времени между ENT и UTC может быть разбита на два выражения:

$$\text{ENT} - \text{UTC} = [\text{ENT} - \text{UTC}(k)] + [\text{UTC}(k) - \text{UTC}], \quad (3-1)$$

где:

k обозначает какую-либо европейскую лабораторию, участвующую в формировании UTC.

3.5.7.1 UTC(k) – UTC

Значения разницы во времени ($\text{UTC} - \text{UTC}(k)$) ежемесячно предоставляются ВРМ посредством Циркуляра Т и не входят в сферу применения системы EGNOS.

Разница во времени ($\text{UTC} - \text{UTC}(k)$) определяется следующими характеристиками:

- IUT и CCDS рекомендуют удерживать ($\text{UTC} - \text{UTC}(k)$) в пределах 100 нс (1σ);
- расчетная погрешность для разницы во времени ($\text{UTC} - \text{UTC}(k)$) в настоящее время находится на уровне 10 нс (1σ) и в Циркуляре Т включена в отложенное время;
- расчетная погрешность прогнозируемой разницы во времени ($\text{UTC} - \text{UTC}(k)$) зависит от периода прогнозирования и может находиться в диапазоне 20 нс (1σ).

3.5.7.2 ENT – UTC(k)

В целях синхронизации ENT и UTC (OP) станция EGNOS RIMS будет совмещена с лабораторией SYRTE, расположенной в Парижской обсерватории. Это позволяет физически подключить станцию к атомным часам лаборатории (при помощи интерфейсов на уровнях 10 МГц и 1 импульс в секунду). Модуль синхронизации EGNOS RIMS будет выполнять непосредственный расчет разницы во времени между ENT и RIMS (OP) с погрешностью менее 3 нс (2σ). Разница во времени будет передаваться в широкоэвещательном сообщении типа 12 с вышеуказанной погрешностью. Краткое описание содержания сообщений SBAS, передаваемых геостационарным спутником SBAS, приведено в Дополнении А.

3.5.8 SBAS и время

Основным преимуществом применения SBAS в хронометрии является то, что эта система использует геостационарный спутник в качестве дополнительного средства измерения дальности для GPS. Характеристики SBAS задаются таким образом, чтобы разница во времени прихода сигналов, поступающих со спутника GEO, и времени GPS составляла менее 50 нс. Поскольку спутник GEO всегда находится в одной точке небесной сферы, для слежения за спутником хронометрическая лаборатория может применять остронаправленную антенну, например рупорный облучатель или параболическую антенну. Использование подобных антенн позволяет увеличить отношение сигнал/шум, а также способствует уменьшению эффекта многолучевости. Применение подобных антенн способствует также снижению помех. Кроме того, можно осуществлять непрерывное слежение за спутником GEO в вечернее время, при минимальной ионосферной активности, особенно в регионах на средних широтах, где мерцания минимальны.

Существует множество различных видов хронометрических исследований, в которых может использоваться система SBAS. К ним относятся эксперименты по калибровке, уменьшению эффекта многолучевости, сравнительные эксперименты между различными хронометрическими лабораториями и между различными системами SBAS.

Калибровка или измерение задержек в системе является предметом особого внимания в хронометрии. Вычисление задержки в системе отсчета времени является критически важным для точной оценки разницы между двумя отдельными часами. Эксперименты с нулевыми исходными данными [Brown, 1991] сыграли важную роль в этом процессе. Благодаря постоянной готовности система SBAS может предоставить платформу для долгосрочных измерений в этой области.

3.5.8.1 Время и опорные станции

Особое внимание в системах SBAS уделяется записи времени наблюдений. Все наблюдения выполняются на независимых опорных станциях SBAS (SRS). Для обеспечения равномерной базы времени на каждой SRS в качестве эталона используются часы на основе времени GPS.

На каждой станции SRS, как правило, имеется несколько независимых комплектов (threads), которые называются оборудованием опорной станции (RSE). Эти комплекты оборудования необходимы для обеспечения достаточного резерва, позволяющего отправлять данные на главную станцию SBAS (SMS) в случае единичной неисправности на SRS. Помимо других серийно выпускаемых компонентов (COTS) в состав RSE, как правило, входит цезиевый эталон частоты (атомные часы).

Эталон частоты, используемый в архитектуре SBAS, должен соответствовать определенным техническим характеристикам. Функциональные требования включают:

- точность;
- точность регулировки;
- стабильность;
- фазовый шум отдельной боковой полосы частот;
- время вхождения в режим.

Точность должна составлять не менее 2×10^{-12} без учета естественного износа цезиевой трубки, которая может настраиваться на определенную частоту. Эталон частоты обеспечивает наличие в приемнике каждой опорной станции опорного синусоидального сигнала с частотой 10 МГц и стабильностью как минимум 2×10^{-13} в течение 24 часов для обеспечения точного сравнения сигналов спутников GEO со временем GPS. Эталонам частоты станций SRS требуется определенный интерфейс связи для отправки запросов и настройки параметров.

Сигнал частотой 10 МГц, выдаваемый цезиевым эталоном частоты, в ряде случаев является входным сигналом приемника GPS, формирующего выходной сигнал 1 PPS, который используется в качестве элемента наблюдений. На часах приемника при запуске устанавливается время GPS. Таким образом, приемники синхронизируются приблизительно на уровне нескольких микросекунд. Выходной поток данных каждого приемника SRS содержит параметр смещения сигнала 1 PPS приемника относительно времени GPS. После этого выходной сигнал 1 PPS управляется частотой входного цезиевого генератора. В сущности выходной сигнал приемника SRS является сигналом независимого тактового генератора. Это необходимо для формирования независимой шкалы времени.

3.5.8.2 Время и главная станция

Станция SMS содержит оборудование для обработки данных, необходимое для выработки поправок, передаваемых спутником GEO, и их проверки. Она также выполняет функции эксплуатации и технического обслуживания (O & M) и имеет в своем составе часы GPS для синхронизации с GPS.

Станция SMS выполняет несколько функций. Функции, напрямую или косвенно связанные со временем, включают:

- a) определение орбит спутников GPS/GEO;
- b) контроль характеристик сигнала в космосе (SIS);
- c) генерацию сигналов SNT;
- d) подготовку сообщений с величиной смещения SNT/UTC; а также
- e) подготовку сообщений SBAS.

Данные, переданные оборудованием опорной станции для каждой SRS, отсылаются на корректирующий процессор станции SMS и производится сравнение данных, полученных от каждой SRS в отдельности. Все часы контролируются друг относительно друга, для того чтобы определить, являются ли одни из часов "недостовверными", т. е. обладают ли они значительным изменением смещения. Это является началом формирования сетевого времени SBAS (SNT), описываемого в п. 3.5.8.3.

3.5.8.3 Сетевое время SBAS

Для того чтобы сигнал SBAS дополнял навигационные сигналы GPS, сигналы, передаваемые SBAS, должны быть синхронизированы с ними, т. е. со временем GPS. Это осуществляется путем установки сетевого времени SBAS (SNT) в качестве эталонного времени для системы SBAS. SNT привязывается ко времени GPS. Результаты измерений, полученные от всех опорных станций, пересылаются станциями SRS на каждую из главных станций, где при помощи алгоритма рассчитывается независимая шкала времени на основе данных, полученных от опорных станций. Все "достоверные показания часов", включенные в результаты измерений опорных станций, которые принимаются главной станцией, используются для формирования шкалы времени SNT. Затем шкала времени привязывается к GPS по тому же алгоритму. Алгоритм SNT, в общих чертах описанный выше, реализуется на каждой из главных станций.

Сообщения SBAS содержат быстрые и медленные поправки, которые передаются спутниками GEO. Быстрые поправки должны определяться для каждого космического аппарата (КА) GPS. Это осуществляется посредством сообщения, содержащего долгосрочные поправки, которое передается при помощи широкополосной связи со спутника GEO для удаления долгосрочных показаний часов из экстраполированной быстрой поправки. Следует отметить, что все долгосрочные и быстрые поправки должны суммироваться.

Подсчитано, что одной привязки в день может быть недостаточно, для того чтобы время SNT поддерживать близким ко времени GPS. Таким образом, аппаратная привязка дополняется корректирующими сообщениями в рамках навигационных сообщений SBAS. Речь идет о сообщениях с медленными поправками (сообщение типа 9) и сообщениях с быстрыми поправками (сообщение типа 2–5), передаваемыми спутниками GEO. Медленная поправка обновляется по меньшей мере один раз в две минуты и выполняет основную часть функций коррекции. Быстрые поправки выдаются как минимум один раз в минуту.

3.5.9 Время и GEO

Роль точного времени в работе GEO будет продемонстрирована на примере использования системы WAAS. Цезиевый генератор на станции GUS синхронизируется по времени SNT. Один раз в день станция SMS выдает команды привязки часов GUS, для того чтобы уменьшить смещение относительно времени GPS. Часы GUS управляют синхронизацией навигационного сообщения WAAS, полученного от спутника GEO.

Геостационарная система связи (GCS) состоит из подсистемы генерации сигнала (SGS), RFU и геостационарного спутника. SGS посылает RFU код псевдослучайного шума (PRN) C/A плюс сигнал сообщения WAAS в качестве промежуточной частоты (ПЧ) 70 МГц. RFU конвертирует ПЧ в частоту РЧ линии вверх (6455,42 МГц), производит усиление сигнала и передает его на геостационарный спутник INMARSAT-3.

Сигнал на линии вверх в диапазоне С принимается спутником GEO и преобразуется в сигналы L1 и диапазона С на линии вниз, которые передаются в широкополосном режиме в виде лучей с правой круговой поляризацией (RHCP), охватывающих поверхность Земли, пользователям и RFU. RFU принимает сигналы L1 и диапазона С на линии вниз от геостационарного спутника INMARSAT-3. Сигналы усиливаются, а диапазон С преобразуется в L2. RFU передает сигналы L1 и L2 на станцию SGS.

Приемник GUS принимает от RFU сигналы кода PRN C/A на частотах L1 и L2. Приемник GUS измеряет показатели псевдодальности кода и фазы несущей для обоих входных сигналов. Эта информация посылается в процессоры и генератор сигналов, которые при помощи определенных алгоритмов и аппаратных средств формируют корректирующие сигналы обратной связи для времени, частоты и фазы. Процессор также осуществляет FEC-кодирование сообщения WAAS.

Эти сигналы коррекции осуществляют настройку времени, частоты и фазы сигнала кода PRN C/A для получения данных о дальности на линии вверх, скорости изменения дальности и ионосферных эффектах. Генератор сигналов также комбинирует FEC-кодированные данные в сообщении WAAS с этим откорректированным на линии вверх кодом PRN C/A, которые передаются в виде сигнала ПЧ

на RFU. Эталон частоты представляет точные и стабильные опорные частоты для всех преобразователей, генераторов сигналов и приемников на RFU и SGS.

Смещение частоты выходного сигнала 5 и 10 МГц должно регулироваться в диапазоне $\pm 1 \times 10^{-9}$. Требование о возможности регулирования применимо только к эталону частоты на SGS, поскольку он должен быть способен компенсировать любой уход частоты в генераторе колебаний с преобразованием частот, находящемся на спутнике GEO.

Подсистема линии вверх на РЧ передает сигналы от SGS, содержащие данные о целостности и корректирующие данные наряду с сигналом измерения дальности, подобным GPS, на спутник GEO. Линия вверх на РЧ принимает сигналы от спутников GEO на обеих частотах диапазонов С и L. В направлении SGS линия RFU управляет уровнями мощности на линии вверх для защиты от помех на линии и колебаний потерь при передаче. RFU также производит частотное преобразование сигнала, передаваемого по линии вверх, в диапазон С и преобразование сигнала в диапазоне С, передаваемого по линии вниз, в сигнал с частотой L2.

Спутниковая подсистема GEO представляет собой спутник на космической геостационарной орбите, спутник AOR-E INMARSAT-3 на долготе 15,5° з.д. Космический сегмент INMARSAT-3 предоставляет возможность передачи навигационных сигналов в полосе шириной 2,2 МГц с центральной частотой 1575,42 МГц.

3.5.9.1 SBAS и распространение сигналов времени

Вторичной функцией системы SBAS, как правило, является распространение сигналов времени. Эталоном времени для SBAS в большинстве случаев является Всемирное координированное время (UTC), которое поддерживается некоторыми национальными или международными учреждениями. Распространение сигналов времени будет осуществляться путем предоставления пользователям величин смещения по времени между сетевым временем SBAS (SNT) и UTC в сообщении типа 12 (MT12). Это смещение по времени определяется различными национальными хронометрическими лабораториями. Данные лаборатории осуществляют контроль за геостационарными спутниками SBAS в пределах их видимости. Они вычисляют разницу во времени между временем запуска сообщения SBAS и сигналом 1 PPS, переданным лабораторией, который является физической реализацией UTC (lab). Затем данные передаются на главные станции SBAS (SMS) через один из интерфейсов. Станция SMS собирает данные по смещению SNT/UTC и создает сообщение MT12, которое затем отправляется на геостационарную станцию на линии вверх (GUS), которая передает его на спутник GEO. Сообщение MT12 предоставляет пользователям источник точного времени, отнесенного к UTC.

Планируется, что SBAS станет следующим поколением глобальных систем передачи сигналов. На такой вывод указывают многие из характеристик системы SBAS. Геостационарные спутники всегда находятся в зоне видимости. Благодаря этому несколько приборов могут быть постоянно "синхронизированы по фазе" путем их привязки к общему сигналу спутника. Передачи с геостационарного спутника предусматривают использовать направленную антенну с высоким коэффициентом усиления, которая может обеспечить более четкие сигналы и в меньшей степени подвержена помехам и срывам слежения. Сигналы геостационарных спутников генерируются и управляются сетью цезиевых приемников GPS, предоставляющих относительно стабильные эталонные сигналы. Кроме того, сообщение SBAS от геостационарных спутников также предоставляет оценку запаздывания сигналов GPS в реальном времени по мере того, как они проходят через ионосферу, при помощи модели, основанной на наблюдениях спутников GPS в реальном времени.

Навигационные системы распространяют собственную эталонную шкалу времени и в ряде случаев данные о ее взаимосвязи с другими шкалами времени. Например, GPS распространяет так называемое "время GPS" и его данные о его взаимосвязи со Всемирным координированным временем, которое поддерживается Военно-морской обсерваторией США (UTC (USNO)). При помощи GPS пользователь может установить на локальных часах время UTC (USNO) и путем постоянного наблюдения за GPS отслеживать точность работы часов относительно UTC (USNO). Из-за дополнительных секунд на настоящий момент время GPS отличается от UTC на 15 с.

Сетевое время WAAS (WNT), сетевое время EGNOS (ENT) и сетевое время MSAS (MNT) являются результатами оценки времени GPS, произведенной системой SBAS. Пользователь должен иметь возможность определить смещение локального эталона времени относительно WNT или ENT. В окончательной рабочей конфигурации каждая станция SBAS предоставляет пользователю расчетное значение разницы между временем SNT и временем UTC. WAAS и EGNOS передают поправки, отображающие разницу между WNT или ENT и UTC. Пользователь может использовать эту информацию для установки на часах времени UTC. Однако эта информация не всегда может быть доступна на столь ранних этапах разработки.

3.5.9.2 Формат CGGTTS для распространения данных синхронизации

Создав специальную рабочую группу под названием CGGTTS, хронометрические организации разработали формат для упрощения обмена данными синхронизации GPS между пользователями, заинтересованными в высокой точности передачи сигналов времени. Этими пользователями в первую очередь являются основные хронометрические лаборатории мира. Не вдаваясь в подробности относительно формата, достаточно сказать, что существуют два столбца, содержащие данные, относящиеся к процессу хронометрии. Они показаны в Таблице 3-1. Первая строка – это заголовки столбцов, а вторая обозначает тип данных, содержащихся в этом столбце. Термин "Lab MC" обозначает главные часы лаборатории, которые формируют и передают результаты измерений. SVN – это часы конкретного спутника, номер SVN которого также приведен в формате сообщения. GPS Time – это системное время GPS.

ТАБЛИЦА 3-1

Данные, относящиеся к хронометрии

REFSV	REFSYS
Lab MC – SVN (для спутника GPS)	Lab MC – GPS Time

Поскольку формат сообщений и данные, поступающие со спутников WAAS, отличаются от данных, полученных со спутников GPS, стандартный формат сообщения синхронизации CGGTTS пришлось изменить. Изменения в сообщении, предложенные NovAtel, в настоящее время тщательно исследуются группой CGGTTS. Предлагаемые изменения включают функциональные дополнения к уже упомянутым двум столбцам, содержащимся в Таблице 3-2. Новый третий столбец, содержащий информацию о синхронизации, получил заголовок GAT, где G обозначает геостационарный спутник, A – WAAS (EGNOS обозначается как B), а T – Time (время). Предложенный формат был разработан для сохранения непрерывности с ранее принятой методикой, в нем по-прежнему учитывается уникальность навигационного сообщения WAAS и метод применения поправок к наблюдаемым (измеренным) значениям псевдодальности. В Таблице 3-2 приведена интерпретация, которая должна быть присвоена данным, применяемым к спутнику SBAS, в предлагаемом пересмотренном формате CGGTTS.

В предлагаемом формате CGGTTS столбцы, обозначенные как REFSV, содержат величину смещения локальных часов относительно времени передачи сигнала геостационарного спутника. Аналогичным образом обозначены данные для спутника GPS. Со ссылкой на Таблицу 3-1 первый столбец второй строки Таблицы 3-2 обозначен как Lab MC-Geo. Однако "Geo" еще не является сетевым временем SBAS (SNT). Применение медленных поправок часов, содержащихся в сообщении типа 9, приближает его к SNT. Теперь второй столбец называется Lab MC-SBAS. Время "SBAS" еще не является временем SNT, поэтому оно называется временем SBAS, сходным со временем GPS. После применения быстрых поправок, содержащихся в сообщениях типов 2–5, в итоге может быть получена величина смещения локальных часов относительно SNT.

ТАБЛИЦА 3-2

Данные в предложенном пересмотренном формате CGGTTS

REFSV	REFSYS	GAT
Lab MC – Geo	Lab MC – SBAS	Lab MC – SNT
Измеренные PSR + ионосфера + тропосфера + орбита	Медленные поправки часов	Быстрые поправки часов и орбиты
Геостационарная орбита из MT9	Часы из MT9	MT2 (быстрые поправки)

Контроль передачи данных WAAS осуществлялся в USNO при помощи узкополосной системы корреляции NovAtel. Данные ежедневно обрабатываются при помощи программы, которая формирует выходные данные в соответствии с предложенным пересмотренным форматом CGGTTS.

В результате обработки выдается значение смещения главных часов USNO относительно времени WNT. Эти данные будут в конечном счете использованы для подготовки сообщения MT12, передаваемого WAAS. Сообщение MT12 будет передаваться через геостационарные спутники SBAS, что позволит пользователям получать значения разницы SNT относительно UTC (Lab). Следует отметить, что главные часы USNO, предоставляющие сигналы времени для узкополосного коррелятора WAAS, используемого для проведения измерений, выполняют расчет UTC (USNO) в реальном времени.

Для проведения анализа был выбран 40-дневный диапазон данных (измененный юлианский день (MJD) 52 167 до MJD 52 207). Этот набор данных не является непрерывным. Для упрощения передачи данных от USNO на другой компьютер через телефонный модем несколько подмножеств данных были переданы в течение временных отрезков минимального использования.

Поскольку приемник, используемый в данном эксперименте, не откалиброван в широком понимании этого слова, т. е. по задержкам, измеренным по всем компонентам системы, то значения, полученные для разницы между USNO MC и временем GPS, полученные при помощи приемника WAAS, были сопоставлены со значениями, полученными при помощи калиброванных приемников USNO. Сформировано среднее значение разницы за один день. Этот средний показатель был использован в качестве расчета систематических значений разницы между приемником NovAtel и приемником USNO, используемым для отправки данных GPS на главную станцию управления GPS.

Рисунок 3-4 отображает данные, содержащиеся в столбце REFSV, которые формируются в соответствии с пересмотренным форматом CGGTTS. На рисунке показана разница между USNO MC и временем, полученным от геостационарного спутника WAAS после применения поправок, связанных с задержками в ионосфере и тропосфере, и поправок к орбите геостационарного спутника, содержащихся в сообщении MT9 для измеренных значений псевдодальности.

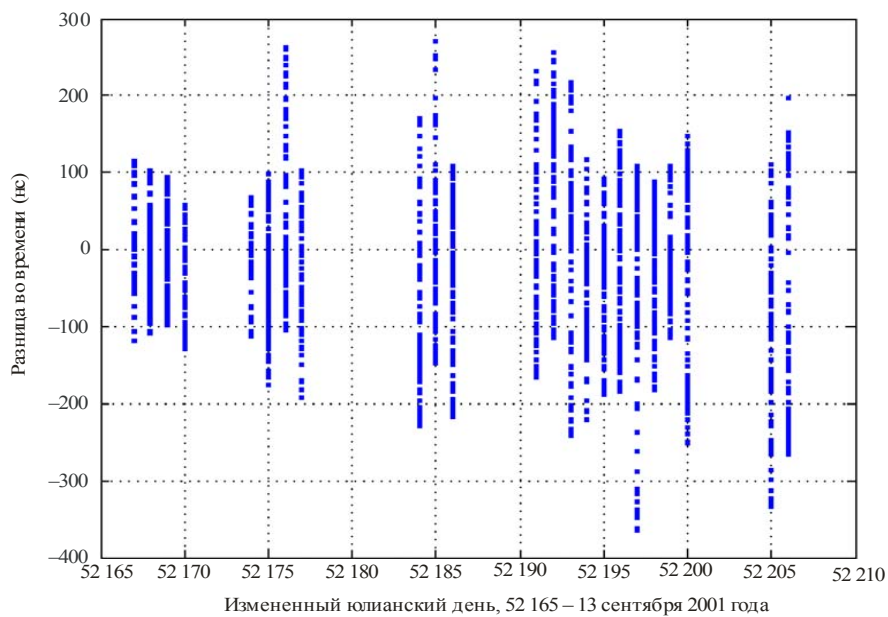
Затем к этим данным были применены поправки часов, содержащиеся в сообщении MT9, а результаты изображены на Рисунке 3-5, на котором заметно резкое уменьшение величин смещения. Однако до сих пор существуют достаточно большие отклонения, начиная примерно с MJD 52 198. Это соответствует довольно большому возмущению ионосферы, которое произошло примерно 13 октября 2001 года.

Применение быстрых поправок, содержащихся в MT 2–5, приводит к дальнейшему улучшению характеристик, как показано на Рисунке 3-6.

Хотя значения разности UTC (USNO) – WNT и снижены до уровней, которые находятся в пределах спецификации WAAS, они по-прежнему велики для распространения сигналов времени по сравнению с аналогичными значениями, полученными с помощью GPS. На Рисунке 3-7 отображены средние суточные значения, составленные из отдельных точек, взятых из Рисунка 3-6. Существует разброс значений, равный примерно 40 нс. Столь большой разброс, вероятно, обусловлен различиями в эксплуатационных операциях, осуществляемых на ранних этапах внедрения WAAS.

РИСУНОК 3-4

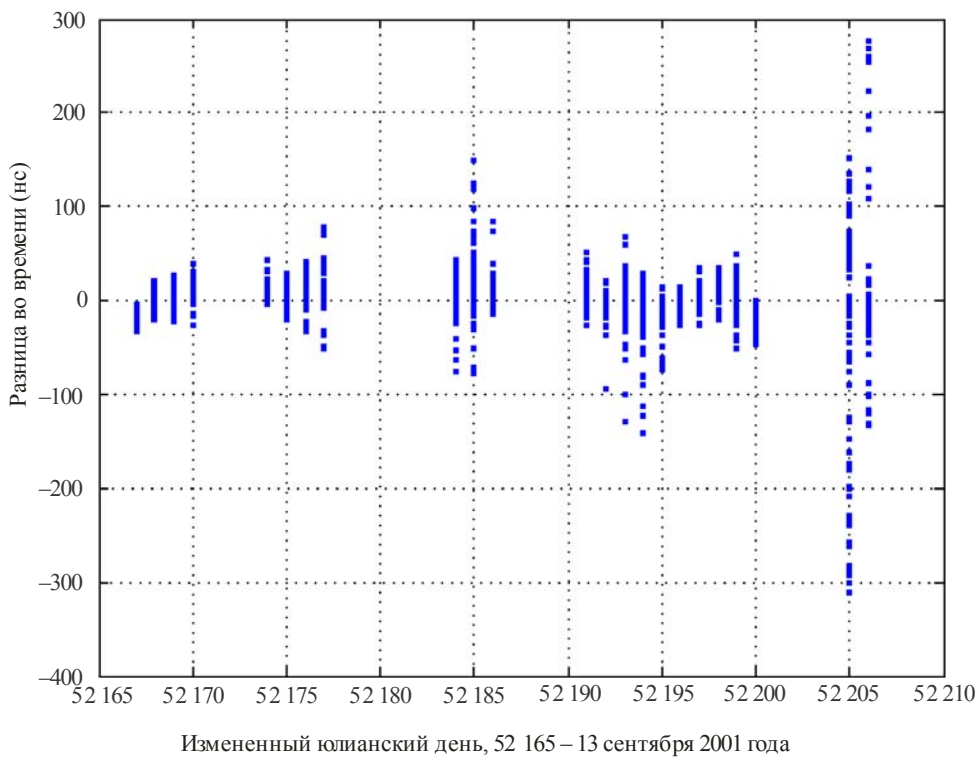
UTC (USNO) – GEO



Sat_time_freq-03-04

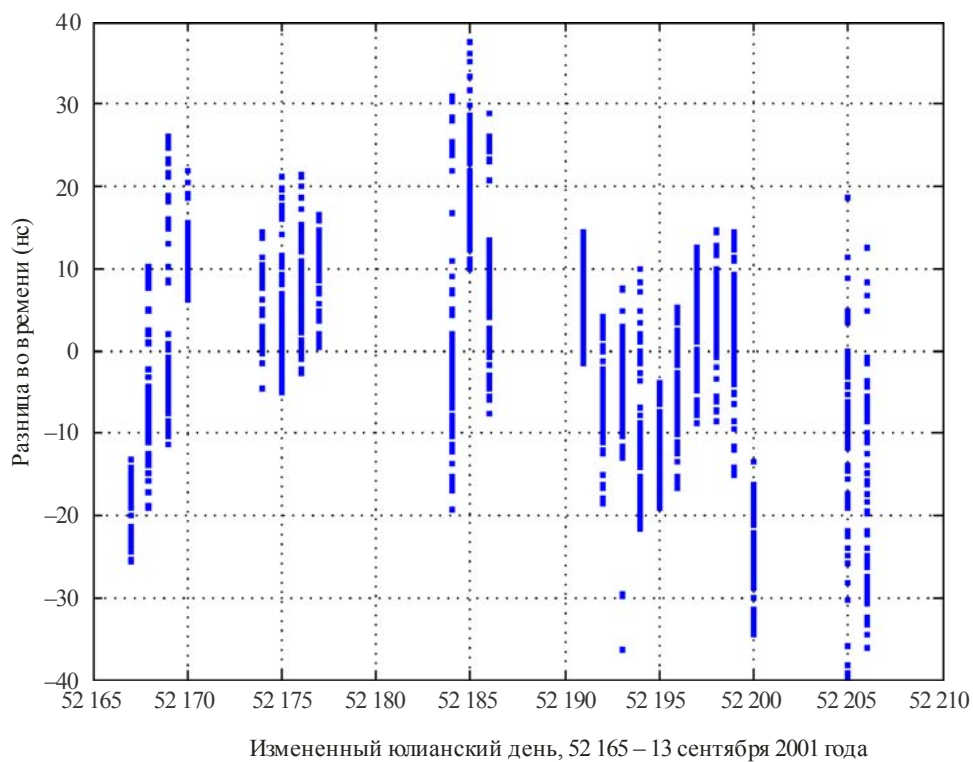
РИСУНОК 3-5

UTC (USNO) – WAAS



Sat_time_freq-03-05

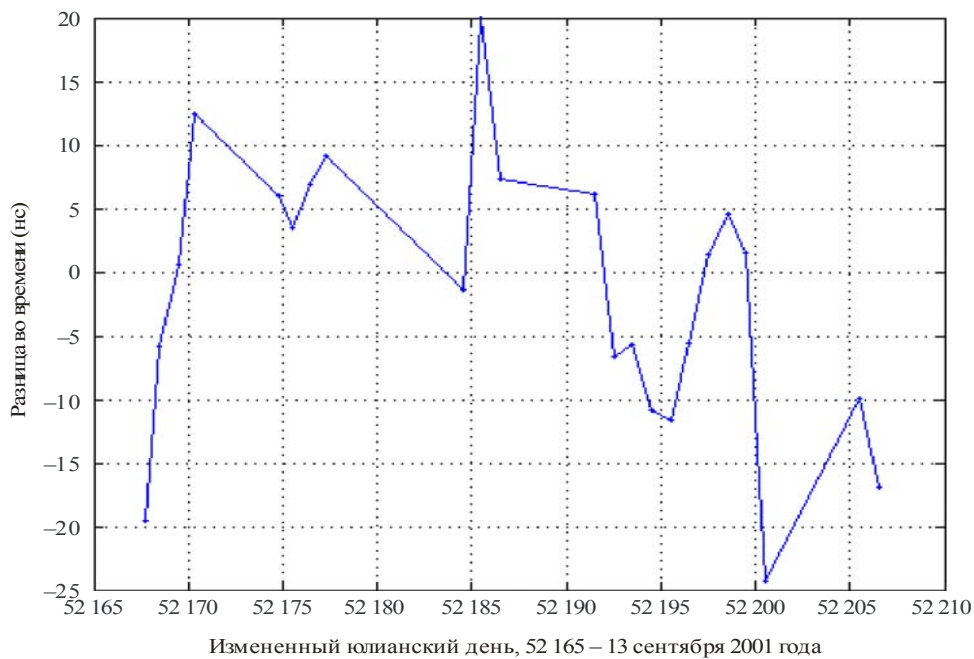
РИСУНОК 3-6
UTC (USNO) – WNT



Sat_time_freq-03-06

РИСУНОК 3-7

Среднесуточные значения разности UTC (USNO) – WNT

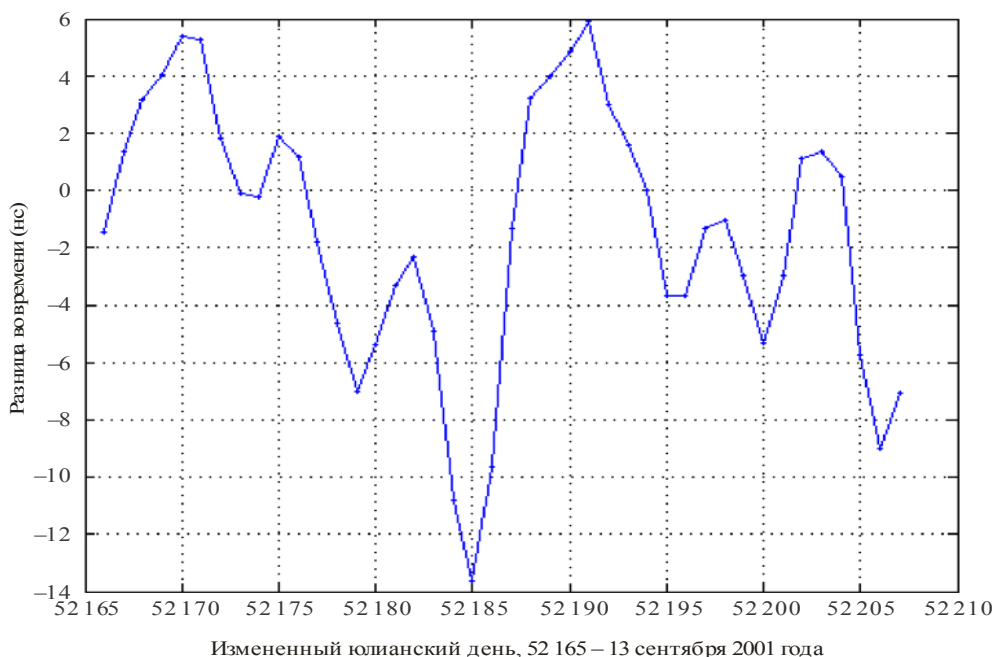


Sat_time_freq-03-07

На Рисунке 3-8 показаны двухдневные средние значения разности: UTC (USNO) – системное время GPS. В этом случае разница составляет примерно 20 нс.

РИСУНОК 3-8

Средние за двое суток значения UTC (USNO) – время GPS



Sat_time_freq-03-08

3.5.9.3 SBAS и распространение сигналов частоты

Передача сигналов времени при помощи спутников GPS на протяжении многих лет широко используется для проведения международного сравнительного анализа между лабораториями отсчета времени и для вычисления международного атомного времени (TAI). Благодаря спутнику, находящемуся в общей зоне видимости двух станций, и результатам наблюдений, собираемым на каждой станции GPS, существует возможность определения по простой разности абсолютного смещения времени между часами, которые подают соответствующие сигналы на приемники GPS. Для этого необходима информация о внутренней задержке на каждой станции (антенны, кабели, приемник и т. д.). Если считать эти задержки постоянными, то между двумя станциями можно осуществлять передачу сигналов частоты, которая обеспечивает доступ к отклонениям смещения времени между двумя отдельными часами и, следовательно, к стабильности этих часов.

На настоящий момент геодезические приемники GPS обладают возможностью обработки нескольких каналов (таким образом, чтобы одновременно можно было наблюдать несколько спутников) и двух частот (тем самым могут быть устранены ионосферные задержки). Таким образом, при использовании всех результатов кодовых измерений классический метод может быть расширен для достижения более точных результатов. Кроме того, эти приемники способны записывать код и измеренные значения фазы несущей. Хорошо известно, что последний параметр весьма перспективен в плане передачи точной частоты для получения значений времени интеграции между несколькими часами и несколькими днями.

Некоторые приемники GPS также могут отслеживать сигналы GEO, т. е. сообщение, подобное GPS, поступающее от навигационного оборудования геостационарных спутников на частоте диапазона L. Такого рода дополнительные сигналы имеют большое значение для передачи сигналов времени/частоты. По определению спутник GEO всегда находится в зоне видимости, поэтому существует возможность непрерывной синхронизации по фазе с его сигналом. Постоянное нахождение в зоне видимости также позволяет упростить обработку таких сигналов. Кроме того, сигнал GEO не подвержен преднамеренному ухудшению характеристик, в частности избирательной доступности.

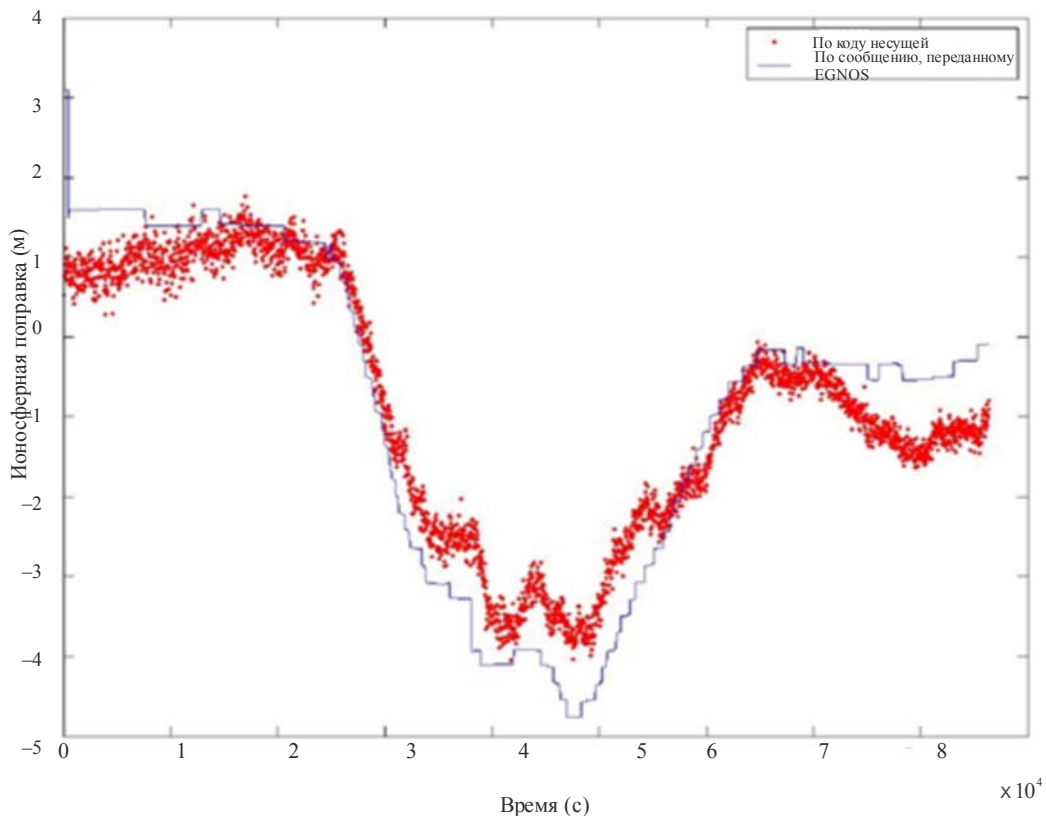
Тем не менее использование спутников GEO связано со специфическими проблемами. Во-первых, они осуществляют передачу на одной частоте, которая предотвращает использование одной из известных комбинаций, свободных от ионосферных воздействий. Влияние ионосферы может корректироваться путем передачи информации системой SBAS или вычисления разности код/фаза. На самом деле ионосфера в равной степени искажает и код, и фазу, но с другим знаком, поэтому ионосферную поправку можно легко вычислить как половину разности код/фаза.

На Рисунке 3-9 изображены результаты, полученные на базовой линии VIPM/CNES (около 600 км) при помощи параболических антенн, направленных на AOR-E INMARSAT (EGNOS).

Во-первых, ионосферную поправку, вычисленную на одной из станций на основе разности кода и несущей, можно сравнить с поправкой, передаваемой в ширококвещательном режиме системой EGNOS.

РИСУНОК 3-9

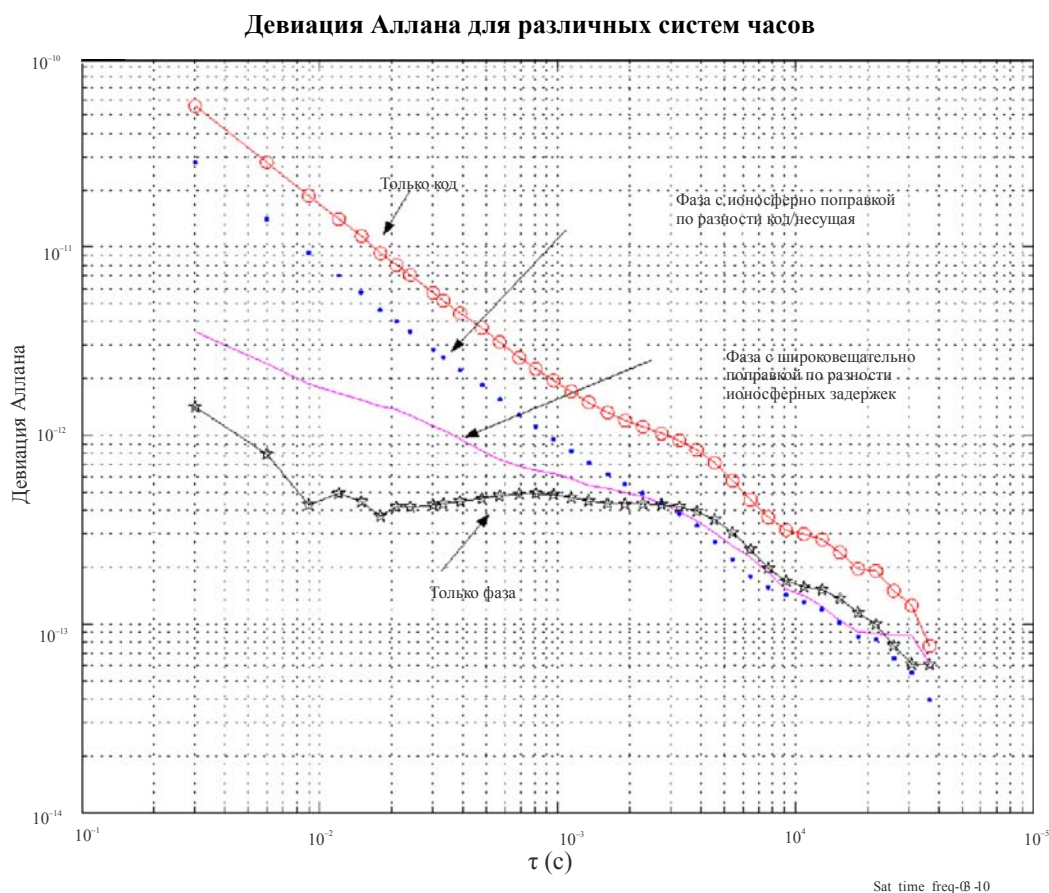
Ионосферные поправки на основе разности код/фаза и информации, передаваемой в ширококвещательном режиме



Ионосферная поправка, вычисленная на основе разности кода и несущей, очевидно, содержит больше шума, но является непрерывной в отличие от ширококвещательной поправки EGNOS, состоящей из нескольких этапов.

На Рисунке 3-10 приведено сравнение стабильности показаний часов с ионосферной поправкой (полученной двумя способами) и без нее.

РИСУНОК 3-10



В краткосрочной перспективе лучшим решением для систем часов очевидно является использование фазы без коррекции, однако отсутствие ионосферной поправки влияет на среднесрочную стабильность. Система часов, использующая фазу с ионосферной поправкой, вычисленной по разности код/несущая, в краткосрочном варианте содержит большое количество шума. Это связано с наличием шума в коде. По истечении времени интеграции, составляющего примерно один час, значения фазы без поправки и фазы с обоими типами поправок становятся очень близкими.

Таким образом, важным вопросом является отношение сигнал/шум. Использование большой направленной антенны повышает его, и это дает значительное преимущество для непрерывной синхронизации по фазе (сокращение количества срывов слежения), а также для ионосферной поправки, вычисленной по разности код/фаза.

3.5.10 SBAS и передача сигналов времени

Пользователям может потребоваться установка удаленных часов для их запуска по заранее заданной шкале времени или просто информация о разности между показаниями локальных и удаленных часов. Это может быть выполнено при помощи метода, известного как "режим одновременных наблюдений". Этот метод заключается в том, что две станции ведут одновременное наблюдение за одним и тем же спутником. Каждый из пользователей на обеих станциях должен записывать разность между показаниями своих локальных часов или эталонного местного времени в один и тот же момент времени, используя один и тот же спутник. Как правило, это осуществляется при помощи приемника, передающего время GPS. Однако с учетом функций, встроенных в современные приемники, это можно выполнить при помощи более совершенного приемника.

При использовании SBAS для передачи сигналов времени участвуют двое пользователей. Для получения оптимальных результатов они должны наблюдать за одним и тем же спутником в одно и то же время и использовать идентичные методы сокращения объема данных при вычислении

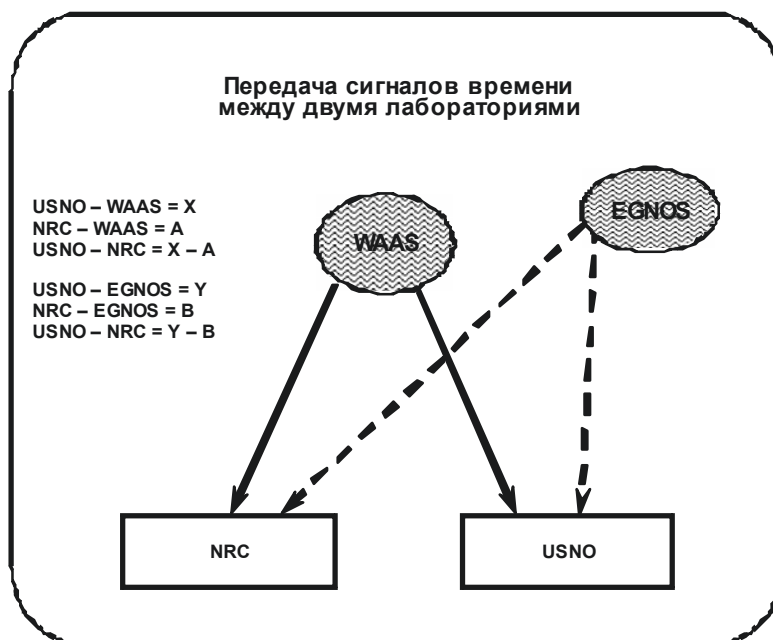
величины смещения своих локальных часов относительно SNT. Преимущество метода заключается в значительном сокращении влияния общих источников ошибок.

3.5.11 Передача сигналов времени между двумя лабораториями

В настоящее время в крупных регионах земного шара наблюдаются две системы SBAS. Тем самым обеспечиваются некоторые дополнительные бонусные функции передачи сигналов времени. На Рисунке 3-11 изображена схема, показывающая, каким образом две лаборатории могут использовать две системы SBAS для сравнения показаний своих часов. Каждая лаборатория может вести наблюдение за двумя системами SBAS. Результаты, полученные от одной SBAS, могут затем служить проверочными данными для другой.

РИСУНОК 3-11

Схема, отображающая передачу сигналов времени между двумя хронометрическими лабораториями, использующими две системы SBAS для получения разницы во времени между двумя лабораториями



Sat_time_freq-03-11

В приведенном примере наблюдения производятся в обсерватории USNO в Вашингтоне, округ Колумбия, и в NRC – в Оттаве, Канада, с использованием спутников GEO систем WAAS и ESTB для передачи сигналов времени. На Рисунке 3-12 показана разница между показаниями главных часов USNO и NRC с использованием GEO WAAS, а на Рисунке 3-13 – то же, с использованием GEO ESTB. Поскольку приемники, использованные в данном эксперименте, не были откалиброваны, произвольная нулевая точка удалена.

Таким образом, этот пример может использоваться только для того, чтобы обозначить точность, которой можно добиться в настоящее время при использовании данного метода. Линейная регрессия каждого набора данных выдает стандартную ошибку в 1,3 нс и 2,1 нсБ, соответственно.

РИСУНОК 3-12

**Разница между USNO и NRC при использовании GEO WAAS.
Стандартная ошибка составляет 1,3 нс**

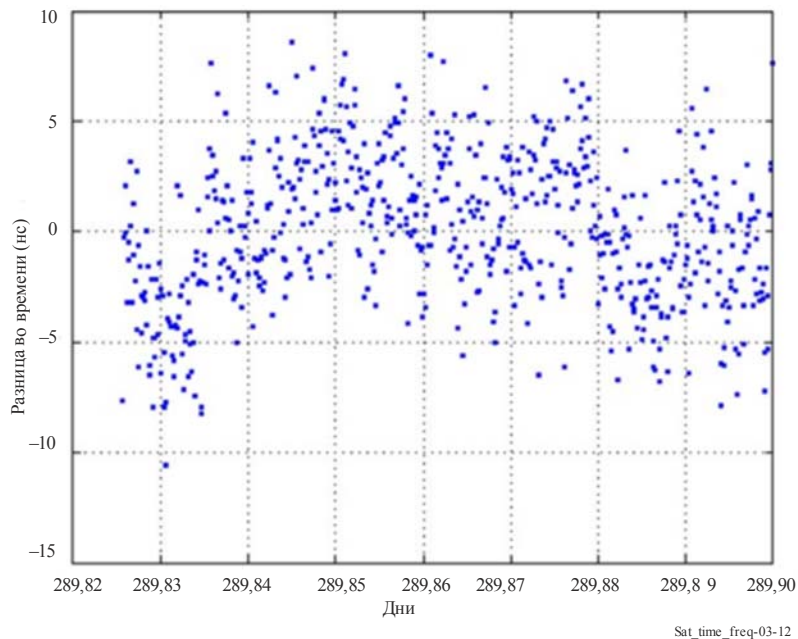
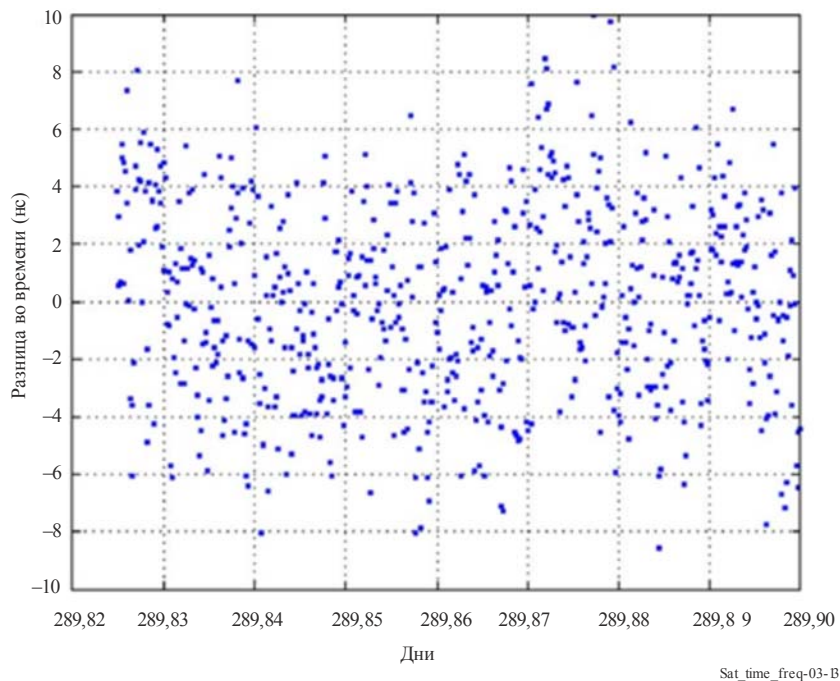


РИСУНОК 3-13

**Разница между USNO и NRC при использовании GEO EGNOS.
Стандартная ошибка составляет 2,1 нс**

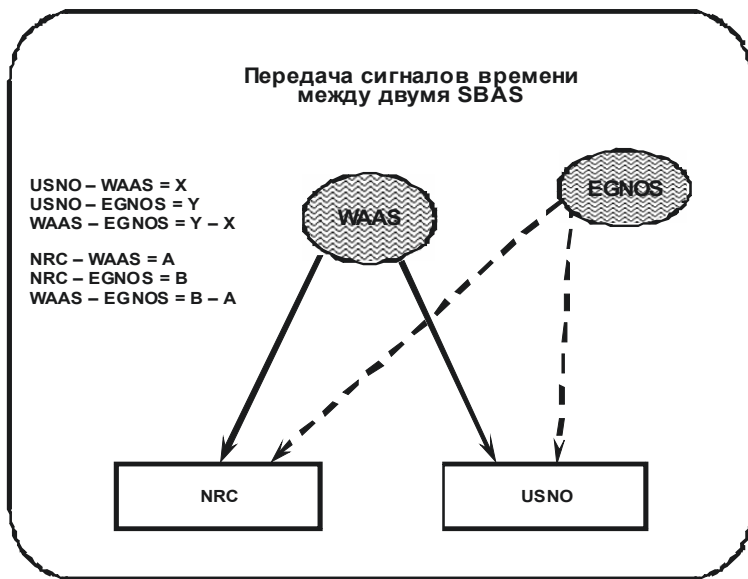


3.5.12 Передача сигналов времени между двумя системами SBAS

На Рисунке 3-14 изображена схема, показывающая, каким образом две лаборатории могут сравнивать разницу во времени между двумя системами SBAS. Каждая из лабораторий осуществляет проверку другой лабораторией.

РИСУНОК 3-14

Схема, отображающая передачу сигналов времени между двумя хронометрическими лабораториями, использующими две системы SBAS для получения разницы во времени между двумя SBAS



Sat_time_freq-03-14

На Рисунке 3-15 показана разница между WNT и ENT, полученная обсерваторией USNO после применения линейной регрессии к результатам наблюдений. Опять же, поскольку не была произведена калибровка приемников, данный график отображает точность, которой можно добиться в настоящее время при использовании данного метода. Стандартная ошибка линейной регрессии для этих данных составляет 1,2 нс.

Рисунок 3-16 отображает разницу между WNT и ENT, полученную в NRC. Стандартная ошибка линейной регрессии для этих данных почти равна значению, полученному в USNO. Она составляет 1,0 нс.

РИСУНОК 3-15

Разница между WAAS и EGNOS при использовании данных USNO. Стандартная ошибка составляет 1,2 нс

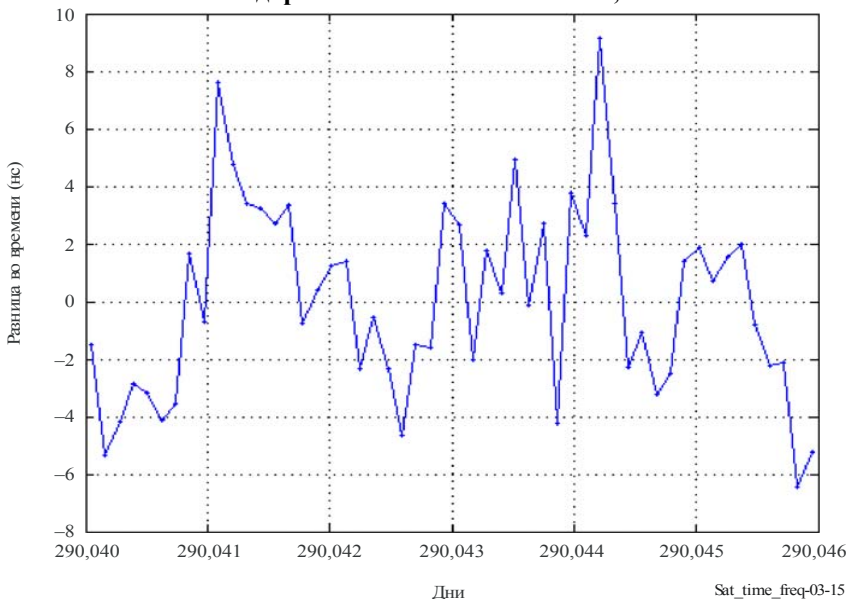
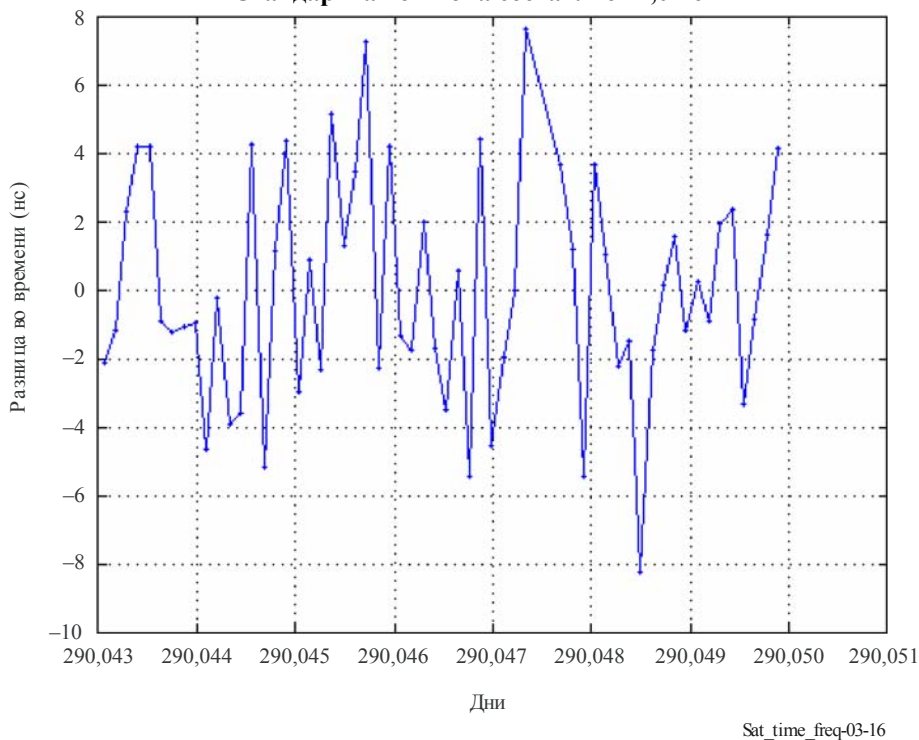


РИСУНОК 3-16

Разница между WAAS и EGNOS при использовании данных NRC.
Стандартная ошибка составляет 1,0 нс



3.5.12.1 SBAS и хронометрические организации

Система SBAS может и будет предоставлять точное время в глобальном масштабе для записи всех событий. Кроме того, она предоставит высокостабильный сигнал синхронизации для хронометрических организаций. Система не подвержена влиянию SA. Источник остается приблизительно в одной и той же точке небесной сферы. Таким образом, для предоставления стационарному пользователю качественного сигнала может использоваться антенна с высоким коэффициентом усиления. Смещение SNT относительно UTC передается в навигационном сообщении SBAS. Этот сигнал будет доступен постоянно.

Подобный сигнал предоставляет хронометрическим организациям некоторые исключительные возможности. Использование таких сигналов позволяет *разрабатывать более экономичные системы хронометража*. Более дешевые кристаллы могут теперь применяться в системах, использующих атомные стандарты в качестве маятника, когда они интегрируют время GPS в целях устранения влияния избирательной доступности. В связи с отсутствием избирательной доступности представляется возможным *практически мгновенное обнаружение любых патологических отклонений* в работе системы, предоставляющей точное время. При использовании GPS необходимо время, чтобы выяснить, с чем связаны импульсные помехи – с избирательной доступностью или аномалиями в режиме работы часов. При нахождении пользователя в зоне обслуживания двух передающих спутников SBAS выполняется *немедленная проверка избыточности*. Это чрезвычайно надежный способ, который может использоваться для проверки многих синхронизированных систем.

Ссылки

- BENEDICTO J. *et al.* [1998] EGNOS: the European Satellite Based Augmentation to GPS and GLONASS. Proc. GNSS98.
- BROWN K.R. [1991] The theory of the GPS composite clock. Proc. ION GPS-91, p. 223-241 and GOUNI, Ph. *et al.* [1997] Time and Frequency aspects in EURIDIS, EFTF 1997.
- BRUNET M. *et al.* [1998] The role of time and frequency in EGNOS. PTTI 1998.
- FLAMENT D. *et al.* [1998] EGNOS: the European Based Augmentation to GPS and GLONASS-mission and system architecture. Proc. GNSS98.
- PECK S. *et al.* [1997] WAAS network time performance and validation, Proc. ION GPS97, p. 1123-1131.
- PIEPLU J-M. *et al.* [1998] EGNOS algorithms performances status and experiment activities. Proc. GNSS98.

ДОПОЛНЕНИЕ А

Краткое описание содержимого сообщения SBAS

Тип	Содержание
0	Не использовать этот спутник GEO (для проверки WAAS)
1	Присвоения маски PRN, установлено значение от 51 до 210 битов
от 2 до 5	Быстрые поправки
6	Информация о целостности
7	Коэффициент ухудшения для быстрых поправок
8	Зарезервировано для будущих сообщений
9	Навигационное сообщение GEO (X, Y, Z, время и т. д.)
10	Параметры ухудшения характеристик
11	Зарезервировано для будущих сообщений
12	Сетевое время SBAS/параметры смещения UTC
от 13 до 16	Зарезервировано для будущих сообщений
17	Альманахи спутников GEO
18	Маски точек ионосферной сетки
от 19 до 23	Зарезервировано для будущих сообщений
24	Смешанные быстрые поправки/долгосрочные поправки для устранения спутниковых ошибок
25	Долгосрочные поправки для устранения спутниковых ошибок
26	Поправки ионосферных задержек
27	Службное сообщение SBAS
28	Ковариационная матрица часов-эфемерид
от 29 до 61	Зарезервировано для будущих сообщений
62	Внутреннее тестовое сообщение
63	Пустое сообщение

ГЛАВА 4

СИСТЕМНОЕ ВРЕМЯ GPS

	<i>Стр.</i>
4.1 Введение.....	50
4.2 Измерение показаний часов станций слежения (контроля) и определение эфемерид....	51
4.3 Время GPS.....	51
4.3.1 Реализация метода составных показаний часов.....	52
4.3.2 Уменьшение ковариации.....	52
4.3.3 Согласование секций.....	53
4.4 Получение UTC (USNO) на основе данных GPS.....	53
Ссылки.....	54

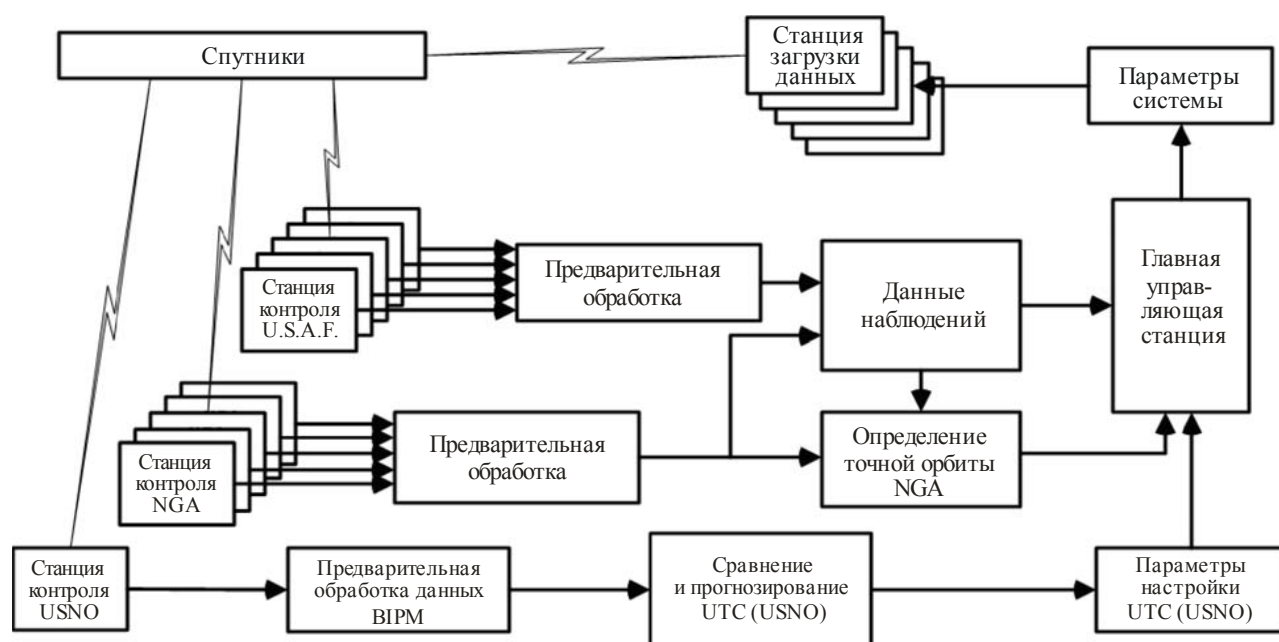
4.1 Введение

Система GPS работает с прогнозируемыми данными в реальном времени. Пять станций контроля ВВС США поддерживают непрерывную связь со станциями MCS в реальном времени, для того чтобы текущая информация о слежении и состоянии могла быть объединена информацией, полученной от дополнительных станций контроля, установленных Национальным агентством геопространственной разведки (NGA) в целях обеспечения дополнительной зоны охвата для группировки спутников GPS. Расширенные результаты наблюдений в свою очередь предоставляют прогнозируемые значения новых показателей системы. Затем эти прогнозируемые значения характеристик системы загружаются в запоминающие устройства на борту спутников для передачи в спутниковых навигационных сообщениях. Ошибки, оставшиеся в течение данного процесса, считаются случайными, при этом основные систематические ошибки (погрешности) устраняются.

Поток данных управляющего сегмента GPS изображен на Рисунке 4-1. Каждый из действующих спутников GPS серии Block II/IIA имеет на борту двое цезиевых (Cs) и двое рубидиевых (Rb) атомных часов. Каждый из спутников серии Block IIR имеет на борту трое рубидиевых (Rb) атомных часов. Основная тактовая частота составляет 10,23 МГц. Спутниковые часы и часы станций контроля вносят свой вклад в статистическое формирование непрерывной системы отсчета времени, известной под названием "время GPS", значение которого указывается в пределах 1 мкс относительно UTC без учета вставки дополнительных секунд. После того как будут учтены различные поправки, связанные с задержками распространения в ионосфере и тропосфере, теорией относительности и влиянием оборудования, система GPS может предоставлять эталонное время, как правило, с точностью ≤ 25 нс. Однако на практике точность может составлять 10 нс или выше.

РИСУНОК 4-1

Поток данных управляющего сегмента



4.2 Измерение показаний часов станций слежения (контроля) и определение эфемерид

В настоящее время (2009 год) результаты основных измерений в системе GPS составляют значения псевдодальности и фазы псевдонесущей между часами спутников и часами станций контроля. Существует пять станций контроля оперативного управляющего сегмента (OCS), включая главную управляющую станцию в Колорадо-Спрингс, Со., которые находятся в ведении Военно-воздушных сил США. Управляющий сегмент был расширен путем создания новых прямых линий связи с восемью станциями контроля, находящимися в ведении NGA. Измеренные значения псевдодальности, полученные станциями контроля от всех спутников, каждые 15 мин обрабатываются фильтром Калмана, содержащим соответствующие константы и модели для координат станций контроля, определения орбиты и характеристик часов. Фильтр Калмана осуществляет прогноз общего системного времени (времени GPS), значений смещения часов отдельных спутников и станций контроля относительно времени GPS, а также орбитальных элементов каждого спутника относительно геодезической системы координат WGS84.

Ошибки измерения распределяются между состояниями фильтра Калмана. Показания часов спутников и станций контроля оцениваются в соответствии с моделью часов, а погрешности выражаются в виде ковариационной матрицы модели.

В процессе определения орбиты для GPS требуются сведения о разнице между UT1 и UTC в целях определения ориентации начальной орбиты относительно геоцентрической инерциальной (ECI) системы координат. Уравнения движения интегрируются в систему координат ECI. Эти координаты преобразуются в геоцентрическую, неподвижную относительно Земли (ECEF) систему координат через четыре матрицы вращения, представляющие движение полюсов Земли, переменное вращение, движение земной оси и прецессию. Данные от станций контроля используют время GPS в качестве эталонного. Фильтр Калмана на станциях MCS использует данные станций MS для формирования текущих оценок позиций спутников и показаний их часов и осуществляет прогноз этих значений на 14 дней вперед. Затем эти данные форматируются и загружаются на спутники для передачи пользователям в виде сообщений NAV-MSG вместе с сигналами измерения дальности. Загрузка данных на спутники, как правило, выполняется каждые 24 часа, но может производиться и более часто, если этого требуют динамика и показатели системы. Сообщение NAV-MSG содержит спутниковые эфемериды, показания часов, данные о состоянии системы и другие данные, необходимые пользователям [ISGPS-2002 rev D, 2006]. Прогнозирование точных позиций спутников и отклонений отдельных спутниковых часов от общего базового времени является критически важной функцией, предоставляемой управляющим сегментом, которая позволяет реализовать в действительности концепцию работы системы GPS.

4.3 Время GPS

Началом отсчета времени GPS является полночь 5–6 января 1980 года. Таким образом, время GPS отстает от TAI на постоянную величину, равную 19 с, а в июне 2009 года время GPS опережало UTC на 15 с. Значение разницы относительно UTC изменяется каждый раз при добавлении к UTC дополнительной секунды.

Исходной концепцией синхронизации компонентов системы в процессе разработки GPS стал метод главных часов, который широко используется в системах электросвязи. Все часы в составе системы используют в качестве эталона одни часы, расположенные на одной из станций контроля (MS). Основным требованием для спутниковой навигационной системы является наличие единой, без резких скачков или разрывов системы времени с согласованной синхронизацией элементов системы. В этом случае навигационная служба может обеспечить точное и бесперебойное определение местоположения. В первоначальной концепции главных часов, которая применялась в системе GPS, все часы в системе использовали в качестве эталона одни часы на главной станции управления (MCS) в Колорадо-Спрингс. Для обеспечения наличия главных часов на случай возможных неисправностей в часах программное обеспечение системы может в любое время делегировать функции главных эталонных часов любым часам, расположенным на станциях контроля. Реализация этой возможности привела к значительным изменениям общих характеристик навигации во время указанной передачи

функций главных часов. Различия в показаниях часов, характеристики которых в качестве главных эталонных часов должны быть близкими к идеальным, привели к общим изменениям в системе и нарушениям функциональных параметров навигации. Как следствие, была разработана и реализована концепция составных показаний часов на базе фильтра Калмана.

Концепция составных показаний часов аналогична традиционной концепции группировки показаний часов, формирующей "бумажные часы", которые не зависят от какого-либо одного устройства [Stein and Filler, 1988]. Группировка показаний часов является хорошо известным методом, используемым для долгосрочной хронометрии, но при применении составных показаний часов оценочный метод Кальмана используется для определения общего эталонного времени, полученного с учетом среднего значения разницы в показаниях часов в пределах системы, формируя системное время, синхронизированное в краткосрочной перспективе (менее 10^5 с). Для службы навигации необходима именно согласованная синхронизация в краткосрочной перспективе. Единое внутреннее базовое время, которое называется "временем GPS", представляет собой основу для синхронизации всех часов в сегментах GPS, особенно для пользовательского оборудования.

Блок оценивания фильтра Калмана, разработанный для вычисления системных параметров GPS, первоначально был спроектирован как секционный фильтр. Такая конструкция обусловлена главным образом вычислительными требованиями, а также достоверностью оценок. Каждая секция фильтра производит оценку того или иного подмножества часов на спутниках и на станциях контроля. При реализации в фильтре метода составных показаний часов было добавлено дополнительное состояние, таким образом показания отдельных часов будут отличаться от неявного среднего значения результатов измерений. Среднее значение само по себе дает нулевой остаток. Полученные в итоге оценки фактических состояний часов являются стабильными и предсказуемыми, однако ковариация решения возрастает линейно без ограничения, что является результатом базовой ненаблюдаемости системы. Кроме того, если в состояниях часов имеется отклонение, то результаты остаются прежними. Как следствие, было добавлено псевдоизмерение, которое ограничивает рост ковариации, не влияя на результаты оценок. Однако различные секции фильтра не всегда попадают в одно и то же стандартное расчетное время. Поэтому для обеспечения согласованности времени GPS по всей группировке спутников необходимо было согласовать оценки, полученные из отдельных секций фильтра.

4.3.1 Реализация метода составных показаний часов

При добавлении дополнительных состояний к фильтру Калмана вместо главных часов MS система GPS становится ненаблюдаемой. Это происходит потому, что постоянное смещение погрешности во всех состояниях часов не затрагивает значение псевдодальности и, следовательно, будет ненаблюдаемым для фильтра. Существование этого ненаблюдаемого компонента состояния вызывает линейный рост ковариации фазы часов с течением времени, несмотря на то что система полностью стабильна с четко определенным коэффициентом усиления фильтра. Более подробно эти характеристики обсуждаются в работе [Brown, 1991]. Рост ковариационной матрицы в конечном счете приводит к количественным проблемам, поэтому был задействован метод сокращения ковариационной матрицы без ухудшения эксплуатационных характеристик фильтра. Данный метод представляет собой сокращение матрицы при помощи обновления псевдоизмерений [Satin and Leondes, 1990].

4.3.2 Уменьшение ковариации

Обновление псевдоизмерения имеет стандартную форму Калмана:

$$P' = P - [PH^T (HPH^T + R)^{-1}]HP, \quad (4-1)$$

где:

- P' – ковариационная матрица, полученная в результате обновления (т. е. сокращенная ковариационная матрица);
- R – дисперсия шума псевдоизмерения;
- H – матрица измерения, связывающая результат измерения с параметром состояния.

Матрица P в этом уравнении является полной ковариационной матрицей размера $n \times n$ из n эфемерид и состояний часов для спутников и станций контроля в конкретной секции. Все секции фильтра подвергаются независимому уменьшению ковариации во время цикла обновления фильтра. Вектор H^T столбца $n \times 1$ строится путем вставки каждого элемента вектора \hat{H}^T столбца $m \times 1$ в нужную позицию вектора нулей $n \times 1$.

Вектор \hat{H}^T задается формулой

$$\hat{H}^T = \frac{B^{-1}u}{u^{-1}Bu}, \quad (4-2)$$

где:

- B – субматрица P размером $m \times m$, соответствующая вектору столбца $m \times 1$ состояний фазы часов, состоящему из нулей;
- u – вектор столбца $m \times 1$, состоящий из единиц.

В этом случае каждые часы в секции будут иметь совокупный вес в векторе H столбца (в порядке, аналогичном порядку P), где каждое состояние эфемерид имеет нулевой вес. Сумма элементов в H приведена к единице. Затем выражение для \hat{H}^T присваивает каждому часу нормализованный набор взвешенных значений фазы и частоты, обратно пропорциональных абсолютной величине дисперсии ошибок оценивания диагоналей B . Однако с учетом конкретной формулы для H^T выражение коррекции обновления приведет к некоторым ненулевым состояниям эфемерид. Следовательно, этот метод коррекции не является полностью прозрачным для оценки эфемерид. Однако на практике данное различие представляется минимальным.

4.3.3 Согласование секций

Согласование секций было необходимо для обеспечения согласованности составных показаний часов для каждой из секций фильтра. Отклонения во времени решения в секциях могут привести к прямой ошибке измерения псевдодальности. Эталонные значения времени в каждой секции имеют различные показатели погрешности, которые могут быть рассчитаны на основании того факта, что показания часов станции контроля существуют в каждой секции. Лучшим решением количественной проблемы, связанной с наличием секций, стало использование односекционного фильтра, что позволяет производить оценки одним и тем же способом. В системе GPS используется односекционный фильтр. Для определения времени GPS по-прежнему планируется использовать метод составных показаний часов.

4.4 Получение UTC (USNO) на основе данных GPS

Атомные часы спутников GPS являются часами со свободным ходом, синхронизация которых по времени GPS обеспечивается путем коррекции данных. Время GPS не реализуется в рамках системы, в которой отсутствуют физические часы, использующие время GPS в качестве эталона. Время GPS реализуется в выходных данных приемников GPS и, соответственно, контролируется обсерваторией USNO. Эти данные сравниваются с собственной реализацией времени UTC, UTC (USNO) и на их основе прогнозируются параметры, которые отправляются обратно на главную станцию управления GPS для последующей передачи в спутниковом сообщении NAV-MSG [McKenzie *et al.*, 1989]. Прогнозируемое смещение UTC в реальном времени, произведенное USNO по отношению ко времени GPS, доступно в субкадре 4 на странице 18 широковещательного сообщения NAV-MSG.

Ссылки

- BROWN K. [September 1991] The theory of the GPS composite clock. *Proc. Of ION GPS-91*, p. 223–241.
- McKENZIE C. H., *et al.* [28-30 November 1989] GPS-UTC Time Synchronization. *Proc. of the 21st Annual PTTI Applications and Planning Meeting*.
- Navstar Global Positioning System Interface Specification IS-200 rev D [2006] Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces, IRN-200D-001, ARINC Engineering Services, LLC, El Segundo, CA 90245.
- SATIN A.L. and LEONDES, C. T. [January 1990] Ensembling Clocks of the Global Positioning System (GPS). *IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 26, 1.
- STEIN S. and FILLER R. [June 1988] Kalman filter analysis for real time applications of clocks and oscillators. *Proc. of the 42nd Annual Symposium on Frequency Control*, p. 447-452.

ГЛАВА 5

НАВИГАЦИОННАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА ГЛОНАСС

	<i>Стр.</i>
5.1 Введение.....	56
5.2 Общее описание и принципы работы.....	56
5.3 Архитектура и развитие ГЛОНАСС.....	56
5.3.1 Космический сегмент	57
5.3.2 Управляющий сегмент.....	61
5.3.3 Пользовательский сегмент	62
5.4 Время ГЛОНАСС	63
5.5 Определение орбиты и синхронизация по времени (OD & TS) системы ГЛОНАСС	65
5.6 Сигналы и радиочастотный спектр ГЛОНАСС	66
5.6.1 Частотные требования	66
5.6.2 Мощность и спектры сигналов	68
5.7 Функции совместного использования ГЛОНАСС и GPS	69
5.8 Заключение	70
Ссылки	71

5.1 Введение

Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС) – это государственная глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС), предназначенная для обеспечения непрерывной всепогодной поддержки для неограниченного числа пользователей воздушной, морской, наземной и космической служб путем предоставления им высокоточных данных по определению местоположения и по отсчету времени в любой точке планеты и околоземного пространства.

Система ГЛОНАСС является космической системой двойного назначения и применяется для решения научных, промышленных, экономических, социальных, оборонных, связанных с безопасностью и других сопутствующих задач. Заказчиками системы ГЛОНАСС на равных условиях являются российское Федеральное космическое агентство (Роскосмос) и Министерство обороны России [Glotov *et al.*, 2006].

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Русский акроним ГЛОНАСС расшифровывается как **Г**ЛОбальная **Н**Авигационная **С**путниковая Система.

5.2 Общее описание и принципы работы

Полностью развернутая система ГЛОНАСС состоит из 24 спутников, вращающихся в трех орбитальных плоскостях. Орбитальные плоскости смещены друг относительно друга на 120° (по долготе). В каждой орбитальной плоскости расположены 8 спутников с равными интервалами 45° (по фазе). Кроме того, сами плоскости смещены по фазе друг относительно друга на 15° .

Номинальный период спутниковой орбиты составляет 11 ч 15 мин 44 с, что соответствует круговой орбите высотой 19 100 км. Данный период обеспечивает повторяемость трассы спутника на поверхности Земли каждые 17 витков. Этот период был выбран таким образом, чтобы уменьшить влияние резонансных эффектов поля гравитации на движение спутника и тем самым исключить необходимость маневрирования для управления орбитой спутника на весь срок его службы. Номинальное наклонение орбиты составляет $64,8^\circ$. Разнос между спутниками позволяет обеспечить непрерывное и глобальное покрытие земной поверхности и околоземного пространства [ГЛОНАСС, 2008 г.] и (Рекомендация МСЭ-R М.1787).

Система ГЛОНАСС работает по принципу пассивной триангуляции. Оборудование пользователей системы осуществляет измерения псевдодальности и радиальной псевдоскорости от всех видимых спутников и получает информацию об эфемеридах и параметрах часов этих спутников. На основе полученных данных рассчитываются три координаты местоположения пользователя и три составляющих вектора скорости, а также выполняется корректировка часов и частоты пользователя (Рекомендация МСЭ-R М.1787).

Каждый спутник передает навигационные сигналы в одном (ГЛОНАСС), двух (ГЛОНАСС-М) или трех (ГЛОНАСС-К) диапазонах частот: L1 (1,6 ГГц), L2 (1,2 ГГц) и L3 (1,1 ГГц) [Дворкин *и др.*, 2009 г.] и (Рекомендация МСЭ-R М.1787).

Уникальной особенностью спутника типа ГЛОНАСС является наличие на борту оптической системы ретроотражателей, которая позволяет определять дальность с помощью лазера на спутнике. Они используются для точного определения орбиты и геодезических исследований [Дворкин *и др.*, 2009 г.].

5.3 Архитектура и развитие ГЛОНАСС

Для обеспечения необходимых функций в систему ГЛОНАСС были включены подсистемы/элементы, показанные на Рисунке 5-1 [Polischuk *et al.*, 2002].

РИСУНОК 5-1

Архитектура ГЛОНАСС



Sat_time_freq-05-01

Система ГЛОНАСС состоит из следующих сегментов:

- орбитальной группировки спутников ГЛОНАСС (космический сегмент);
- наземной системы управления;
- оборудования пользователя (пользовательский сегмент).

Развертывание и техническое обслуживание орбитальной группировки обеспечивается двумя ракетно-космическими системами: одна из них работает на базе ракеты-носителя "Протон", другая – на базе ракеты-носителя "Союз", запускаемых с космодромов БАЙКОНУР и ПЛЕСЕЦК.

5.3.1 Космический сегмент

В стандартном варианте орбитальная группировка ГЛОНАСС (космический сегмент) включает 24 действующих космических аппарата, находящихся на практически круговых орбитах 19 100 км с углом наклона 64,8° к экватору и орбитальным периодом приблизительно 11 ч 15 мин. Они равномерно распределены в трех орбитальных плоскостях (разнесены по долготе восходящего узла на 120°), на каждой плоскости размещается 8 спутников (с равным сдвигом по широте, составляющим 45°). Навигационные спутники в соседних орбитальных плоскостях обладают сдвигом по широте, равным 15°. Подобная геометрическая структура орбитальной группировки обеспечивает глобальный и непрерывный охват поверхности Земли навигационным полем, так что потребитель может одновременно и в любой точке Земли видеть не менее четырех спутников (наилучшей конфигурацией является та, при которой один спутник находится в зените, а три других спутника – вблизи горизонта) [Дворкин и др., 2009 г.].

Первый спутник ГЛОНАСС был выведен на орбиту в 1982 году. В 1993 году система состояла из 12 спутников, и было объявлено о ее готовности к эксплуатации.

Введение в эксплуатацию системы ГЛОНАСС осуществлялось в три этапа [Polischuk *et al.*, 2002].

- Этап 1 (1983–1985 гг.). Экспериментальные испытания. Уточнение концепции системы. Орбитальная группировка из 4–6 спутников.
- Этап 2 (1986–1993 гг.). Орбитальная группировка из 12 спутников. Завершение полетных испытаний. Эксплуатация первоначальной системы.
- Этап 3 (1993–1995 гг.). Развертывание номинальной орбитальной группировки из 24 спутников. Эксплуатация системы.

В марте 1995 года в постановлении правительства Российской Федерации было выдвинуто предложение о гражданском использовании навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС международными организациями ИКАО и ИМО.

В 1995 году было завершено развертывание всей системы. Однако из-за недостатка финансирования пополнение системы ГЛОНАСС в период с 1995 по 1998 год не производилось. А с 1998 года пополнение системы было ограничено запуском трех спутников в год.

Состояние орбитальной группировки на 4 августа 2010 года – это 21 действующий спутник (текущее состояние указывается по данным Информационно-аналитического центра ГЛОНАСС Российского космического агентства:

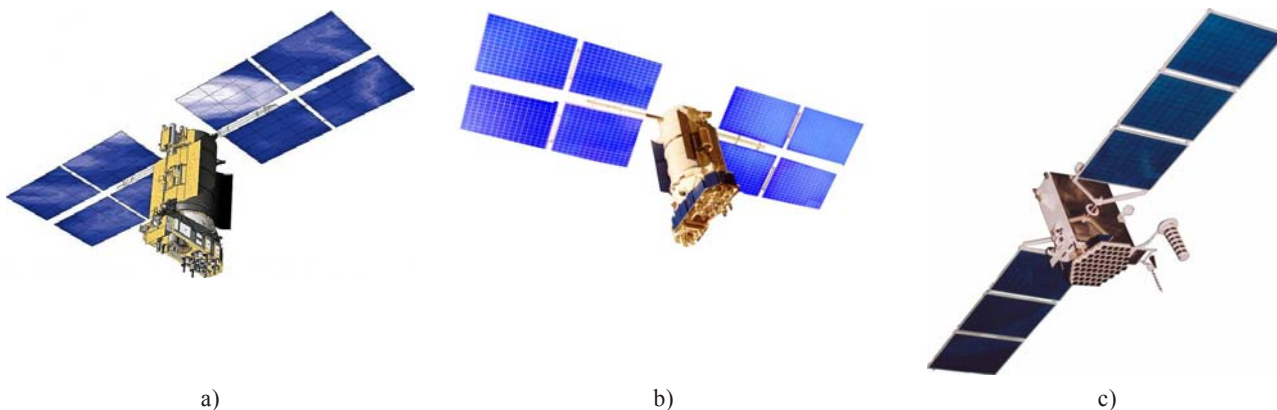
<http://www.glonass-ianc.rsa.ru/pls/htmldb/f?p=202:1:9296521002007641687>).

С конца 1970 года ОАО "Информационные спутниковые системы" имени академика М. Ф. Решетнёва, осуществляющее разработки спутниковой системы ГЛОНАСС, разработало три поколения спутников ГЛОНАСС – ГЛОНАСС, ГЛОНАСС-М и ГЛОНАСС-К.

Общий вид этих спутников показан на Рисунке 5-2.

РИСУНОК 5-2

**Три поколения спутников ГЛОНАСС:
а) ГЛОНАСС; б) ГЛОНАСС-М; в) ГЛОНАСС-К**



Технические характеристики спутников ГЛОНАСС приведены в Таблице 5-1.

ТАБЛИЦА 5-1

Сравнительные характеристики спутников системы ГЛОНАСС

	ГЛОНАСС	ГЛОНАСС-М	ГЛОНАСС-К
Первый запуск	1982 г.	2003 г.	Планировался на 2010 г.
Срок службы (годы)	3	7	10–12
Масса (кг)	1 415	1 415	750
Масса бортового навигационного оборудования (кг)	180	250	260
Количество спутников на один запуск:			
– ПРОТОН	3	3	6
– СОЮЗ	–	1	2
Источник питания (Вт)	1 000	1 450	1 270
Мощность, потребляемая бортовым навигационным оборудованием (Вт)	600	580	750
Точность вертикальной навигации в режиме реального времени (95%) (м)	60	30	5–8 (40–60 см, при использовании глобальной дифференциальной системы)
Количество сигналов гражданского назначения	1	3	3
Количество сигналов специального назначения	2	2	3
Стабильность бортовых часов	5×10^{-13}	1×10^{-13}	1×10^{-13}
Среднеквадратическая ошибка взаимной синхронизации навигационных сигналов (нс)	15	8	3–4
Дополнительные функции			Сигнал целостности. Разностные поправки. Поиск и спасение

Конструктивно спутник ГЛОНАСС-К представляет собой негерметичный корпус с оборудованием, физически разделенный на модуль платформы и модуль бортовой аппаратуры.

Спутники типа ГЛОНАСС-М приходят на смену спутникам ГЛОНАСС. Спутники этого типа обладают улучшенными характеристиками и функциональными возможностями.

Основными целями улучшения эксплуатационных характеристик спутника типа М являются следующие:

- использование новой полосы частот благодаря модернизированному навигационному сигналу:
 - полоса частот сдвинута влево (вместо номеров частот $K = 0–12$ будут использоваться номера частот $K = -7...+6$);

- ранее зарезервированные байты используются для получения дополнительной информации, включая расхождение шкал времени GPS и ГЛОНАСС; битовый флаг, определяющий подлинность (аутентичность) навигационного кадра; срок действия навигационной информации;
- установлены фильтры, уменьшающие внеполосные излучения;
- на обеих частотах L1 и L2 передаются двойственные сигналы, которые содержат цифровые данные и коды для измерения псевдодалности;
- введение в действие межспутниковой линии радиосвязи для дистанционных измерений и обмена данными между спутниками, находящимися как в одной и той же, так и в разных орбитальных плоскостях;
- улучшение стабильности сигнала навигации до 1×10^{-13} . Точная стабилизация температуры благодаря наличию цезиевых часов;
- снижение погрешности, вызванной давлением солнечного света. Благодаря повышенной точности в ориентации солнечных батарей;
- увеличение срока службы спутника до 7 лет.

Спутник ГЛОНАСС-М может быть запущен как в тандеме (запуск одновременно трех спутников с космодрома БАЙКОНУР ракетой-носителем "Протон-М" со стартовым ускорителем "Бриз-М"), так и в режиме одиночного запуска (с космодрома ПЛЕСЕЦК ракетой-носителем "Союз-2" со стартовым ускорителем "Фрегат").

Основным элементом конструкции спутника ГЛОНАСС-М является гермоконтейнер, внутри которого поддерживаются комфортные температурные условия в диапазоне 0–40 °С. В зоне расположения эталонов частоты стабильность температуры составляет ± 1 °С.

В номинальном режиме продольная ось спутника постоянно ориентирована на Землю с точностью 0,5°, а поперечная ось совпадает с плоскостью "Солнце-спутник-Земля" с точностью 0,5°, панели солнечных батарей ориентированы на Солнце с точностью $\pm 2^\circ$. Ориентация спутника осуществляется при помощи маховиков, которые периодически разгружаются электромагнитными модулями.

Подсистема силовой установки включает двигатели на основе гидразина (амидола) и обеспечивает формирование управляющего крутящего момента в исходных режимах работы спутника и в режиме управления орбитой.

Крайне важно, чтобы маневры коррекции орбиты выполнялись только в ходе перемещения спутника на предназначенную для него орбитальную позицию. Высокая точность управления параметрами орбиты на этапе работы на начальной орбите и использование нерезонансных орбит для орбитальной группировки позволяет исключить корректирующие орбитальные маневры на весь срок полета спутника.

Подсистема электропитания построена на базе никель-гидридных аккумуляторов и кремниевых солнечных батарей. Первый запуск спутника ГЛОНАСС-М произведен в декабре 2003 года. Спутник был изготовлен НПО ПМ.

Дальнейшее развитие системы ГЛОНАСС определяется Федеральной целевой программой ГЛОНАСС, утвержденной правительством Российской Федерации 20 августа 2001 года. Стимулами для принятия программы модернизации стали следующие факторы:

- (для гражданских пользователей) необходимость улучшения показателей точности, готовности и целостности системы в целях повышения конкурентоспособности системы на мировом рынке навигационных услуг;
- (для заказчиков) сокращение эксплуатационных расходов, связанных с функционированием орбитальной группировки, за счет увеличения срока службы спутников и количества одновременно запускаемых спутников, а также сокращение расходов на наземный управляющий сегмент за счет внедрения автоматизации;
- (для международного сотрудничества) совместимость и взаимозаменяемость ГЛОНАСС/GPS.

Эта программа охватывает период с 2002 по 2011 год. Основными задачами являются:

- создание и развитие космического сегмента и наземной инфраструктуры навигационной спутниковой системы;
- пополнение и техническое обслуживание группировки спутников на уровне, обеспечивающем применение навигационных технологий в интересах различных пользователей;
- развитие международного сотрудничества в области SATNAV (спутниковой навигации);
- разработка и производство оборудования для российских пользователей.

Федеральная целевая программа наряду с поддержкой системы на базе спутников ГЛОНАСС-М предусматривает разработку спутников типа ГЛОНАСС-К – нового поколения спутников.

По сравнению со спутниками ГЛОНАСС-М спутник ГЛОНАСС-К имеет следующие отличительные особенности, в том числе:

- a) в диапазоне L введена третья частота для повышения надежности и точности пользовательского навигационного оборудования;
- b) срок службы спутника увеличен до 10 лет;
- c) масса спутника снижена в 2 раза;
- d) на борту спутника размещено поисково-спасательное оборудование.

К 2010 году НПО ПМ завершило выполнение этапа В и приступает к реализации этапа С. Спутник ГЛОНАСС-К может быть запущен по одной из следующих схем тандемного запуска:

- 6 спутников одновременно с космодрома БАЙКОНУР ракетой-носителем "Протон-М" со стартовым ускорителем "Бриз-М";
- 2 спутника одновременно с космодрома ПЛЕСЕЦК ракетой-носителем "Союз-2" со стартовым ускорителем "Фрегат".

Конструктивно спутник ГЛОНАСС-К представляет собой негерметичный корпус с оборудованием, физически разделенный на модуль платформы и модуль бортовой аппаратуры. В номинальном режиме продольная ось спутника постоянно ориентирована на Землю с точностью $\pm 5^\circ$, панели солнечных батарей ориентированы на Солнце с точностью 1° .

Температура эталонов частоты локально стабилизирована в пределах $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Температура остального оборудования поддерживается в диапазоне от -10 до $+50^\circ\text{C}$.

5.3.2 Управляющий сегмент

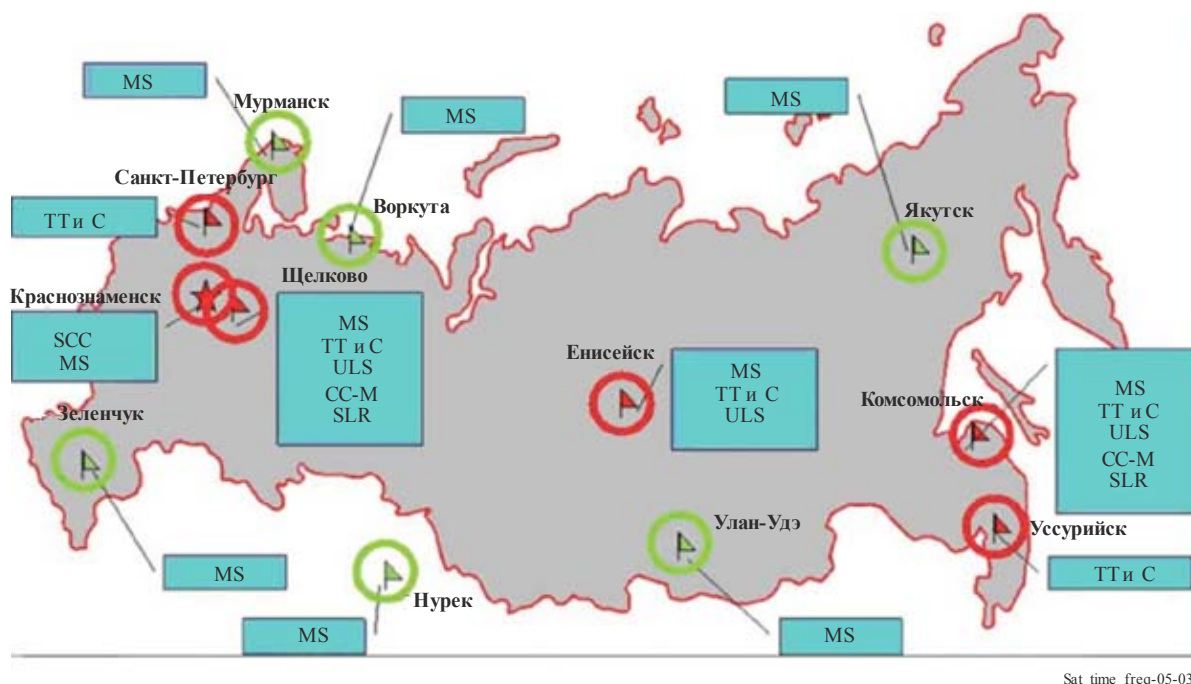
Управляющий сегмент включает следующие компоненты:



- центр управления системой (SCC);
- станции телеметрии, слежения и управления (UT & C);
- станции контроля с односторонней связью;
- станции лазерного определения дальности со спутника.

Наземные управляющие объекты ГЛОНАСС показаны на Рисунке 5-3 [Kosenko, 2009].

РИСУНОК 5-3

Управляющий сегмент ГЛОНАСС



SSC	– центр управления системой	MS	– контрольно-измерительная станция
TT и C	– станция телеметрии, слежения и передачи команд управления	CC	– главные часы
ULS	– станция загрузки	SLR	– станция лазерного слежения
	– новая станция (после 2010 года)		– действующая станция

Станции контроля измеряют параметры орбиты спутника и сдвиг часов относительно главных системных часов. Эти данные передаются в центр управления системой. Центр вычисляет эфемериды и параметры коррекции часов, а затем ежедневно отправляет сообщения на спутники через станции контроля.

5.3.3 Пользовательский сегмент

Пользовательский сегмент состоит из большого числа пользовательских оконечных устройств различного типа. Пользовательское оконечное устройство состоит из антенны, приемника, процессора и устройства ввода/вывода. Это оборудование может использоваться совместно с другими навигационными устройствами для повышения точности и надежности навигации. Подобная комбинация может быть особенно полезной для высокодинамичных платформ.

Пользовательское оборудование выполняет пассивные измерения значений и скорости изменения псевдодальности четырех (трех) спутников ГЛОНАСС, а также получает и обрабатывает навигационные сообщения, содержащиеся в навигационных сигналах спутников. Навигационное сообщение описывает положение спутников в пространстве и во времени. Комбинированная обработка результатов измерений и навигационных сообщений четырех (трех) спутников ГЛОНАСС позволяет пользователю определить 3 (2) координаты местоположения, 3 (2) составляющих вектора скорости, а также привязать шкалу времени пользователя к национальному эталону Всемирного координированного времени (UTC). Информация, обеспечивающая планирование сеансов для определения навигационных данных, выбора рабочей "группировки" КА и обнаружения радиосигналов, передаваемых ими, передается в виде части навигационного сообщения.

Эти устройства функционально являются составной частью ГЛОНАСС, подобно тому как мобильные телефоны и пользовательские оконечные устройства входят в состав систем электросвязи. Крупномасштабное производство навигационных пользовательских устройств (CND) для GPS началось в конце 1980-х годов; в настоящее время их серийное производство, в том числе двухсистемных приемников GPS/ГЛОНАСС, осуществляется более чем на 100 предприятиях, выпускающих 500 стандартных типов приемников. Следует отметить, что разработка и производство устройств CND для неправительственных пользователей является задачей частных предприятий, особенно с учетом того, что в настоящее время мировой объем годовых продаж продуктов и услуг в этой отрасли превышает 10 млрд. долл. США. Тем не менее правительство поддерживает развитие необходимой элементной базы для создания конкурентоспособных моделей устройств CND [ГЛОНАСС, 2008 г.].

5.4 Время ГЛОНАСС

На борту каждого спутника находятся цезиевые эталоны времени и частоты, входящие в состав системы устройства бортовой синхронизации, которое используется для формирования, хранения и создания бортовой шкалы времени и навигационных сигналов высокой стабильности в диапазонах частот 1600 МГц и 1250 МГц. В 2010 году планируется начать запуски спутников нового поколения ГЛОНАСС-К (Рис. 5-2 с)) с улучшенными характеристиками. Гарантированный срок службы этих аппаратов составит 10 лет. Они будут также включать третий гражданский сигнал в диапазоне частот L3 (1198–1212 МГц). Эталоны времени и частоты являются бортовыми устройствами синхронизации, во многом определяющими гарантированный срок службы навигационных спутников [ГЛОНАСС, 2008 г.; Дворкин и др., 2009 г.].

Время ГЛОНАСС основывается на атомной шкале времени, аналогичной шкале времени GPS. Эта шкала времени является временем UTC, поддерживаемым Россией (UTC (SU)). В отличие от GPS шкала времени ГЛОНАСС не является постоянной и должна периодически регулироваться в связи с введением дополнительных секунд. Дополнительные секунды применяются для всех эталонов времени UTC в соответствии с определением Международной службы вращения Земли и систем отсчета (IERS). Дополнительные секунды используются для того, чтобы приблизить время UTC к среднему солнечному времени. Среднее солнечное время, основанное на вращении Земли вокруг своей оси, не является однородным, и его скорость постепенно меняется благодаря приливному трению и другим факторам, например перемещениям жидкого ядра Земли.

Время ГЛОНАСС поддерживается управляющим сегментом в пределах 1 мс (как правило, менее 1 мкс) от UTC (SU), а оставшаяся часть смещения передается в широкоэвещательном навигационном сообщении. Кроме того, Москва смещает время ГЛОНАСС по сравнению со временем UTC (SU) на дополнительные три часа. Журнал регистрации GLOCLOCK (см. руководство OEMV Family Firmware Reference Manual) содержит информацию о смещении между временем GPS и временем ГЛОНАСС.

Спутники ГЛОНАСС оборудованы часами (эталонами времени/частоты), суточная нестабильность которых для спутников ГЛОНАСС-М не превышает 5×10^{-13} и 1×10^{-13} . Точность взаимной синхронизации спутниковых шкал времени не превышает 20 нс (1σ) для спутников ГЛОНАСС и 8 нс (1σ) для спутников ГЛОНАСС-М.

Время ГЛОНАСС формируется на основе времени центрального синхронизатора (ЦС) ГЛОНАСС. Суточная нестабильность водородных часов центрального синхронизатора не превышает 2×10^{-15} .

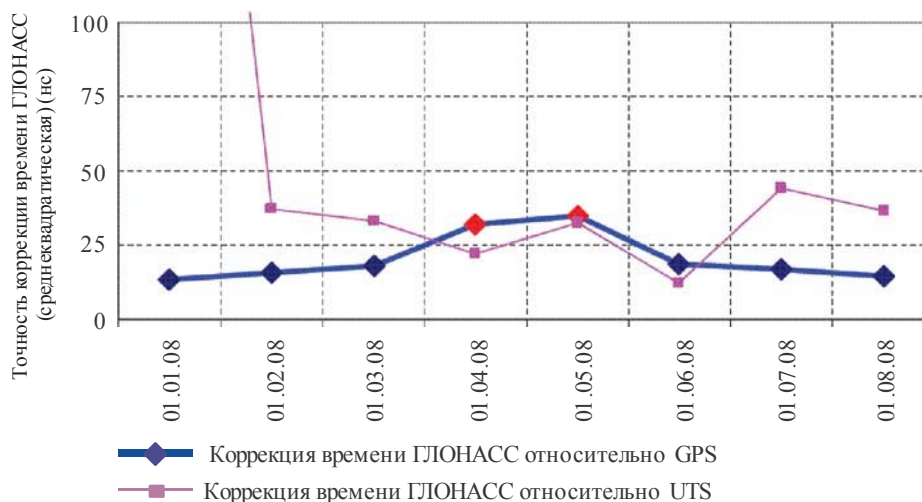
Шкалы времени спутников ГЛОНАСС периодически сопоставляются со шкалой времени CS. Управляющий сегмент дважды в день вычисляет и передает на спутники поправки к каждой бортовой шкале времени относительно времени ГЛОНАСС и UTC (SU). Погрешность системы, использующей время ГЛОНАСС UTC (SU), не должна превышать 1 мкс.

Шкала времени ГЛОНАСС периодически корректируется и приводится к целому числу секунд одновременно с корректировками UTC, которые осуществляются согласно уведомлению Международного бюро по мерам и весам (BIPM) (корректировка с использованием дополнительных секунд) – см. Рисунок 5-4. Как правило, эти коррекции (1 с) выполняются один раз в год

(или в полтора года) в полночь – 00 ч 00 мин 00 с UTC с 31 декабря на 1 января в 1-м квартале (или с 31 марта на 1 апреля во 2-м квартале, или с 30 июня на 1 июля в 3-м квартале, или с 30 сентября на 1 октября в 4-м квартале) всеми пользователями UTC.

РИСУНОК 5-4

Сравнение точности коррекции времени ГЛОНАСС со временем UTC и временем GPS [Kosenko, 2009]



Sat_time_freq-05-04

Пользователи ГЛОНАСС заранее (как минимум за три месяца) оповещаются об этих планируемых поправках через соответствующие бюллетени, уведомления и т. д. В самих навигационных сообщениях со спутников ГЛОНАСС не содержится никаких данных о коррекции UTC с использованием дополнительных секунд. Однако навигационное сообщение спутников ГЛОНАСС-М предусматривает заблаговременное оповещение пользователей о предстоящей коррекции с использованием дополнительных секунд, ее величине и знаке (см. п. 4.5 [ГЛОНАСС, 2008 г.]).

В результате проведения коррекции с введением дополнительных секунд между временем ГЛОНАСС и UTC (SU) не существует сдвига на целое число секунд. Однако существует постоянный сдвиг на три часа между этими двумя шкалами времени, связанный со специфическими особенностями управляющего сегмента ГЛОНАСС:

$$t_{\text{GLONASS}} = t_{\text{UTC (SU)}} + 03 \text{ ч } 00 \text{ мин}, \quad (5-1)$$

где:

t_{GLONASS} – время ГЛОНАСС;

$t_{\text{UTC (SU)}}$ – национальная шкала Всемирного координированного времени (UTC (SU)).

Для пересчета эфемерид спутников в момент измерений по UTC (SU) следует использовать формулу

$$t_{\text{UTC (SU)}} + 03 \text{ ч } 00 \text{ мин} = t + \tau_c + \tau_n(t_b) - \gamma_n(t_b) (t - t_b), \quad (5-2)$$

где:

t – время передачи навигационного сигнала по бортовой шкале времени;

$\tau_c, \tau_n, \gamma_n, t_b$ – параметры эфемериды и альманаха (приведены в пп. 4.4 и 4.5).

Спутники ГЛОНАСС-М передают также специальные коэффициенты В1 и В2 для определения разницы между универсальным временем UT1 и Всемирным координированным временем (UTC),

а также поправку GPS ко времени GPS относительно времени ГЛОНАСС, которая не должна превышать 30 нс (σ) [ГЛОНАСС, 2008 г.].

5.5 Определение орбиты и синхронизация по времени (OD & TS) системы ГЛОНАСС

В номинальном режиме работы системы ГЛОНАСС определение временных поправок и параметров орбиты осуществляется раздельно. Временные поправки для каждого спутника определяются два раза в день при помощи односторонних и двусторонних измерений. Сравнение значений дальности, вычисленных при помощи односторонних и двусторонних измерений, упрощает определение временных поправок для бортовых часов. Для определения эфемерид используются только двусторонние измерения.

Система поддержки частоты и времени включает беззапросные (NMS) и запросные (QMS) измерительные радиостанции, а также центральный синхронизатор системы (расположенный в Щелково, Московская область). В результате проведения измерений псевдодальности до навигационного спутника при помощи NMS и измерений расстояния при помощи QMS получают значения смещения бортовой шкалы времени относительно шкалы времени системы. Центральный синхронизатор, состоящий из нескольких высокостабильных водородных эталонов частоты, суточная нестабильность которых составляет не более 5×10^{-14} , фактически выполняет функции системных часов, по которым синхронизируются все спутниковые часы и с которыми сверяют свои часы пользователи.

В свою очередь шкала времени системы ГЛОНАСС синхронизируется со шкалой Государственного эталона времени и частоты (Менделеево, Московская область), UTC (SU), которая является одним из вариантов использования всемирного координированного времени (UTC). Коррекция шкалы времени системы ГЛОНАСС по отношению к всемирному времени (UT1) определяется исходя из данных радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами, и передается пользователю в навигационном сообщении [Дворкин и др., 2009 г.].

В настоящее время (2010 год) в результате создания устройств для осуществления односторонних измерений и завершения исследований гравитационного поля Земли начаты испытания технологии одновременного применения временных поправок и определения эфемерид только на основе результатов односторонних измерений.

Эфемерида, передаваемая спутниками системы ГЛОНАСС, описывает положение спутника в геоцентрической системе координат PZ-90. В целях совместного использования систем ГЛОНАСС и GPS координаты спутников могут быть преобразованы в систему WGS-84, и для этой цели существует соответствующая матрица. Погрешность преобразования координат не превышает 1,5 м (1σ) по каждой оси.

Часть задач OD & TS для спутников ГЛОНАСС-К в настоящее время выполняется бортовым программным обеспечением спутников, что существенно повышает их автономность. Основными задачами OD & TS, выполняемыми бортовыми приборами, являются следующие:

- формирование и отправка навигационных суперкадров на навигационный передатчик;
- предварительная обработка результатов измерения межспутниковых расстояний;
- уточнение эталонных спутниковых эфемерид с использованием результатов измерения межспутниковых расстояний;
- расчет поправок времени относительно групповой шкалы времени;
- распространение информации об эфемеридах и о времени.

Были исследованы три метода уточнения эталонных эфемерид в использовании межспутниковых измерений:

- метод ортогонального изображения, при котором уточняются только составляющие в направлении движения с использованием результатов взаимных измерений, при этом линия прямой видимости перпендикулярна движению спутника;

- метод на основе "пользовательского" принципа, при котором уточняется эталонная эфемерида каждого спутника и предполагается, что эталонные эфемериды других спутников точно известны;
- метод уточнения параметров плоских орбит, суть которого заключается в уточнении компонентов в направлении движения и радиальных компонентов. Эфемериды каждого спутника и всех других спутников, находящихся в зоне видимости, уточняются бортовыми приборами.

Из перечисленных методов наиболее оптимальным представляется третий. Уточнение эталонных эфемерид и уточнение временных поправок на борту спутника с использованием межспутниковых измерений производятся раздельно. Среднеквадратические погрешности эфемерид, передаваемых в навигационном кадре, составляют:

- для спутников ГЛОНАСС: вдоль траектории движения – 20 м, вдоль бинормали – 10 м, вдоль радиуса – 5 м;
- для спутников ГЛОНАСС-М: вдоль траектории движения – 7 м, вдоль бинормали – 7 м, вдоль радиуса – 1,5 м.

С 1999 года согласно постановлению российского правительства система ГЛОНАСС стала системой двойного назначения, т. е. предусмотренной для применения как военными, так и гражданскими пользователями. Кроме того, система ГЛОНАСС открыта для международного сотрудничества, целью которого является создание международной навигационной системы и предполагается использование такой системы организациями ИКАО и ИМО. Совместное использование систем GPS и ГЛОНАСС предоставляет пользователям надежные навигационные услуги, обеспечивающие высокую точность и доступность, а также способствует развитию мирового рынка навигационных услуг.

5.6 Сигналы и радиочастотный спектр ГЛОНАСС

В отличие от системы GPS, применяющей сигналы с кодовым разделением каналов, при котором навигационные спутники излучают сигналы на одной и той же несущей частоте, система ГЛОНАСС применяет частотное разделение, следовательно, каждый спутник передает навигационный сигнал на своей собственной несущей частоте. Оба метода обладают как достоинствами, так и недостатками. В частности, использование кодового разделения каналов значительно упрощает создание устройств для массового потребителя и позволяет неограниченно увеличивать количество спутников. Таким образом, в целях сбалансированного развития ГЛОНАСС и расширения количества и качества навигационных услуг на спутниках ГЛОНАСС-К планируется внедрение навигационных сигналов нового типа как с частотным, так и с фазовым разделением.

5.6.1 Частотные требования

Частотные требования для системы ГЛОНАСС определяются следующими факторами: прозрачность ионосферы, бюджет радиолинии, простота конструкции пользовательских антенн, подавление многолучевого распространения, стоимость оборудования и положения Регламента радиосвязи. Несущие частоты различаются на значения, целые кратные 0,5625 МГц в диапазоне L1, 0,4375 МГц в диапазоне L2 и 0,423 МГц в диапазоне L3.

С 2006 года новые спутники в системе ГЛОНАСС используют от 14 до 20 несущих частот в различных полосах. В диапазоне L1 используются несущие частоты от 1598,0625 МГц (нижняя) до 1605,3750 МГц (верхняя), в диапазоне L2 используются несущие частоты от 1242,9375 МГц (нижняя) до 1248,6250 МГц (верхняя), в диапазоне L3 используются несущие частоты от 1201,7430 МГц (нижняя) до 1209,7800 МГц (верхняя). Номинальные значения несущих частот радионавигационных сигналов, используемых в системе ГЛОНАСС, приведены в Таблице 5-1 (Рекомендация МСЭ-R М.1787).

ТАБЛИЦА 5-1
Номинальные значения несущих частот радионавигационных сигналов
в системе ГЛОНАСС

K (№ несущей частоты)	F_K^{L1} (МГц)	F_K^{L2} (МГц)	F_K^{L3} (МГц)
12	–	–	1 209,7800
11	–	–	1 209,3570
10	–	–	1 208,9340
09	–	–	1 208,5110
08	–	–	1 208,0880
07	–	–	1 207,6650
06	1 605,3750	1 248,6250	1 207,2420
05	1 604,8125	1 248,1875	1 206,8190
04	1 604,2500	1 247,7500	1 206,3960
03	1 603,6875	1 247,3125	1 205,9730
02	1 603,1250	1 246,8750	1 205,5500
01	1 602,5625	1 246,4375	1 205,1270
00	1 602,0000	1 246,0000	1 204,7040
–01	1 601,4375	1 245,5625	1 204,2810
–02	1 600,8750	1 245,1250	1 203,8580
–03	1 600,3125	1 244,6875	1 203,4350
–04	1 599,7500	1 244,2500	1 203,0120
–05	1 599,1875	1 243,8125	1 202,5890
–06	1 598,6250	1 243,3750	1 202,1660
–07	1 598,0625	1 242,9375	1 201,7430

На каждой несущей частоте передаются два навигационных сигнала с фазовой манипуляцией (на 180° по фазе), сдвинутые по фазе на 90° (в квадратуре). Один из сигналов – сигнал стандартной точности (SA), другой – сигнал высокой точности (HA).

Каждый из спутников (ГЛОНАСС и ГЛОНАСС-М) передает навигационные сигналы в двух диапазонах частот – L1 (1,6 ГГц) и L2 (1,2 ГГц), при этом используются разные несущие частоты. Спутники, расположенные в диаметрально противоположных точках одной плоскости, используют одни и те же несущие частоты. Номинальные несущие в диапазонах частот L1 и L2 определяются следующими выражениями:

$$f_{K1} = f_{01} + K\Delta f_1; \quad (5-3)$$

$$f_{K2} = f_{02} + K\Delta f_2, \quad (5-4)$$

где:

K – номер несущей;

f_{01} = 1602 МГц;

Δf_1 = 562,5 кГц;

f_{02} = 1246 МГц;

Δf_2 = 437,5 кГц.

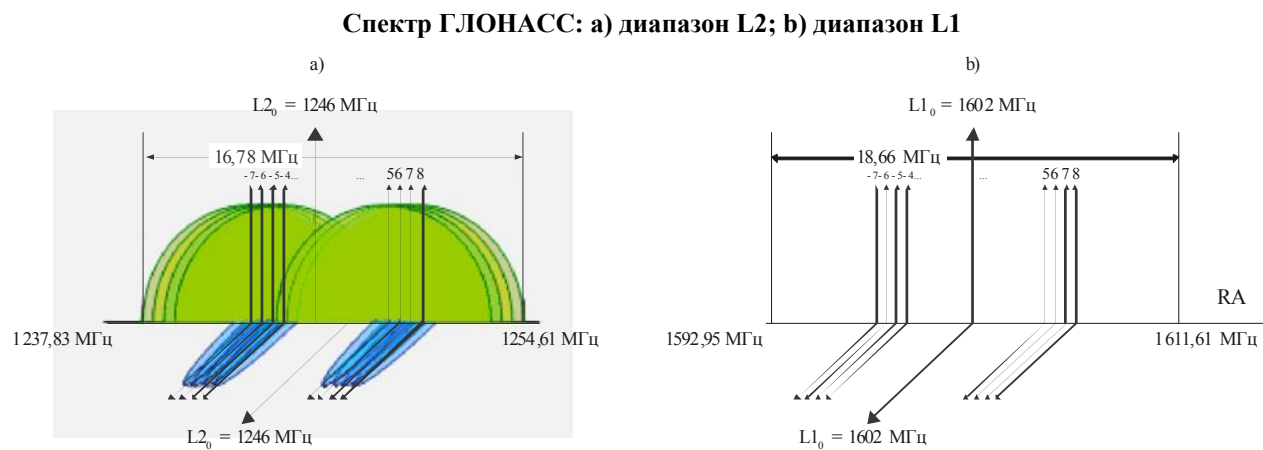
До 2005 года значения, взятые для K , равнялись целым числам от 0 до 13, после 2005 года – от –7 до +6.

Для спутников ГЛОНАСС-К введена третья частота L3.

5.6.2 Мощность и спектры сигналов

Спектр сигналов ГЛОНАСС в диапазонах L1, L2 показан на Рисунке 5-5, а спектр сигнала спутника ГЛОНАСС-К в диапазоне L3 – на Рисунке 5-6 [Revnivukh, 2005].

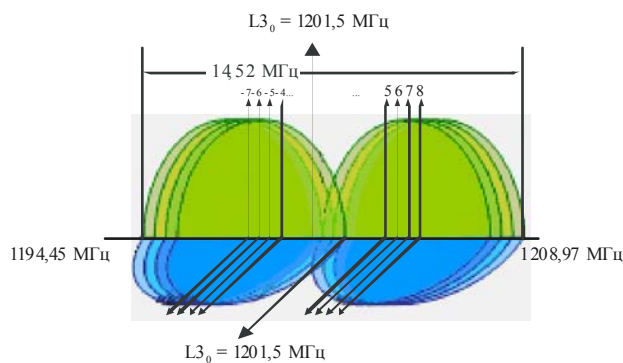
РИСУНОК 5-5



Sat_time_freq-05-05

РИСУНОК 5-6

Спектр ГЛОНАСС: сигнал L3 (ГЛОНАСС-К)



Sat_time_freq-05-06

Передаваемые сигналы имеют правую эллиптическую поляризацию с коэффициентом эллиптичности не более 0,7 для диапазонов L1, L2 и L3. Минимальная гарантированная мощность сигнала на входе приемника (при усилении антенны 0 дБи) определена на уровне -161 дБВт (-131 дБм) для сигналов SA и HA в диапазонах L1, L2 и L3 (Рекомендация МСЭ-R М.1787).

В системе ГЛОНАСС используются три класса излучений: 8M19G7X, 1M02G7X, 10M2G7X. Характеристики этих сигналов приведены в Таблице 5-2.

ТАБЛИЦА 5-2

Характеристики сигналов системы ГЛОНАСС

Диапазон частот	Класс излучения ⁽¹⁾	Ширина полосы передатчика (МГц)	Максимальная пиковая мощность излучения (дБВт)	Максимальная спектральная плотность мощности (дБ(Вт/Гц))	Усиление антенны (дБ)
L1	10M2G7X	10,2	15	-52	11
	1M02G7X	1,02	15	-42	
L2	10M2G7X	10,2	14	-53	10
	1M02G7X	1,02	14	-43	
L3 ⁽²⁾	8M19G7X	8,2	15	-52,1	12
	8M19G7X	8,2	15	-52,1	

⁽¹⁾ Регламент радиосвязи, издание 2008 года. Том 2, Приложение 1.

⁽²⁾ Два сигнала ГЛОНАСС на частоте L3 сдвинуты относительно друг друга на 90° (в квадратуре).

Огибающая спектра мощности навигационного сигнала описывается функцией $(\sin x/x)^2$, где

$$x = \pi(f - f_c) / f_t, \quad (5-5)$$

где:

f – рассматриваемая частота;

f_c – несущая частота сигнала;

f_t – скорость передачи элементов сигнала.

Главный лепесток спектра образует рабочий спектр сигнала. Он занимает ширину полосы, равную $2f_t$. Лепестки имеют ширину, равную f_t .

5.7 Функции совместного использования ГЛОНАСС и GPS

Очевидно, что объединение систем GPS и ГЛОНАСС в конечном счете представляет собой систему из 48 спутников. В подобной системе затенение спутников становится менее ограничивающим фактором, что позволяет увеличить избыточность измерений.

Современные методы цифровой обработки сигналов позволяют обрабатывать сигналы GPS и ГЛОНАСС, используя одну и ту же архитектуру приемника, несмотря на различия между системами. GPS и ГЛОНАСС работают в близких диапазонах частот, позволяя таким образом в пользовательском оборудовании применять комбинированную антенну и предварительный усилитель с общим входом. Оптимальная конструкция приемника и соответствующее программное обеспечение, предназначенное для обработки сигналов, позволяют разработать комбинированный приемник, стоимость которого ненамного превышает стоимость приемника GPS или ГЛОНАСС. Различия в информации об эфемеридах и представлении альманаха GPS и ГЛОНАСС не препятствуют работе пользовательского оборудования. Программное обеспечение навигационного процессора производит надлежащие коррекции и выполняет обработку обоих потоков данных.

Пользовательское оборудование, представляющее собой наиболее гибкую часть всей системы, постоянно совершенствуется. Большинство существующих приемников являются многоканальными и способны одновременно отслеживать значения псевдодалности и псевдоскорости целого ряда видимых спутников. Таким образом, они обеспечивают максимальную точность и целостность навигационных наблюдений. Технический прогресс в области цифровой обработки сигналов обеспечивает возможности интеграции очень высокого уровня, позволяющие выполнять дискретное преобразование и цифровую обработку спутниковых сигналов вблизи входного каскада приемника.

Совместное применение ГЛОНАСС и GPS предоставляет существенные преимущества по сравнению с автономным использованием каждой из систем.

Повышенная готовность. При работе в условиях наличия препятствий, например в гористой местности или городских "каньонах", удвоенное количество доступных спутников зачастую позволяет получить устойчивый сигнал там, где приемники только GPS или ГЛОНАСС не обеспечивают надлежащего качества сигнала.

Повышенная точность. Увеличение количества спутников, как правило, приводит к улучшению геометрии "пользователь-спутник" (PDOP).

Ускоренный холодный старт. Если в приемнике не задана информация о местоположении или времени, то при увеличении количества спутников в зоне видимости вероятность приема спутникового сигнала повышается, при этом сокращается время приема сигнала.

Целостность и устойчивость системы. При увеличении количества спутников в зоне видимости способность к обнаружению и локализации неисправного спутника существенно увеличивается. Кроме того, работа с двумя независимыми системами обеспечивает дополнительный уровень целостности при неисправностях в масштабе системы в целом.

В настоящее время на рынке представлено оборудование, одновременно использующее сигналы навигационных спутников систем ГЛОНАСС и GPS для проведения топологической и геодезической съемки на суше, на море и в воздухе. Работая в дифференциальном режиме, это оборудование гарантирует точность геодезического определения местоположения для земных станций на уровне $1-3 \text{ см} + 10^{-6}L$ ($L = 1000 \text{ км}$), где L – расстояние между геодезическими станциями, автомобилями, самолетами, судами [Справочник МСЭ-R, 2002 г.].

Признавая указанные выше преимущества совместного использования систем ГЛОНАСС и GPS, 9–10 декабря 2004 года делегации Соединенных Штатов Америки и Российской Федерации провели встречу в Вашингтоне, округ Колумбия, на которой были созданы рабочие группы по вопросам развития и использования систем GPS и ГЛОНАСС. В процессе совместной деятельности основное внимание уделяется поддержке совместимости радиочастот между сигналами спутниковой навигации и отсчета времени для обеих систем. Обе стороны повторно выразили готовность к продолжению переговоров и вновь подтвердили, что Соединенные Штаты Америки и Российская Федерация и в дальнейшем намерены предоставлять сигналы GPS и ГЛОНАСС гражданского назначения, которые могут использоваться в коммерческих и научных целях, а также в целях обеспечения безопасности человеческой жизни на непрерывной глобальной основе и бесплатно для пользователей. С тех пор рабочая группа GPS-ГЛОНАСС проводит совещания на регулярной основе.

5.8 Заключение

Подводя итоги вышесказанному, можно отметить следующее:

- ГЛОНАСС представляет собой глобальную навигационную спутниковую систему, в настоящее время (2010 год) обеспечивающую почти глобальное покрытие (завершение планируется в течение нескольких лет);
- ГЛОНАСС является системой двойного (военного и гражданского) назначения;
- координацию работы ГЛОНАСС осуществляет гражданская организация – Роскосмос (российское Федеральное космическое агентство);
- использование ГЛОНАСС совместно с GPS способствует повышению качества услуг навигации и распространения сигналов точного времени;
- система ГЛОНАСС открыта для международного сотрудничества.

ССЫЛКИ

- ДВОРКИН В.В., НОСЕНКО Ю.И., УРЛИЧИЧ Ю.М., ФИНКЕЛЬШТЕЙН А.М. [2009 г.]. Российская глобальная спутниковая навигационная система. Вестник Российской академии наук. Том 79, 1 (<http://www.springerlink.com/content/180m3184w46747u5/fulltext.pdf>).
- GLOTOV V.D., REVNIVYKH S.G., MITRIKAS V.V. [October 2006] GLONASS status update. MCC activity in GLONASS program. 15th International Workshop on Laser Ranging, Canberra, Australia (<http://cddis.gsfc.nasa.gov/lw15/docs/papers/GLONASS%20Status%20Update%20and%20MCC%20Activity%20in%20GLONASS%20Program.pdf>).
- KOSENKO V. [3-9 May, 2009] Satellite System GLONASS Status and Plans. Proceedings of European Navigation Conference - Global Navigation Satellite Systems (ENC-GNSS), Naples, Italy (http://www.enc-gnss09.it/proceedingsPDF/04_Kosenko.pdf).
- POLISCHUK G.M., KOZLOV V.I., ILITCHOV V.V., KOZLOV A.G., BARTENEV V.A., KOSENKO V.E., ANPHIMOV N.A., REVNIVYKH S.G., PISAREV S.B., TYULYAKOV A.E. [2002] Global navigation satellite system GLONASS: development and usage in the 21st century. 34th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, Reston, Virginia, USA (<http://tycho.usno.navy.mil/ptti/ptti2002/paper13.pdf>).
- REILLY J.P. [2004] A review of the evolution of the Russian GLONASS system [http://www.topconpositioning.com/uploads/tx_topconfilearchive/POB_Magazine_takes_an_in-depth_look_at_GLONASS - Click here for article.pdf](http://www.topconpositioning.com/uploads/tx_topconfilearchive/POB_Magazine_takes_an_in-depth_look_at_GLONASS_-_Click_here_for_article.pdf).
- REVNIVYKH S.G. [14-15 March, 2005] GLONASS: Status and Perspectives. Civil GPS Service Interface Committee International Information Subcommittee, Prague, Czech Republic (<http://radio.feld.cvut.cz/satnav/CGSIC/>).
- ГЛОБАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА ГЛОНАСС. ИНТЕРФЕЙСНЫЙ КОНТРОЛЬНЫЙ ДОКУМЕНТ. Навигационные радиосигналы в диапазонах L1, L2 (редакция 5.1). МОСКВА, 2008. Редакция 5.1, 2008 г. Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения (РНИИ КП) (<http://rniikp.ru/en/pages/about/publ/ikd51en.pdf>).

Публикации МСЭ-R

- Справочник МСЭ-R "Контроль за использованием спектра". Издание 2002 года (<http://www.itu.int/publ/R-HDB-23/ru>).
- Регламент радиосвязи. Издание 2008 года. Том 2, Приложение 1 – Классификация излучений и необходимая ширина полосы (<http://www.itu.int/publ/R-REG-RR-2008/ru>).
- Рекомендация МСЭ-R M.1787 – Описание систем и сетей радионавигационной спутниковой службы (космос-Земля и космос-космос) и технические характеристики передающих космических станций, работающих в полосах частот 1164–1215 МГц, 1215–1300 МГц и 1559–1610 МГц (<http://www.itu.int/rec/R-REC-M.1787-0-200908-1/en>).

ГЛАВА 6

СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

	<i>Стр.</i>
6.1 Введение.....	74
6.2 Бортовое оборудование связи	74
6.2.1 Архитектура аналоговой ретрансляции типа "прямая дыра"	74
6.2.2 Архитектура регенерационной ретрансляции.....	76
6.2.3 Цифровая реализация	76
6.2.4 Система слежения, телеметрии и управления.....	77
6.3 Отсчет времени и синхронизация для работы спутниковых систем.....	77
6.4 Влияние шума на линии и дефектов спутника на работу бортового оборудования ретрансляции типа "прямая дыра".....	77
6.4.1 Влияние белого шума	77
6.5 Фазовый шум спутника и систематические погрешности	79
6.6 Заключение	79
Ссылки	79

6.1 Введение

Основной функцией спутников связи является передача радиочастотных (РЧ) сигналов для целей связи. Таким образом, передача сигналов времени и частоты через спутники связи, как правило, выполняется путем совмещения функций связи. Некоторые спутниковые системы, особенно те, которые используют системы многостанционного доступа с временным разделением (TDMA), для осуществления функций связи нуждаются в информации о точном времени [ITU-R Handbook, 2002; На, 1990]. В большинстве случаев при использовании TDMA сигналы точного времени, передаваемые с Земли, проходят напрямую через спутник, а бортовое оборудование спутника как таковое в процессе работы не нуждается в точном времени. Способность передавать сигналы времени необходима в магистральной системе телеметрии, слежения и управления спутниковыми линиями связи для целей измерения дальности и проставления меток времени. Однако пользователь, арендующий оборудование, как правило, не имеет доступа к этой части спутниковой системы. Требования к точности и стабильности частоты для коммерческих спутников в целом ограничиваются поддержанием распределения полос частот и выполнением функций измерения дальности. Спутники правительственной связи, как правило, имеют на борту гораздо более точные источники частоты, потому что они используются также для навигации и других задач, требующих точного времени.

Для передачи сигналов времени могут использоваться две части спутника связи – бортовое оборудование связи и магистральная система слежения, телеметрии и управления (ТТ & С). В следующих разделах описываются принципы работы каждой из этих систем. Особое внимание уделено вопросам передачи сигналов времени.

Структура, основные технические и эксплуатационные характеристики спутников связи описываются в Справочнике [ITU-R Handbook, 2002].

6.2 Бортовое оборудование связи

Спутники связи используются для предоставления целого ряда услуг связи. Полосы частот на линиях вверх и линиях вниз используются для осуществления связи при помощи бортового оборудования спутников. Далее эти полосы зачастую разбиваются на поддиапазоны, которые называются каналами. Бортовое оборудование связи предназначено для приема сигналов из полос частот или каналов на линиях вверх, преобразования сигналов в новые частоты, их дальнейшей обработки и ретрансляции обработанных сигналов в полосах или каналах на линиях вниз.

Полосы частот или каналы спутника используются либо одним пользователем в режиме единичного доступа (SA), в частности при применении в широковещательной связи, или несколькими пользователями в различных режимах многостанционного доступа (MA). Различные режимы MA – это многостанционный доступ в пространственной области (SDMA), многостанционный доступ с временным разделением (TDMA), многостанционный доступ с кодовым разделением (CDMA), многостанционный доступ с частотным разделением (FDMA) и случайный многостанционный доступ (RMA).

Эти режимы многостанционного доступа зачастую используются совместно для расширения пропускной способности полосы частот или канала.

Для бортового оборудования связи применяются два основных типа архитектуры – архитектура ретрансляции типа "прямая дыра" и регенерационной ретрансляции, а также два типа реализации – аналоговая или цифровая. Эти виды архитектуры и реализации обсуждаются в следующих разделах.

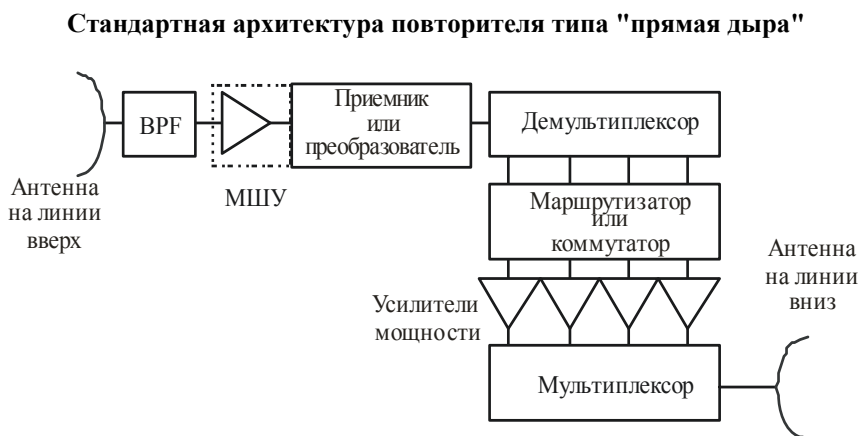
6.2.1 Архитектура аналоговой ретрансляции типа "прямая дыра"

Из применяемых в настоящее время видов архитектуры бортового оборудования наиболее распространенной является архитектура аналоговой ретрансляции типа "прямая дыра". В этой архитектуре несколько ретрансляторов типа "прямая дыра" просто преобразуют один или несколько сигналов в полосе частот на линии вверх в полосу частот на линии вниз и повторно передают совокупный сигнал в полосе частот на линии вниз. Этот тип архитектуры является наиболее применимым для передачи сигналов времени, поскольку трасса распространения сигнала

относительно прямая. В спутниках коммерческого назначения, использующих данную архитектуру, для преобразования полос частот применяются в основном несинхронизированные местные генераторы колебаний (ЛО). В спутниках правительственной связи, использующих данную архитектуру, часто применяются генераторы ЛО, когерентные с отдельным главным генератором колебаний (МО), расположенным на спутнике. В ряде случаев спутниковый главный генератор колебаний синхронизирован по фазе с наземным эталоном, расположенным на станции управления спутниками. Характеристики фазовых погрешностей генераторов ЛО, используемых для проведения этого преобразования частоты, являются серьезными ограничениями для прикладных задач, связанных с передачей сигналов времени.

На Рисунке 6-1 изображена блок-схема стандартной архитектуры ретрансляции типа "прямая дыра" [ITU-R Handbook, 2002; На, 1990]. На этой схеме после антенны на линии вверх установлены широкополосный полосовой фильтр (ВРФ) и малошумящий усилитель (МШУ) для определения отношения усиления антенны к шумовой температуре на линии вверх (G/T), которое является основным показателем качества для спутниковой линии вверх. Затем принятый сигнал усиливается и преобразуется в полосу частот на линии вниз при помощи приемника или преобразователя (в ряде случаев включающего в себя МШУ).

РИСУНОК 6-1

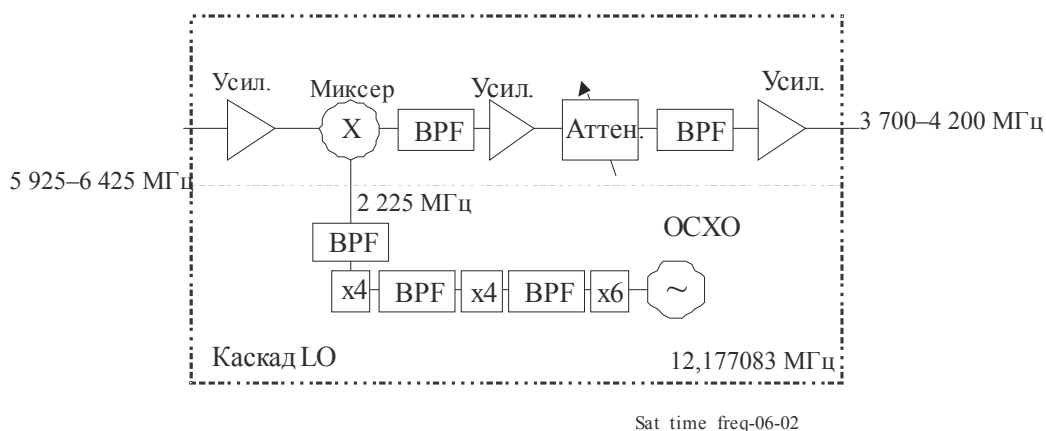


Sat_time_freq-06-01

Как отмечалось ранее, в серийных преобразователях или приемниках, как правило, применяются отдельные несинхронизированные генераторы колебаний с кварцевой стабилизацией частоты для ЛО, которые используются для преобразования частоты, а в преобразователях для правительственной связи в основном используют синтезированные генераторы ЛО, которые когерентны по фазе с отдельным генератором МО. На Рисунке 6-2 изображен типовой серийный приемник [На, 1990]. Следует отметить каскад умножения частоты ЛО, созданный на основе несинхронизированного термостатированного кварцевого генератора.

РИСУНОК 6-2

Типовой серийный приемник диапазона С



На Рисунке 6-1 изображен демультиплексор (DEMUX), установленный после преобразователя и разделяющий полную полосу частот линии вверх на отдельные полосы или каналы. В некоторых комплексах бортового оборудования демультиплексирование выполняется в преобразователях с использованием синтезированных LO, что позволяет выбирать сеансы связи на отдельных частотных каналах. Затем отдельные каналы соединяются с выходными усилителями мощности. В ряде случаев для выбора трасс маршрутизации используется коммутатор. Далее сигналы от отдельных усилителей мощности объединяются в выходном мультиплексоре (MUX) для повторной передачи при помощи антенны на линии вниз.

Для работы большинства комплексов бортового оборудования с ретрансляцией типа "прямая дыра" не требуется точное время, а точность и стабильность частоты ограничиваются значениями, которые необходимы для соответствия распределениям полос частот. Это справедливо также для тех случаев, когда коммутация TDMA выполняется через наземные или земные станции [ITU-R Handbook, 2002]. Исключением является многостанционный доступ с временным разделением каналов и спутниковой коммутацией (SS-TDMA), в котором для содействия функционированию TDMA используется коммутатор, установленный между DEMUX и MUX. В данном случае требования по отсчету времени для коммутатора могут составлять величину менее микросекунды [На, 1990].

В комплексах бортового оборудования, которые используются для измерения дальности "спутник-спутник", а также для передачи сигналов связи, существуют более высокие требования к точности и стабильности частоты. В таком оборудовании часто используются синтезированные генераторы LO, синхронизированные с задающим генератором.

6.2.2 Архитектура регенерационной ретрансляции

Архитектура регенерационной ретрансляции бортового оборудования демодулирует сигналы на линии вверх для формирования данных в полосе частот модулирующих сигналов и повторно модулирует эти данные на несущих частотах линии вниз. Поскольку не существует прямой трассы между линией вверх и линией вниз, при передаче сигналов времени через это оборудование необходимо учитывать задержку передачи через спутниковую систему цифровой обработки данных.

6.2.3 Цифровая реализация

В некоторых из новых спутниковых систем используется цифровая обработка данных даже в том случае, если они являются системами ретрансляции типа "прямая дыра". При передаче сигналов времени через эти системы должны также учитываться цифровые задержки. Трудно делать общие выводы о характеристиках передачи сигналов времени этого бортового оборудования, и нередко

подробная информация о таком оборудовании является собственностью производителя. Читателю рекомендуется обратиться к производителю конкретного оборудования.

6.2.4 Система слежения, телеметрии и управления

Система телеметрии, слежения и управления (ТТ & С) на спутнике является частью магистральной системы проверки бортовых систем спутника, поэтому подробная информация о функционировании данной системы в большинстве случаев принадлежит сторонним производителям. В этой системе используются временные коды, но данная функция, как правило, ограничивается значениями точности, которые требуются для целей диагностической привязки по времени, за исключением случаев применения доступа TDMA со спутниковой коммутацией или наличия прочих требований, в частности для навигации. Система слежения предназначена для определения местоположения и ориентации спутника. Она состоит из систем углового наведения для определения ориентации и систем измерения дальности для определения местоположения. Системы измерения дальности могут использоваться для передачи сигналов времени. Системы измерения дальности используют когерентные побочные тональные сигналы или сигналы, модулированные псевдослучайным кодом, для измерения односторонней задержки или двусторонней задержки от наземной станции до спутника способом, аналогичным тому, который используется в системе GPS (одностороннее измерение дальности). Результаты измерения дальности привязаны по времени с точностью, достаточной для выполнения расчетов орбиты и, следовательно, для передачи сигналов точного времени.

6.3 Отсчет времени и синхронизация для работы спутниковых систем

В большинстве случаев отсчет времени и синхронизация для коммерческих спутников связи являются несложными задачами. Показания задающих генераторов, как правило, привязываются вручную, что позволяет удерживать их в пределах допустимого отклонения частоты, а также дает им возможность работать в несинхронизированном режиме в течение всего полета. Независимые ретрансляционные местные генераторы (LO), применяемые в коммерческих спутниках, не являются частотно-управляемыми. Они разработаны в целях соответствия требованиям точности для распределения полос частот на весь срок службы спутника. При необходимости система отсчета времени обновляется, как правило, вручную при помощи команд с наземных станций. В спутниках правительственной связи могут применяться более сложные системы отсчета времени в связи с тем, что спутники используются для навигации, а также с учетом прочих требований. Задающие генераторы спутников правительственной связи в ряде случаев синхронизируются с наземными эталонами, а в остальных случаях работают в несинхронизированном режиме, а привязка выполняется путем обновлений частоты.

6.4 Влияние шума на линии и дефектов спутника на работу бортового оборудования ретрансляции типа "прямая дыра"

Шум и дефекты линии связи через бортовое оборудование ретрансляции типа "прямая дыра" влияют на возможность осуществления спутниковой передачи сигналов времени. Причинами возникновения шума и дефектов являются белый шум и фазовый шум, а также систематические отклонения фазы.

6.4.1 Влияние белого шума

Общее выражение, описывающее влияние белого шума на погрешность спутниковой передачи сигналов времени, может быть получено из основных уравнений, описывающих шум на спутниковой линии, а также из уравнений погрешности отсчета времени следующим образом. Если для передачи сигналов времени используется сигнал угловой частоты ω (рад/с), то погрешность показаний часов, x , при передаче сигналов времени (в секундах) может быть связана с погрешностью фазы ϕ сигнала (в радианах) известным уравнением:

$$x = \phi/\omega. \quad (6-1)$$

Этот сигнал передачи времени может представлять собой либо сам несущий сигнал, либо различные компоненты модуляции, обладающие свойствами несущей. Для белого шума стандартное отклонение φ (для однофазного измерения) задается формулой

$$\sigma_{\varphi}^2 = P_{noise} / P_{signal}, \quad (6-2)$$

где:

P_{signal} – мощность принимаемого сигнала;

P_{noise} – мощность принимаемого шума.

Таким образом, из уравнений (6-1) и (6-2) можно получить стандартное отклонение x (для отдельно взятого измерения):

$$\sigma_{x-std}^2 = P_{noise} / (P_{signal} \omega^2). \quad (6-3)$$

Используя известные уравнения линии связи и белого шума [ITU-R Handbook, 2002], можно вывести следующее выражение для отношения принимаемого сигнала к белому шуму (как для спутниковой линии вверх, так и для линии вниз) исходя из параметров линии:

$$P_{noise} / P_{signal} = kB(2r\omega_{car} / (c\omega))^2 / P_{eirp}(G/T), \quad (6-4)$$

где:

P_{eirp} – передаваемая эффективная изотропно излучаемая мощность;

G/T – отношение коэффициента усиления на приеме к шумовой температуре;

B – ограничение полосы пропускания линии связи (наименьшей);

ω_{car} – угловая несущая частота линии;

k – постоянная Больцмана; r – дальность; c – скорость света.

Таким образом, для отдельной линии

$$\sigma_{x-std}^2 = kB(2r\omega_{car} / (c\omega))^2 / P_{eirp}(G/T). \quad (6-5)$$

Поскольку компоненты влияния белого шума на линии вверх и линии вниз статистически независимы, общая величина стандартного отклонения для обеих линий (линии вверх и линии вниз) задается выражением

$$\sigma_{x-std-tot}^2 = 4 kB(\omega_{car} / (c\omega))^2 [r_{uplink}^2 / P_{eirp-ground}(G/T)_{satellite} + r_{downlink}^2 / (P_{eirp-satellite}(G/T)_{ground})], \quad (6-6)$$

где:

B – ограничение полосы пропускания для всей линии.

Уравнение (6-6) представляет погрешность показаний часов для однофазных измерений. Оценка относительного отклонения частоты за время усреднения, τ , может быть выполнена путем вычисления разности двух измерений показаний часов и деления на τ . Таким образом, стандартное отклонение или дисперсия Аллана (то же для белого шума) оценок относительного отклонения частоты за это время усреднения, τ , определяется формулой

$$\sigma_y^2 = 8 kB(\omega_{car} / (c\omega))^2 [r_{uplink}^2 / P_{eirp-ground}(G/T)_{satellite} + r_{downlink}^2 / (P_{eirp-satellite}(G/T)_{ground})]. \quad (6-7)$$

Отклонение разности (в секундах) ошибки в показаниях часов за время τ

$$\sigma_X^2 = \tau^2 \sigma_y^2 \quad (6-8)$$

и таким образом определяется уравнением:

$$\sigma_x^2 = 8 kB(\omega_{car} / (c\omega))^2 [r_{uplink}^2 / P_{eirp-ground} (G/T)_{satellite} + r_{downlink}^2 / (P_{eirp-satellite} (G/T)_{ground})]. \quad (6-9)$$

Уравнения (6-7) и (6-9) применимы как для односторонней, так и для двусторонней (для каждого сеанса передачи) спутниковой передачи сигналов времени, поскольку при использовании двусторонней системы белый шум не прекращается. Таким образом, вышеприведенные уравнения представляют собой наилучший вариант для спутниковой линии связи. Следует также отметить, что если при передаче сигналов времени используется несущая, то дрожание несущей во времени ниже, чем при использовании модуляции. Это связано с тем, что модулирующая частота всегда ниже, чем ω_{car} .

6.5 Фазовый шум спутника и систематические погрешности

Местные генераторы (ЛО) в преобразователях частоты прибавляют фазовый шум к сигналу связи. Фазовый шум и значения ухода частоты генераторов ЛО напрямую влияют на фазовую нестабильность несущей и модуляции сигнала ретранслятора. Уровень шума, близкого к синфазному, и значения ухода частоты, как правило, выше в серийных ретрансляторах, в которых применяются отдельные кварцевые генераторы. Групповая и фазовая задержка и неравномерность задержки фильтров и активных компонентов системы влияют как на модуляцию, так и на фазу несущей, хотя эти виды нестабильности связаны между собой. Основным источником этих видов нестабильности являются изменения на линиях, связанные с температурой, значениями напряжения в системе и уровнями мощности. Конкретные значения можно получить у поставщиков услуг спутниковой связи.

При двусторонней передаче сигналов времени через один и тот же ретранслятор существует высокая вероятность прекращения сдвигов ЛО и неравномерности задержки. При одновременной двусторонней передаче сигналов времени с использованием двух различных частот основная проблема заключается в неравномерности задержки по полосе пропускания канала, связанной с разбросом частоты. При последовательной двусторонней передаче сигналов времени основная проблема заключается в изменении фазы в местных генераторах (ЛО) в течение периода времени между сеансами передачи.

6.6 Заключение

Для правильного использования системы спутниковой связи при передаче сигналов времени важно понимать структуру, принципы работы и ограничения, применяемые в системе. Передача сигналов времени при помощи различных видов систем спутниковой связи успешно осуществляется за счет разработки методов, в которых максимально используются преимущества отдельных систем и сводятся к минимуму их недостатки.

Ссылки

HA, T. T. [1990] Digital Satellite Communications. McGraw-Hill, 1990.

ITU-R [2002] Handbook on Satellite Communications, Third Edition, International Telecommunication Union, Wiley & Sons, Inc.

MORGAN W.L. and GORDON G.D. [1989] Communications Satellite Handbook. Wiley & Sons, Inc.

ГЛАВА 7

ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ

	<i>Стр.</i>
7.1 Введение.....	82
7.2 Всемирное время.....	82
7.3 Эфемеридное время.....	83
7.4 Атомное время.....	83
7.5 Релятивистские шкалы времени.....	84
7.5.1 Земное время.....	84
7.5.2 Геоцентрическое координатное время.....	84
7.5.3 Барицентрическое координатное время.....	85
7.5.4 Барицентрическое динамическое время.....	87
7.6 Международные шкалы времени.....	87
7.6.1 Международное атомное время.....	88
7.6.2 Всемирное координированное время.....	91
Ссылки.....	96

7.1 Введение

Измерение времени производится при помощи трех основных методов, а именно:

- 1) на основе вращения Земли;
- 2) на основе движения небесных тел – Земли, Луны и планет;
- 3) на основе квантовой механики атома.

Каждый из этих методов неоднократно подвергался усовершенствованию по мере увеличения точности и сложности методик измерений.

Определения шкал времени и относящихся к ним терминов приведены в Рекомендации МСЭ-R TF.686-2 "Глоссарий и определения терминов времени и частоты".

7.2 Всемирное время

Время, измеренное на основе вращения Земли, называется средним солнечным временем. Отсчет времени от полночи по Гринвичскому меридиану называется всемирным временем (UT). Средние солнечные сутки номинально определяются как интервал времени между моментами успешного прохождения воображаемого среднего Солнца через заданный меридиан. Средняя солнечная секунда определяется как $1/86\,400$ средних солнечных суток.

Истинная мера угла вращения Земли относительно небесной системы координат является разновидностью всемирного времени (UT), которая называется UT1. На практике UT1 определяется не по положению Солнца, а по суточному перемещению точки весеннего равноденствия по небесной сфере в соответствии с общепринятой зависимостью, устанавливающей время UT1 на основе гринвичского среднего звездного времени (GMST). Ранее время UT1 измерялось по перемещению звезд. В настоящее время оно измеряется посредством измерений выбранных компактных точечных источников радиоизлучения при помощи интерферометрии со сверхдлинной базой (VLBI), спутникового лазерного измерения дальности (SLR) и слежения за спутниками GPS.

Определяющее выражение для UT1 на основе GMST приведено в работе [Aoki *et al.*, 1982]:

$$\text{GMST} = 24\,110.548\,41 + 8640184.812\,866 T + 0.093\,104 T^2 - 0.000\,0062 T^3, \quad (7-1)$$

где:

T – всемирное время, исчисляемое с 12 ч 1 января 2000 года. Время UT измеряется в столетиях юлианского календаря, равных 36 525 дням.

Обычно применяемая небесная система координат, принятая Международным астрономическим союзом (IAU) [Генеральная ассамблея, 1997 г.], основанная на положениях внегалактических объектов, наблюдаемых при помощи VLBI, изменила основу для времени UT1 и устранила необходимость в равноденствии.

В связи с колебаниями скорости вращения Земли время UT1 является неравномерным. Существуют три источника колебаний: постоянное увеличение продолжительности дня, вызванное приливным трением, периодические сезонные колебания и случайные флуктуации. Время UT2 – это UT1, скорректированное по сезонным колебаниям, которое определяется в секундах по формуле [Seidelmann, 1992]

$$\text{UT2} = \text{UT1} + 0.022 \sin 2\pi t - 0.012 \cos 2\pi t - 0.006 \sin 4\pi t + 0.007 \cos 4\pi t, \quad (7-2)$$

где:

t – часть бесселева года.

Однако в настоящее время UT2 практически не используется.

7.3 Эфемеридное время

Эфемеридное время (ЕТ) – это равномерная шкала времени, определяемая гравитационной теорией Ньютона, описывающей движение Земли вокруг Солнца, и представленная *Солнечными таблицами* Ньюкомба. Согласно Ньюкомбу средняя геометрическая долгота Солнца для эпохи 1900 года задается формулой [NewComb, 1895]

$$L = 279^{\circ}41'48.''04 + 129\,602\,768.''13 T + 1.''089 T^2, \quad (7-3)$$

где:

T – эфемеридное время, измеряемое в столетиях, начиная с 1900 года.

Линейный коэффициент данного выражения определяет эфемеридную секунду. Таким образом, в тропическом году 1900 года содержалось $[360 \times 60 \times 60 / 129\,602\,768,13] \times 36\,525 \times 86\,400 = 31\,556\,925,9747$ с.

В 1956 году Международный комитет мер и весов (СІРМ) дал определение секунды ЕТ как $1/31\,556\,925,9747$ тропического года на 12 час. 0 мин. января 1900 года ЕТ.

В 1960 году данное определение было ратифицировано Генеральной конференцией по мерам и весам (СGPM).

Ссылка на 1900 год не подразумевает, что он является началом отсчета средних солнечных суток, равных 84 600 с. Скорее это начало отсчета тропического года, равного 31 556 925,9747 с.

Хотя эфемеридное время определялось по положению Солнца, косвенно оно было реализовано на основе наблюдений Луны. Время ЕТ может быть определено как независимая переменная, которая приводит расположение астрономических тел, полученное согласно динамическим законам движения Ньютона, в соответствие с данными наблюдений. Таким образом, оно основано только на механике Ньютона, что предполагает использование всемирного координированного времени без учета теории относительности.

В 1960 году время ЕТ заменило UT1 для астрономических эфемерид.

7.4 Атомное время

Первый атомный стандарт на основе цезиевого пучка был введен в действие в Национальной физической лаборатории Соединенного Королевства в 1955 году. Атомные шкалы времени были созданы в Соединенных Штатах Америки Военно-морской обсерваторией и Национальным бюро стандартов США в 1956 году. За ними вскоре последовал ряд других обсерваторий и лабораторий. Спустя всего лишь семь лет после принятия в 1960 году эфемеридной секунды на СGPM в качестве основной единицы измерения времени Международной системы единиц (СИ) была принята атомная секунда. Эта секунда была определена как "продолжительность 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133". Эта величина была выведена путем сопоставления ЕТ, основанного на наблюдениях Луны, с атомной шкалой времени.

Атомное время стало основой для всех современных шкал времени и постоянно поддерживается с 1955 года в различных лабораториях, несмотря на то что до 1971 года оно не было официально утверждено в качестве международной шкалы времени. С момента создания Международного бюро времени (ВІН) в 1920 году в Парижской обсерватории (ОР) международные шкалы времени полностью базировались на астрономических наблюдениях. Единицей времени являлась секунда, и она также была основана на астрономических наблюдениях. Изобретение и функционирование в 1950-х годах цезиевых атомных стандартов и радиовещательных систем, в частности LORAN, позволяющих проводить точное международное сравнение этих стандартов, привело к возникновению первоначальной формы атомного времени (АТ).

Создание международного атомного времени (ТАІ) было рекомендовано Международным астрономическим союзом (ІАU) в 1967 году, Международным научным радиосоюзом (URSI)

в 1969 году и Международным консультативным комитетом по радио (МККР) в рамках МСЭ в 1970 году. В 1971 году 14-я Генеральная конференция по мерам и весам (CGPM) утвердила создание международного атомного времени (ТАИ) в качестве координированной шкалы времени, единичным интервалом которой является секунда международной системы единиц (СИ), определенная на вращающемся геоиде.

Более подробная информация о введении в действие международного атомного времени (ТАИ) приводится в п. 7.6.1.

7.5 Релятивистские шкалы времени

Эфемеридное время (ЕТ) являлось шкалой времени, определяемой динамическими законами движения Ньютона. Однако при этом не различались динамические шкалы времени, определяемые относительно поверхности Земли, центра Земли или центра Солнечной системы. Поэтому возникла необходимость в более точных определениях для релятивистских шкал времени, исторически являющихся производными от ЕТ. Эти дополнительные шкалы времени являются аргументами релятивистских эфемерид, используемых в астрономии и небесной механике. Обсуждение релятивистских эффектов при спутниковой передаче и распространении сигналов времени и частоты приводится в главе 9.

В 1976 году IAU принял шкалы времени для релятивистских эфемерид, так что они отличаются от ТАИ только периодическими составляющими [Muller *et al.*, 1977]. В 1979 году этим шкалам времени были присвоены названия – земное динамическое время (TDT) и барицентрическое динамическое время (TDB). В 1991 году шкала TDT была переименована и стала называться просто земным временем (TT). Кроме того, IAU принял новые шкалы времени, для каждой из которых единицей является секунда СИ. Геоцентрическое координатное время (TCG) и барицентрическое координатное время (TCB) являются шкалами времени для систем координат, начало которых находится в центре Земли и барицентре Солнечной системы соответственно [Bergeron, 1992]. В дальнейшем в эти шкалы времени были внесены уточнения, содержащиеся в резолюциях, принятых IAU в 2000 году.

7.5.1 Земное время

Земное время (TT) является временной координатой, представленной показаниями собственного времени часов на геоиде. На практике время TT реализуется на основе международного атомного времени (ТАИ), единицей которого является секунда международной системы единиц (СИ). Время TT может считаться эквивалентом времени TDT, которое отсчитывается с 0 часов 1 января 1977 года ТАИ и обеспечивает непрерывность с эфемеридным временем (ЕТ). Время TDT в 1984 году заменило ЕТ в качестве табличного аргумента основных геоцентрических эфемерид.

Поскольку TT является теоретически равномерной шкалой времени, а ТАИ – шкалой атомного времени, полученной статистически, TT и ТАИ не являются строго идентичными. Однако в пределах допуска примерно ± 10 мкс их разность является постоянной величиной. Практическая реализация времени TT

$$TT = TAI + 32,184 \text{ с.} \quad (7-4)$$

Постоянное смещение является предварительной оценкой разницы между ЕТ и UT1 при определении начала отсчета ТАИ – 1 января 1958 года. Время TT может рассматриваться как идеальная форма времени ТАИ.

7.5.2 Геоцентрическое координатное время

Геоцентрическое координатное время (TCG) – это шкала координатного времени для эфемерид относительно центра Земли, причем единицей шкалы является секунда СИ. Координатное время Δt в геоцентре (TCG) относится к собственному времени $\Delta\tau$ на геоиде (TT) как

$$\Delta t = (1 + W_0/c^2)\Delta\tau.$$

Таким образом, TCG отличается от TT на величину коэффициента масштабирования:

$$\text{TCG} - \text{TT} = L_G \Delta T, \quad (7-5)$$

где:

$$L_G = W_0/c^2 = 6,969\,290\,134 \times 10^{-10} \text{ (приблизительно } 60,2 \text{ мкс/сутки);}$$

$$\Delta T - \text{ время, прошедшее с } 0 \text{ ч ТAI } 1 \text{ января } 1977 \text{ года (JD } 244\,3144,5).$$

В 2000 году IAU переопределил время TT таким образом, чтобы оно отличалось от TCG на постоянный коэффициент $d\text{TT}/d\text{TCG} = 1 - L_G$. В 2000 году значение L_G являлось наилучшей оценкой (W_0/c^2), однако в настоящее время оно рассматривается как определяющая постоянная величина и не подлежит пересмотру в будущем [Rickmand, 2001].

7.5.3 Барицентрическое координатное время

Барицентрическое координатное время (ТСВ) – это шкала координатного времени для эфемерид относительно центра Солнечной системы, причем единицей шкалы является секунда СИ. Координатное время Δt_B в барицентрической системе координат, соответствующее собственному времени Δt , которое поддерживается часами на геоиде, составляет

$$\Delta t_B = \int_{\tau_0}^{\tau} \left(1 + \frac{1}{c^2} U(\mathbf{r}) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right) d\tau, \quad (7-6)$$

где:

- \mathbf{r} и \mathbf{v} – местоположение и скорость движения часов в барицентрических координатах;
- $U(\mathbf{r})$ – гравитационный потенциал всех тел в Солнечной системе (включая Землю), рассчитанный на геоиде.

Координатное время t_B отождествляется с ТСВ, а собственное время τ отождествляется с TT.

Значение интеграла зависит от местоположения и скорости движения часов в барицентрической системе координат. Таким образом, желательно разделить часть, зависящую от часов, и часть, не зависящую от часов.

При таком упрощении \mathbf{r} и \mathbf{v} могут быть выражены как

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_E + \mathbf{R} \text{ и } \mathbf{v} = \mathbf{v}_E + \dot{\mathbf{R}},$$

где:

- \mathbf{r}_E и \mathbf{v}_E – местоположение и скорость центра массы Земли в барицентрических координатах;
- \mathbf{R} и $\dot{\mathbf{R}} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}$ – местоположение и скорость движения часов в геоцентрических координатах.

Суммарный потенциал равен

$$U(\mathbf{r}) = U_E(\mathbf{r}) + U_{ext}(\mathbf{r}),$$

где:

- U_E – ньютоновский потенциал Земли;
- U_{ext} – внешний ньютоновский потенциал всех тел Солнечной системы, кроме Земли.

Кроме того, $U_{ext}(\mathbf{r}) \approx U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \nabla U_{ext} \cdot \mathbf{R}$ и $\mathbf{v}_E \cdot \dot{\mathbf{R}} = (d/dt_B)(\mathbf{v}_E \cdot \mathbf{R}) - \mathbf{a}_E \cdot \mathbf{R}$,

где:

$$\mathbf{a}_E = \nabla U_{ext} - \text{ускорение Земли.}$$

Таким образом [Thomas, 1975; Moyer 1971 and 1981],

$$\Delta t_B \approx \Delta \tau + \frac{1}{c^2} \int_{t_{B_0}}^{t_B} \left(U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right) dt_B + \frac{1}{c^2} W_0 \Delta \tau + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E), \quad (7-7)$$

где:

- первый член – собственное время, которое измеряется часами на геоиде;
- второй член представляет собой суммарное воздействие красного смещения и замедления времени в геоцентре по отношению к барицентру и не зависит от показаний часов;
- третий член является разницей во времени между часами в геоцентре и часами на геоиде;
- четвертый член зависит от местоположения часов.

В пределах плоского пространства-времени это соответствует поправкам к синхронизации часов по специальной теории относительности в движущейся геоцентрической системе отсчета при наблюдении из барицентрической системы отсчета. Что касается часов на геоиде, их суточные колебания имеют амплитуду 2,1 мкс. Аннулирование двух членов, соответствующих ускорению, является проявлением *принципа эквивалентности* для свободно падающих систем отсчета.

Этот интеграл может быть рассчитан путем численного интегрирования эфемерид планет и Луны либо может быть представлен аналитической формулой. Он выражается как сумма секулярного члена $L_C \Delta T$ и остальных периодических членов P .

Таким образом, отношение между TCB и TT равно (Рекомендация МСЭ-R TF.686-2)

$$\begin{aligned} \text{TCB} - \text{TT} &= \frac{1}{c^2} \int_{t_{B_0}}^{t_B} \left(U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right) dt_B + L_G \Delta T + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) = \\ &= L_C \Delta T + P + L_G \Delta T + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E). \end{aligned} \quad (7-8)$$

Отношение между TCB и TCG равно

$$\text{TCB} - \text{TCG} = (\text{TCB} - \text{TT}) - (\text{TCG} - \text{TT}).$$

Таким образом,

$$\text{TCB} - \text{TCG} = \frac{1}{c^2} \int_{t_{B_0}}^{t_B} \left(U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right) dt_B + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) = L_C \Delta T + P + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E), \quad (7-9)$$

где:

$$L_C = 1,480\,826\,867\,41 \times 10^{-8} \text{ (приблизительно } 1,28 \text{ мс/сутки) [Irwin and Fukushima, 1999].}$$

Для достижения точности, равной 100 нс, должны быть включены более ста периодических членов [Fairhead *et al.*, 1998]. В первом приближении

$$\frac{1}{c^2} \int_{t_{B_0}}^{t_B} \left(U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right) dt_B \approx \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM_S}{a_E} \Delta T + \frac{2}{c^2} \sqrt{GM_S a_E} e \sin E, \quad (7-10)$$

где:

- GM_S – гравитационная постоянная Солнца;
- a_E и e – большая полуось орбиты и эксцентриситет Земли.

Первый член – это приближение к $L_C \Delta T$. Второй член – это основной периодический член P , который имеет амплитуду 1,7 мс.

7.5.4 Бариецентрическое динамическое время

Бариецентрическое динамическое время (TDB) также является бариецентрическим координатным временем. Однако согласно резолюции IAU 1976 года разница между временем TDB и временем TT (которое в то время называлось TDT) должна включать только периодические члены. Таким образом, шкала скорости хода координатного времени изменяется следующим образом:

$$\Delta t'_B = (1 - L_B) \Delta t_B,$$

где:

$\Delta t'_B$ – отождествляется с TDB;

Δt_B – отождествляется с TCB.

Разница между TCB и TDT равна

$$\text{TCB} - \text{TDB} = L_B \Delta T. \quad (7-11)$$

Отношение между TDB и TT равно $\text{TDB} - \text{TT} = (\text{TCB} - \text{TT}) - (\text{TCB} - \text{TDB})$. Таким образом,

$$\begin{aligned} \text{TDB} - \text{TT} &= \frac{1}{c^2} \int_{t_{B0}}^{t_B} \left(U_{ext}(\mathbf{r}_E) + \frac{1}{2} v_E^2 \right) dt_B + L_G \Delta T + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) - L_B \Delta T = \\ &= L_C \Delta T + P + L_G \Delta T + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_E \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_E) - L_B \Delta T, \end{aligned} \quad (7-12)$$

причем в этом уравнении не содержится секулярных членов, если $L_B \approx L_C + L_G$. Еще одна шкала для релятивистских эфемерид, которая называется T_{eph} , используется JPL [Standish, 1998] и близка к TDB. Если интеграл вычисляется с использованием планетарных эфемерид, выраженных через T_{eph} в качестве аргумента, его следует разделить на коэффициент $1 - L_B$.

Скорость хода времени TDB относительно TCB равна

$$\left\langle \frac{dTDB}{dTCB} \right\rangle = \left\langle \frac{dTDB}{dT} \right\rangle \frac{dT}{dTCG} \left\langle \frac{dTCG}{dTCB} \right\rangle, \quad (7-13)$$

где:

$\langle \rangle$ обозначает долгосрочное среднее, взятое для геоцентра;

значение L_B получено с помощью отношения

$$1 - L_B = (1 - L_G)(1 - L_C),$$

поскольку $\langle dTDB/dTCB \rangle = 1 - L_B$;

$$dT/dTCG = 1 - L_G;$$

$$\langle dTCG/dTCB \rangle = 1 - L_C;$$

$$\langle dTDB/dT \rangle = 1.$$

Таким образом, $L_B = 1,550\,519\,767\,72 \times 10^{-8}$ (приблизительно 1,34 мс/сутки).

Коэффициент $1 - L_B$ устанавливает отношение эфемеридных единиц времени и расстояния в эфемеридах, выраженных через TDB, и соответствующих единиц СИ.

7.6 Международные шкалы времени

Развитие международных сетей электросвязи и компьютерных сетей, в особенности глобальных электронных навигационных систем, требует применения высокоточных синхронизированных международных шкал времени. Как следствие, соответствующие международные организации разработали и утвердили следующие основные международные шкалы времени:

- Международное атомное время (TAI);
- Всемирное координированное время (UTC).

7.6.1 Международное атомное время

Началом отсчета международного атомного времени (TAI) является 1 января 1958 года. TAI определяется как шкала атомного времени, созданная в бюро ВРМ на основании показаний порядка 400 атомных часов, работающих приблизительно в 60 лабораториях. В дальнейшем она была охарактеризована как [ВРМ, 1981] шкала координатного времени, определяемая в геоцентрической системе отсчета, причем единицей шкалы является секунда СИ, реализованная на вращающемся геоиде. Шкала TAI стала расширением шкалы атомного времени, поддерживаемой ВИН, которая постоянно существовала с 1955 года.

Создание шкалы TAI было рекомендовано Международным астрономическим союзом (IAU) в 1967 году, Международным научным радиосоюзом (URSI) в 1969 году и Международным консультативным комитетом по радио (МККР) МСЭ в 1970 году. В 1971 году 14-я Генеральная конференция по мерам и весам (CGPM) утвердила создание шкалы TAI.

TAI является действующей шкалой времени, созданной на основе результатов сравнения часов, предоставляемых для ВРМ лабораториями-участниками, и специального алгоритма под названием ALGOS. В дальнейшем TAI была определена как шкала координатного времени в геоцентрической системе отсчета, причем единицей шкалы является секунда СИ, реализованная на вращающемся геоиде. Тот факт, что TAI – это шкала координатного времени, был зафиксирован Консультативным комитетом по определению секунды (CCDS) в 1980 году. В 1997 году CCDS был переименован в Консультативный комитет по времени и частоте (CCTF). CCDS предоставил также необходимую информацию по коррекции для формирования TAI с релятивистской точки зрения и для использования этой шкалы в системах отсчета, не являющихся наземными. Точность TAI является основным аспектом в поддержании секунды СИ и обеспечении надежной шкалы в долгосрочном плане. Оптимизация долговременной стабильности выполняется за счет кратковременной доступности. При расчете TAI используются данные за длительный период. Показания часов предоставляются в ВРМ по дням, измененная юлианская дата которых заканчивается на 4 и 9.

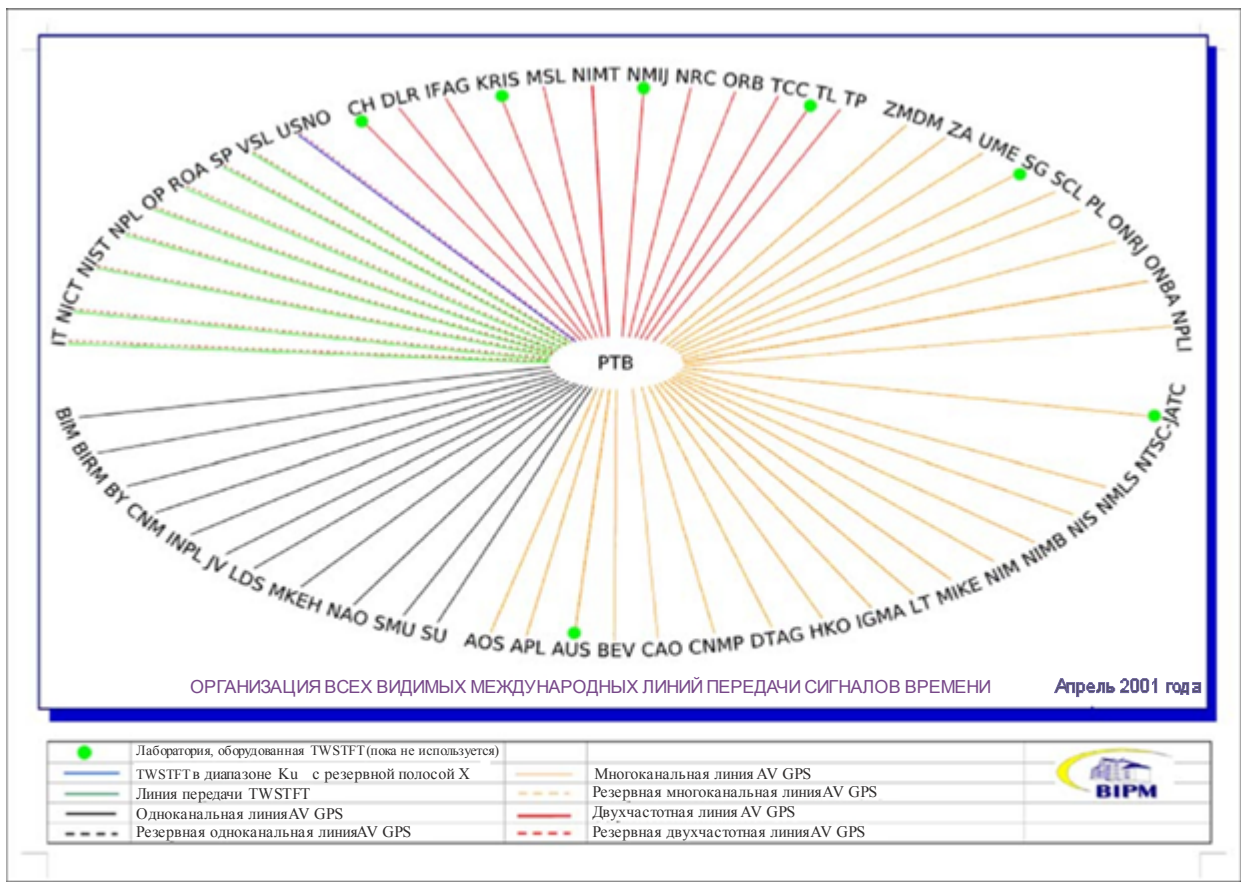
Для сравнения часов используются два метода передачи сигналов времени:

- a) сравнение местного времени UTC с временем GPS при помощи слежения со спутника GPS; или
- b) сравнение двух значений местного UTC (п. 7.6.2) при помощи TWSTFT.

Линии передачи сигналов времени для сравнений часов организуются ВРМ в соответствии со схемой, представленной на Рисунке 7-1. При расчете шкалы используются блоки данных, охватывающие 30 дней. Для размещения эффективного времени интеграции шкалы при переходе от порога дрожания к модуляции частоты случайных блужданий цезиевых часов был выбран период 30 дней. Следовательно, стабильность не может быть повышена путем увеличения времени интеграции. Период 30 дней является достаточным, для того чтобы сгладить шум, создаваемый линиями передачи сигналов времени и белым шумом частотной модуляции часов.

РИСУНОК 7-1

Международные линии передачи сигналов времени между участвующими центрами



Sat_time_freq-07-01

Определение ТАИ производится в три этапа.

- Этап 1. Расчет с применением постобработки и итерационного метода промежуточной шкалы, известной как *echelle atomique libre* (EAL) или свободная атомная шкала, в которой используются результаты сравнения часов и алгоритм ALGOS.
- Этап 2. Оценка продолжительности единицы шкалы EAL с использованием информации первичных стандартов частоты и оптимального фильтра.
- Этап 3. Получение ТАИ из EAL путем применения, если это необходимо, поправок к интервалу шкалы EAL для получения значений, максимально близких к секунде СИ. Коррекция единицы шкалы называется "*привязка частоты*" и при необходимости выполняется ежемесячно путем применения переменной поправки с максимальным размером шага от месяца к месяцу, равным 7×10^{-16} или менее.

Ниже приведено краткое описание процедуры создания шкалы ТАИ. Для получения более подробной информации см. [Azoubib *et al.*, 1977].

1 Структура TAI. Время, t , EAL $f(t)$ определяется на основе показаний $h_i(t)$ группы из N часов, H_i , следующим образом:

$$EAL(t) = \frac{\sum_{i=1}^N p_i [h_i(t) + h'_i(t)]}{\sum_{i=1}^N p_i}, \quad (7-14)$$

где:

- p_i – статистический вес, присвоенный часам H_i ;
- $h'_i(t)$ – временная поправка, предназначенная для обеспечения непрерывности времени и частоты шкалы при изменении веса отдельных часов или общего количества часов.

Это выражение не может использоваться напрямую, так как результаты измерений, обеспечивающие основные данные, являются не показаниями отдельных часов, а результатами сравнения между парами часов. В момент времени t медленно изменяющиеся различия $\zeta_{ij}(t)$ между показаниями часов H_i и H_j записываются в виде

$$\zeta_{ij}(t) = h_i(t) - h_j(t). \quad (7-15)$$

Затем из EAL выводится набор N значений разности $x_i(t)$, определяемый выражением

$$x_i(t) = EAL(t) - h_i(t), \quad (7-16)$$

где:

- x_i – различия между показаниями отдельных часов и временем, определяемым EAL.

Затем разница может быть выражена как

$$x_i(t) - x_j(t) = -\zeta_{ij}(t) \quad (7-17)$$

и уравнение (7-14) может быть преобразовано в

$$\sum_{i=1}^N p_i x_i(t) = \sum_{i=1}^N p_i h'_i(t). \quad (7-18)$$

На практике для решения последних двух выражений используется система без резервирования, состоящая из $N - 1$ линий передачи сигналов времени.

2 Процедура взвешивания. Весовой коэффициент, присвоенный каждым часам, вычисляется таким образом, чтобы обеспечить долговременную стабильность полученной в результате шкалы и свести к минимуму годовые колебания и уход частоты относительно первичных стандартов частоты. Важной особенностью алгоритма ALGOS является то, что оценка весового коэффициента часов хотя и основана на данных, охватывающих целый год, учитывает данные за период 30 дней, для которого рассчитывается EAL. Таким образом, можно оценивать часы по их фактическим параметрам в течение интервала времени, на который устанавливается EAL. Данная процедура также позволяет учитывать любые отклонения от нормы, которые могут наблюдаться в отдельных часах, путем регулирования их весового коэффициента вплоть до обнуления. Это оказалось полезным во многих случаях.

Как правило, взвешенное значение базируется на отклонении $\sigma^2(6, \tau)$ средней скорости хода [Thomas Azoubib, 1996] по отношению к EAL, рассчитанному на основе выборок за один месяц. Это расхождение было выбрано взамен обычной разницы в паре, поскольку оно приводит к большему снижению весового коэффициента часов, демонстрирующих уход частоты. Взвешенные значения получаются непосредственно из выражения

$$p_i = \frac{1000}{\sigma_i^2(6, \tau)} \quad (7-19)$$

(σ_i измеряется в нс/сутки) при условии, что в текущий 30-дневный период не выявлено отклонений от нормы. В случае обнаружения отклонений от нормы весовой коэффициент обнуляется. Максимальный зафиксированный весовой коэффициент составляет $2,5/N$ (N – количество участвующих часов за месяц вычислений). Максимальный весовой коэффициент выбирается в целях обеспечения значительного смещения шкалы в сторону лучших часов, в то же время не позволяя ни одним из них стать преобладающими [Thomas and Azoubib, 1996].

3 *Предварительный расчет скорости хода часов.* Член, представляющий коррекцию времени $h'_i(t)$, состоит из двух компонентов:

$$h'_i(t) = a_i(t_0) + B_{ip}(t)(t - t_0), \quad (7-20)$$

где:

$a_i(t_0)$ – значения разницы во времени между часами H_i и EAL в момент времени t_0 , который является началом 30-дневного периода;

$B_{ip}(t)$ – прогнозируемая разница в скорости хода между H_i и EAL для периода времени с t_0 по t , где скорость хода часов H_i определяется выражением

$$\text{rate} = \frac{a_i(t_0 - t) - a_i(t_0)}{(t - t_0)}. \quad (7-21)$$

Предварительная оценка $B_{ip}(t)$ получается из одноэтапного линейного прогноза, основанного на предыдущем значении. Это оправдывается тем, что в течение 30-дневного периода шум доминирующих часов представляет собой случайное блуждание, для которого наиболее вероятным значением оценки на следующий период является значение предыдущего периода.

После того как задана наилучшая оценка EAL, преобразование в TAI производится путем определения того, отличается ли в достаточной степени скорость хода EAL от скорости хода лучших первичных стандартов, тем самым обеспечивая коррекцию путем "привязки". С 2005 по 2008 год изменения частоты с максимальным значением $0,6 \times 10^{-15}$ применялись почти каждый месяц.

И наконец, результаты этих расчетов публикуются в ежемесячном *Circular T*, который распространяется среди лабораторий-участников. Фрагмент одного из них изображен на Рисунке 7-2. Значения [UTC-UTC(k)] для лабораторий, участвующих в процессе, публикуются каждые пять дней вместе с соответствующими погрешностями, значения которых являются постоянными в течение одного месяца, к которому относятся вычисления.

7.6.2 Всемирное координированное время

Система измерения Всемирного времени на базе атомной секунды СИ называется UTC. В 1961 году координация международных атомных шкал времени была возложена на ВИН. В 1988 году эти обязанности от ВИН перешли к ВIRM.

Первоначально как смещения скорости хода часов, так и периодические корректировки шага применялись при широкоэвещательной передаче сигналов времени для удержания UTC в пределах 0,1 с относительно UT2. Нынешний формат UTC был введен в 1972 году, смещения скорости хода в этой системе были прекращены, и шаги в целую "дополнительную секунду" заменили

применявшиеся в то время шаги в 100 мс или 200 мс, поскольку они были слишком частыми и слишком малыми [Nelson, 2001]. Время UTC по скорости хода равно TAI, но отличается на целое число секунд, так что оно всегда находится в пределах 0,9 с относительно UT1.

РИСУНОК 7-2

Выдержка из *Circular T* бюро BIPM

CIRCULAR T 208
2005 MAY 12, 17h UTC

ISSN 1143-1393

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
ORGANISATION INTERGOUVERNEMENTALE DE LA CONVENTION DU METRE
PAVILLON DE BRETEUIL F-92312 SEVRES CEDEX TEL. +33 1 45 07 70 70 FAX. +33 1 45 34 20 21 tai@bipm.org

1 - Coordinated Universal Time UTC and its local realizations UTC(k). Computed values of [UTC-UTC(k)].
From 1999 January 1, 0h UTC, TAI-UTC = 32 s.

Date 2005	0h UTC	MAR 30	APR 4	APR 9	APR 14	APR 19	APR 24	APR 29	Uncertainty/ns		
MJD		53459	53464	53469	53474	53479	53484	53489	uA	uB	u
Laboratory k		[UTC-UTC(k)]/ns							(1)		
AOS (Borowiec)		8.2	12.1	17.1	22.7	19.0	16.0	16.8	1.6	5.2	5.4
APL (Laurel)		-18.6	-23.3	-13.6	-2.0	4.6	39.3	26.5	1.6	5.3	5.5
AUS (Sydney)		-541.1	-547.9	-556.5	-561.7	-574.0	-590.8	-608.2	3.2	6.4	7.2
BEV (Wien)		97.8	88.7	80.6	70.6	63.0	58.2	46.3	1.6	5.2	5.4
BIRM (Beijing)		-145.0	-170.1	-192.3	-217.0	-238.1	-260.8	-288.4	2.8	20.4	20.6
CAO (Cagliari)		-2890.4	-2883.7	-2871.8	-2865.4	-2845.1	-2819.2	-2794.1	1.6	7.2	7.4
CH (Bern)		-21.7	-24.4	-24.6	-21.4	-14.6	-9.4	-0.7	0.8	5.2	5.3
CNM (Queretaro)		36.7	44.2	47.2	52.2	52.6	59.5	78.3	5.0	20.3	20.9
CNMP (Panama)		-2514.2	-2543.1	-2584.6	-2629.9	-2655.4	-2690.8	-2721.4	4.0	7.2	8.2
CSIR (Pretoria)		-3393.0	-3468.5	-3548.2	-3628.6	-3718.2	-3800.9	-3891.4	3.0	20.1	20.3
DLR (Oberpfaffenhofen)		-40.4	-46.1	-44.7	-46.1	-62.1	-62.9	-71.4	0.8	5.2	5.3
DTAG (Darmstadt)		254.6	274.3	283.9	273.2	267.7	271.2	273.3	3.0	10.1	10.5
HKO (Hong Kong)		93.7	71.6	68.9	55.1	45.9	45.2	51.0	3.2	6.4	7.2
IEN (Torino)		-116.2	-116.2	-109.3	-104.5	-99.3	-98.1	-100.5	0.7	1.9	2.0
IFAG (Wetzell)		-348.7	-340.9	-340.6	-340.4	-332.8	-324.9	-314.8	0.8	5.2	5.3
IGMA (Buenos Aires)		351.7	353.5	346.2	354.1	361.3	366.9	367.4	5.0	19.9	20.5
INPL (Jerusalem)		-264.7	-311.1	-347.5	-387.4	-432.2	-478.0	-523.6	4.0	10.1	10.9
JATC (Lintong)		-10237.5	-10227.2	-10209.8	-10197.3	-10180.0	-10167.2	-10155.8	2.7	21.0	21.2
JV (Kjeller)		-6316.2	-6310.2	-6252.7	-6243.4	-6219.6	-6173.5	-6177.2	5.0	20.1	20.7
KRIS (Daejeon)		-3.8	-4.2	0.9	2.5	3.4	5.7	6.0	2.8	6.4	7.0

Sat_time_freq-07-02

Таким образом, сигналы времени теперь предоставляют как единичный интервал секунды СИ, так и приближенное значение UT1 в одном и том же сеансе передачи. Дополнительная поправка DUT1, являющаяся числом, целым кратным 0,1 с, может быть включена в передаваемый сигнал времени посредством двойных импульсов таким образом, что будучи прибавленной к UTC, представляет собой наилучшее приближение к UT1. Система UTC была признана в качестве основы гражданского времени, что отражено в резолюциях различных организаций и научных союзов, подписавших международные договоры, таких как CGPM, МСЭ и IAU, а также в большинстве законодательных кодексов стран мира.

Секунда СИ, которая в настоящее время определяется исходя из периода перехода между состояниями атома цезия, была выбрана для обеспечения соответствия эфемеридной секунде в пределах экспериментальной погрешности. Однако исследования на основе записей о древних затмениях и современные наблюдения, сделанные при помощи телескопов, показывают, что продолжительность дня медленно увеличивается. За последние 1000 лет каждое столетие она увеличивается со скоростью около 1,4 мс в день. Таким образом, на протяжении XVIII и XIX веков эфемеридная секунда, основанная на Солнечных таблицах Ньюкомба, по сути, была равна средней солнечной секунде.

В соответствии с долгосрочной тенденцией примерно в 1820 году средняя солнечная секунда была равна секунде СИ [Stephenson, 1997]. Эта дата является также приблизительным средним началом

отсчета данных, проанализированных Ньюкомбом, которые охватывают период с 1750 по 1892 год. С 1820 года продолжительность дня увеличилась примерно на 2,5 мс. Таким образом, средние солнечные сутки в настоящее время равны примерно 86 400,0025 с, что превышает календарный день, в точности равный 86 400 с. В течение одного года разница в 0,0025 с накапливается и составляет примерно одну целую секунду, которая компенсируется введением дополнительной секунды. Однако из-за случайных флуктуаций вращения Земли введение дополнительной секунды не может быть спрогнозировано заранее, и частота случаев ее применения является переменной величиной.

Время UTC было разработано МККР МСЭ (МККР был объединен с МКПЧ и переименован в МСЭ-R), который в 1972 году рекомендовал его создание в качестве компромиссной шкалы времени между UT и TAI. Данная шкала времени служит для координации местного времени, поддерживаемого различными центрами отсчета времени и странами, и обеспечивает достаточно близкое соответствие со шкалой UT1. Координация была необходима в связи с развитием электронных навигационных систем, в частности Loran, которые могли бы проводить достоверные измерения точного времени на глобальных расстояниях. Конкретное определение UTC приведено в Рекомендации МСЭ-R TF.460 "Излучения стандартных частот и сигналов времени". С момента принятия времени UTC его использование в рамках радио- и телекоммуникационного сообщества существенно возросло, поскольку электронные системы навигации и связи совершенствовались, для того чтобы они могли обеспечивать измерение времени с высокой точностью в глобальном масштабе, в свою очередь испытывая потребность в высокоточном координированном времени (Рекомендации МСЭ-R TF.535-2 и МСЭ-R TF.767-2).

В резолюциях ряда научных союзов и организаций, подписавших международные договоры, таких как IAU, МСЭ, URSI, CGPM, а также органов стандартизации, например ISO, время UTC было признано международным эталоном времени. В 1978 году МККР утвердил новую версию Рекомендации 486 МККР (в настоящее время это Рекомендация МСЭ-R TF.486-2 "Использование частоты UTC в качестве эталона при излучении стандартных частот и сигналов времени"), а на ВАРК-79 было принято решение, что UTC должно использоваться для обозначения времени во всей международной деятельности, касающейся электросвязи [Заключительные акты, 1979 г.].

В Регламенте радиосвязи (издание 2008 г.) UTC определяется следующим образом.

"1.14 *Всемирное координированное время (UTC)*. Шкала времени, основанная на секунде в системе единиц (СИ), определенная в Рекомендации МСЭ-R TF.460-6. (ВКР-03)

Для большинства практических случаев, связанных с Регламентом радиосвязи, UTC эквивалентно среднему солнечному времени на начальном (нулевом) меридиане (долгота 0°), ранее выражавшемуся как GMT."

В настоящее время UTC является общепринятым эталоном для спутниковых применений времени и частоты.

7.6.2.1 Реализация Всемирного координированного времени

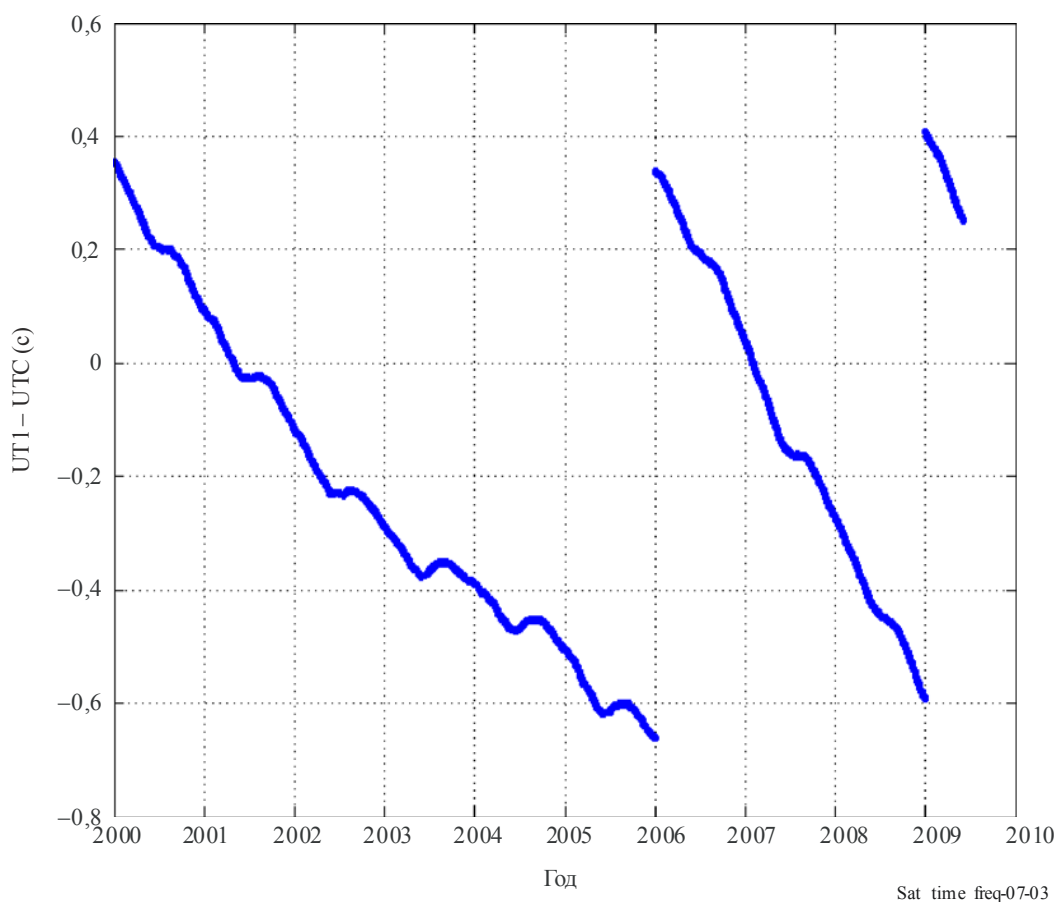
UTC является версией TAI, которая корректируется путем добавления или вычитания шагов длительностью в одну секунду, называемых "дополнительными секундами". В целях поддержания тесной взаимосвязи UTC с UT1, изображенной на Рисунке 7-3, наряду с UTC должна передаваться в вещательном режиме или рассылаться поправка, известная как DUT1. DUT1 должна быть *прогнозируемым* значением разности UT1 – UTC, целой кратной 0,1 с. Затем пользователь UT1 мог подкорректировать переданное значение UTC к значению UT1 с точностью < 0,1 с. UT1 – это версия всемирного времени, скорректированная для учета движения полюсов вследствие неравномерного вращения Земли. В прошлом UT1 определялось по времени прохождения звезд через меридиан с поправкой на сезонные колебания. В настоящее время определение UT1 основано на космических спутниковых технологиях и обеспечивает измерение скорости вращения Земли и соотношений ориентации Земли со временем суток UT1. Более подробно история и развитие этих шкал времени рассматриваются в публикации "The Leap Second: Its History and Possible Future" [Nelson *et al.*, 2001].

Таким образом, UTC является шкалой атомного времени, которая совпадает по скорости хода часов с TAI, но отличается на целое количество секунд. По состоянию на июнь 2008 года UTC отстает от TAI на 33 с. Решение о введении дополнительной секунды принимается исходя из изменения скорости вращения Земли, в результате которого накапливается ошибка максимум в 0,9 с. Международная служба вращения и систем координат Земли (IERS) осуществляет наблюдение за вращением Земли, определяет момент превышения порогового значения и консультирует ВРМ, которое поддерживает UTC с 1988 года – с тех пор как ответственность за TAI перешла от ВИН. На Рисунке 7-3 показаны отклонения UTC от UT1 за последние десять лет. Следует обратить внимание на введение дополнительных секунд в конце 2005 года и в 2008 году, соответственно.

Первоначальной формой UTC, опробованной до 1972 года, была попытка приближения к UT1 путем регулировки смещения частоты и настроек с шагом в дробных частях секунд для согласования вещательной передачи сигналов атомного времени с вращением Земли. Тесное сопряжение с вращением Земли считалось необходимым для содействия астрономической навигации, однако в системе возникли сложности с координацией между радиовещательными станциями и предоставлением равномерного точного эталонного времени. В настоящее время принята система UTC, в которой используются шаги с целым количеством дополнительных секунд без смещения частоты, что позволяет приблизиться к началу отсчета UT1 и интервалу секунды СИ в рамках одной шкалы времени.

РИСУНОК 7-3

Смещение UT1 – UTC в период 2000–2009 годов



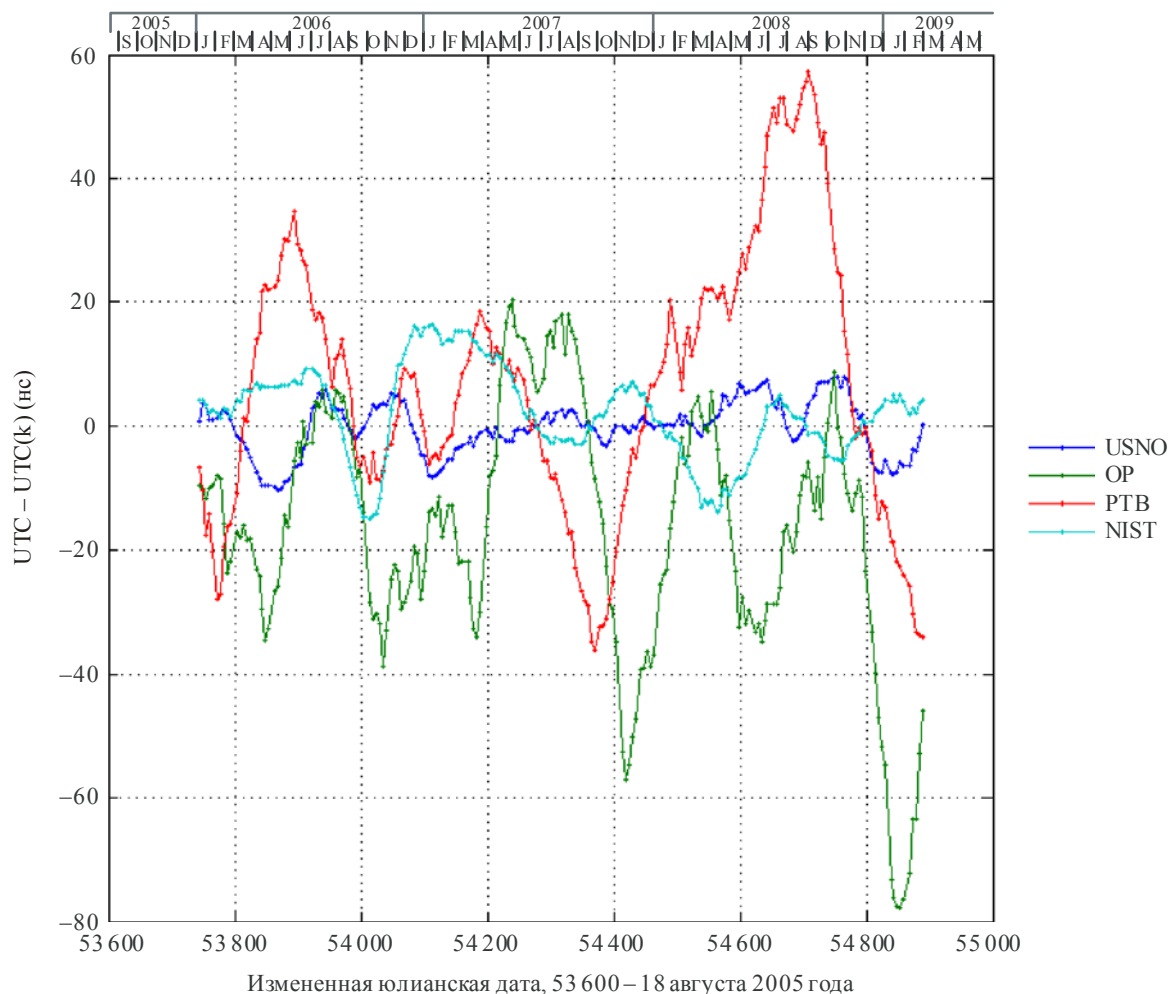
Поскольку для нужд служб радиовещания генерация и передача сигналов должны выполняться теми же часами и генераторами колебаний, которые создают сигналы хронометрии, существует потребность в шкале "реального времени" или мгновенной шкале времени. Для того чтобы

предоставить такие сигналы "реального времени", центр отсчета времени может выполнять локальное представление UTC при условии, что результаты измерения сигналов часов будут отправлены в ВРМ и учтены при определении международной шкалы времени. Для подобных локальных приближений к UTC в лаборатории k , предоставляющих данные в целях формирования TAI и UTC в ВРМ, используется обозначение UTC(k). Например, UTC (USNO) – это передаваемый прогноз UTC в реальном времени, который в настоящее время поддерживается Военно-морской обсерваторией США.

Аналогичные системы актуализации реального времени в других центрах, таких как Парижская обсерватория (OP), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) и Национальный институт стандартов и технологий США (NIST), вносят вклад в формирование данных по результатам измерений на основе взвешенных показаний часов, используемых ВРМ [Quinn, 1991]. UTC, используемое без последующих уточняющих скобок, определяет ссылку на окончательное международное значение, установленное ВРМ. Данные процедуры и определения описываются в Рекомендации МСЭ-R TF.536-2 "Системы обозначений шкал времени". Окончательное определение UTC не имеет физического выражения и доступно после задержки на срок от двух до четырех недель в виде величины смещения относительно представлений, поддерживаемых участвующими лабораториями. Значения как для TAI, так и для UTC распространяются в ежемесячном издании ВРМ, которое называется *Circular T*. Различия между значениями UTC(k) институтов, упомянутых выше, и UTC в том виде, как они опубликованы в *Circular T* бюро ВРМ, показаны на Рисунке 7-4.

РИСУНОК 7-4

Разница UTC – UTC(k), опубликованная в *Circular T* бюро ВРМ (ежедневные значения)



Sat_time_freq-07-04

Ссылки

- AOKI S., GUINOT B., KAPLAN G.H., KINISHITA H., MCCARTHY D. D. and SEIDELMANN P.K. [1982] The New Definition of Universal Time. *Astron. Astrophys.* 105, p. 359-361.
- AZOUBIB J. [2001] A revised way of fixing an upper limit to clock weights in TAI computation. *Report to the 15th meeting of the CCTF*, available on request to the BIPM.
- AZOUBIB J., GRANVEAUD M., GUINOT B. [1977] Estimation of the scale unit duration of time scales. *Metrologia*, Vol. 13, p. 87-93.
- BERGERON J. (editor) [1992], *Trans. Int. Astron. Union*, Vol. XXIB, Proc. 21st General Assembly, Buenos Aires, 1991, Reidel, Dordrecht, p. 41-52.
- BIPM *Com. Cons. Déf. Seconde* 9, 15 (1980), *Metrologia* 17, 70, 1981.
- FAIRHEAD L., BRETAGNON, P. and LESTRADE J.-F. [1998] The Time Transformation TB – TT: An Analytical Formula and Related Problem of Convention, in *The Earth's Rotation and Reference Frames for Geodesy and Geophysics*, edited by A. K. Babcock and G. A. Wilkins, Kluwer, Dordrecht, p. 419-426.
- FUKUSHIMA T. [1995] Time Ephemeris. *Astron. Astrophys.* 294, p. 895-906.

- IRWIN A.W. and FUKUSHIMA T. [1999] A Numerical Time Ephemeris of the Earth. *Astron. Astrophys.* **348**, p. 642-652.
- MOYER T.D. [1971/1981] Transformation from Proper Time on Earth to Coordinate Time in Solar System Barycentric Space-Time Frame of Reference. *Celestial Mech.* **23**, p. 33-68.
- MULLER E.A. and JAPPEL A. (editors) [1977], Trans. Int. Astron. Union, Vol. XVIB, Proc. 16th General Assembly, Grenoble, 1976, Reidel, Dordrecht, p. 60.
- NELSON R.A., MCCARTHY D. D., MALYS S., LEVINE J., GUINOT B., FLIEGEL H.F., BEARD R.L. and BARTHOLOMEW T.R. [2001] The Leap Second: Its History and Possible Future. *Metrologia* **38**, p. 509-529.
- NEWCOMB S. [1895] Astronomical Papers Prepared for the Use of the American Ephemeris and Nautical Almanac. Vol. VI, Part I: *Tables of the Sun*, U. S. Govt. Printing Office, Washington D.C, p. 9.
- QUINN T.J. [July 1991] The BIPM and the Accurate Measurement of Time. *Proc. IEEE*, 79(7), p. 894-905.
- RICKMAND H. (editor) [2001] Trans. Int. Astron. Union, Vol. XXIVB, Proc. 24th General Assembly, Manchester, 2000, Astron. Soc. Pacific, San Francisco, p. 37-49.
- SEIDELMANN P K. (editor) [1992] Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac. University Science Books, Mill Valley, CA.
- STANDISH E.M. [1998] Time Scales in the JPL and CfA Ephemerides. *Astron. Astrophys.* **336**, p. 381-384.
- STEPHENSON F.R. [1997] Historical Eclipses and Earth's Rotation. Cambridge, New York, p. 28.
- The XXIIIrd International Astronomical Union General Assembly [1997] Resolution B2 On the International Celestial Reference System (ICRS). Kyoto, Japan.
- THOMAS C. and AZOUBIB J. [1996] TAI computation: study of an alternative choice for implementing an upper limit of clock weights. *Metrologia*, **33**, p. 227-240.
- THOMAS J.B. [1975] Reformulation of the Relativistic Conversion between Coordinate Time and Atomic Time. *Ap. J.* **80**, p. 405-411.

Публикации МСЭ-R

- МСЭ-R [1979]. Заключительные акты Всемирной административной радиоконференции (ВАРК-79), Женева.
Регламент радиосвязи, издание 2008 г. Том 1, Международный союз электросвязи, 2008 г.
(<http://www.itu.int/publ/R-REG-RR-2008/en>).
- Рекомендация МСЭ-R TF.458-3 – Международное сличение шкал атомного времени
(<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.458-3-199802-I/en>).
- Рекомендация МСЭ-R TF.460-6 – Излучения стандартных частот и сигналов времени
(<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.460-6-200202-I/en>).
- Рекомендация МСЭ-R TF.486-2 – Использование частоты UTC в качестве эталона при излучении стандартных частот и сигналов времени (<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.486-2-199802-I/en>).
- Рекомендация МСЭ-R TF.535-2 – Использование термина UTC
(<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.535-2-199802-I/en>).
- Рекомендация МСЭ-R TF.536-2 – Системы обозначений шкал времени
(<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.536-2-200305-I/en>).
- Рекомендация МСЭ-R TF.686-2 – Глоссарий и определения терминов времени и частоты
(<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.686-2-200202-I/en>).
- Рекомендация МСЭ-R TF.767-2 – Использование глобальных навигационных спутниковых систем для передачи высокоточных сигналов времени
(<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.767-2-200103-I/en>).

ГЛАВА 8

НАЦИОНАЛЬНЫЕ ЦЕНТРЫ ОТСЧЕТА ВРЕМЕНИ

	<i>Стр.</i>
8.1 Введение.....	100
8.2 Структура лаборатории отсчета времени	101
8.3 Локальная измерительная система	102
8.4 Соответствие международным стандартам	103
8.5 Службы распространения сигналов времени	103
Ссылки	104

8.1 Введение

Как было описано ранее, бюро ВРМ определяет UTC путем вычислений в режиме постобработки на основе данных около 350 атомных стандартов частоты, которые поддерживаются примерно в 60 лабораториях отсчета времени, расположенных по всему миру. Эти лаборатории, которые во многих случаях функционируют в составе национальных метрологических институтов (NMI), помимо местной реализации шкалы времени UTC (в большинстве случаев признаваемой в качестве национального эталона времени), осуществляют также деятельность в некоторых (если не во всех) нижеперечисленных направлениях:

- разработка первичных стандартов частоты и часов;
- участие в международных экспериментах по синхронизации;
- распространение стандартных сигналов времени и частоты;
- разработка технологий передачи сигналов точного времени и частоты;
- исследование характеристик часов и алгоритмов шкал времени;
- калибровка оборудования для измерения времени и частоты.

По крайней мере двумя из этих направлений деятельности, а именно участием в мероприятиях по внедрению линий синхронизации и распространением информации, занимаются все NMI, подписавшие с 1999 года Соглашение о взаимном признании СИРМ (СИРМ МРА) в целях соблюдения своих требований, касающихся определения степени эквивалентности национальных стандартов путем участия в ключевых сравнениях (КС) и взаимного признания выданных сертификатов калибровки и измерения [СИРМ/ВРМ/ОИМЛ, 1999].

Первоочередной обязанностью каждой из национальных метрологических лабораторий, вносящих вклад в виде показаний часов для формирования UTC в ВРМ, является поддержание местного представления UTC в реальном времени, под названием UTC(k), строго согласованного с UTC, которое может быть основано на показаниях единственных главных часов или ансамбля часов. Во-вторых, каждая лаборатория отсчета времени, для того чтобы иметь возможность участвовать в формировании UTC и в ключевых сравнениях, определенных комитетом CCTF [CCTF Report, 2001; CCTF Report, 2006], должна осуществлять эксплуатацию по крайней мере одной системы синхронизации, как правило GPS. Кроме того, необходимо регулярно представлять в ВРМ данные [UTC(k) – время GPS], которые будут использоваться при реализации международных эталонов частоты и времени (TAI и UTC); *Circular T* ежемесячно предоставляет значения [UTC – UTC(k)], которые публикуются ВРМ в базе данных ключевых сравнений в целях обеспечения эквивалентности национальных стандартов. Важным вопросом, связанным с этой задачей, является оценка точности в плане уровней неопределенности используемых линий синхронизации, для которых производится регулярное обращение калиброванного оборудования GPS, ГЛОНАСС или TWSTFT. ВРМ регулярно проводит кампании по калибровке оборудования GPS в участвующих лабораториях.

Помимо оборудования, необходимого для этих основных видов деятельности, лаборатория по эталонам времени и частоты должна иметь специальные устройства для формирования и контроля сигналов стандартного времени и частоты, распространяемых на местном уровне или для удаленных пользователей различными способами, в частности при помощи выделенных передач на НЧ, ВЧ и ТВ, по телефонным линиям и компьютерным сетям. Эти функции наряду с аппаратурой, пригодной для калибровки устройств времени и частоты, в том что касается их характеристик (времени, частоты и смещения, стабильности частоты) составляют цепочку отслеживаемости измерений, предусмотренную Соглашением МРА СИРМ.

В странах, где была создана система аккредитованных калибровочных лабораторий, лаборатория NMI также предоставляет свои экспертные услуги органу аккредитации и может быть привлечена к организации национальных и международных межлабораторных сравнений. Эти мероприятия играют важную роль в оценке измерительных возможностей вторичных калибровочных лабораторий, которые являются конечным уровнем цепочки отслеживаемости измерений, разработанной в рамках Соглашения МРА СИРМ.

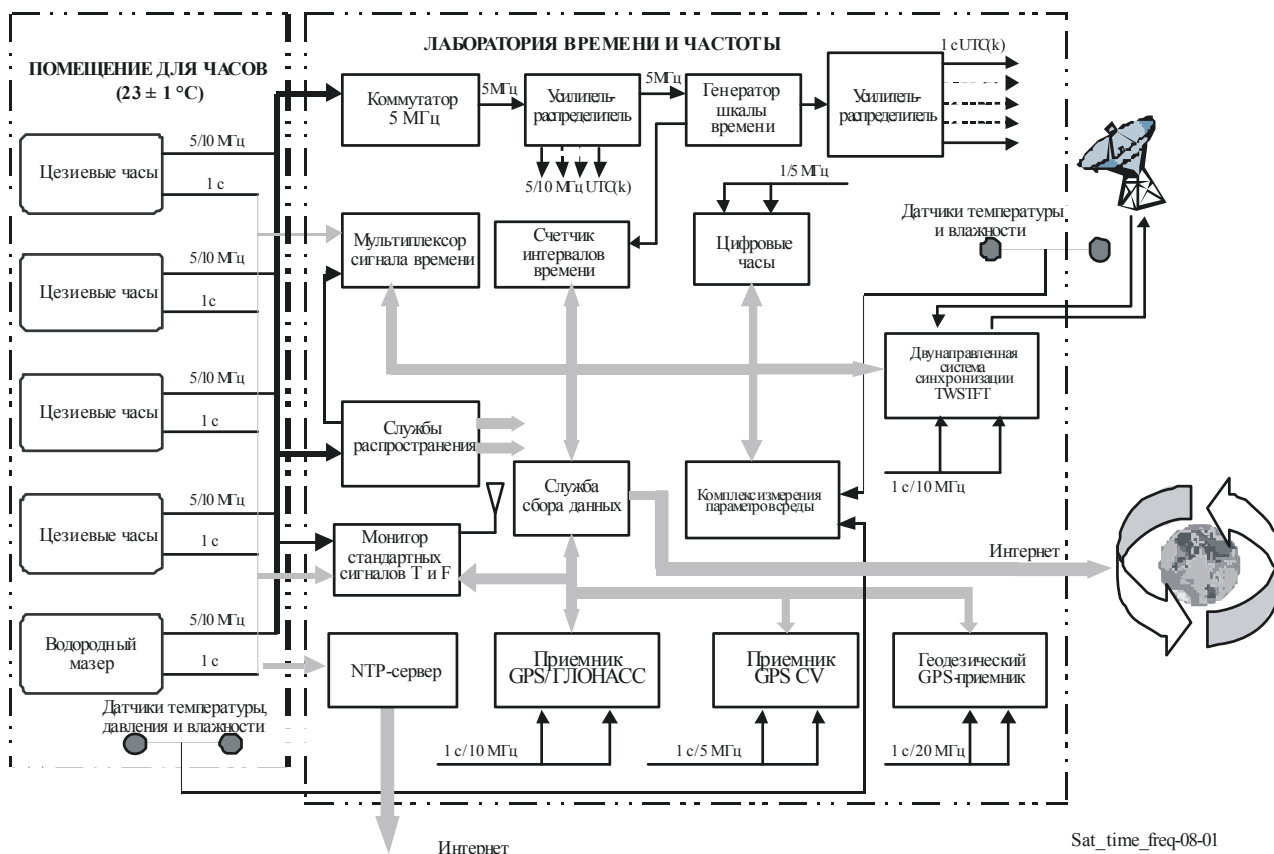
8.2 Структура лаборатории отсчета времени

На Рисунке 8-1 представлен типичный пример осуществления основных перечисленных видов деятельности, при этом не рассматривается оборудование, предназначенное для исследования источников стандартной частоты, цезиевых стандартов и средств калибровки. Все оборудование, за исключением приемных антенн для систем синхронизации, устанавливается в помещениях с регулируемой температурой и влажностью; в наличии имеется система резервного бесперебойного питания (на рисунке не показана); это устройство является весьма важным для обеспечения надежности метрологических мероприятий.

На левой стороне рисунка показано отдельное помещение для ансамбля часов, в котором обычно поддерживается постоянная температура (23 ± 1 °C); это решение рекомендуется для применения в том случае, если необходимо получить наилучшие характеристики цезиевых часов для заданных условий окружающей среды, но если содержать часы в небольших камерах с жестко заданными температурой ($\pm 0,1$ °C) и влажностью, то полученные результаты могут быть еще выше. Это решение особенно целесообразно в случае применения водородного мазера, оно позволяет получить в высшей степени стабильную частоту при формировании шкалы времени или в том случае, если такой мазер используется в качестве местного генератора для первичного цезиевого стандарта.

РИСУНОК 8-1

Типовая структура центра отсчета времени



В рамках данной архитектуры предлагаются по меньшей мере четыре блока атомных часов для достоверной реализации UTC; эта конфигурация позволяет также сформировать "бумажную" шкалу времени, улучшающую долгосрочные характеристики шкалы времени и повышающую ее надежность. Наиболее логичным подходом в любом случае является выбор одних часов из ансамбля в соответствии с их характеристиками точности и стабильности, а также их использование в качестве

главных часов для генерации UTC(k) в реальном времени. Чтобы повысить достоверность формирования шкалы времени, между цезиевыми часами и генератором шкалы времени (TSG) может быть установлен автоматический коммутатор (например, коммутатор 5 МГц). На его входных разъемах могут быть получены все имеющиеся стандартные частоты и проведена проверка изменений их амплитуд и фазы, что позволит обнаружить любые неполадки в системе и тем самым избежать нарушения непрерывности шкалы времени.

Информация о возможных грядущих неполадках может быть получена при помощи наблюдения ряда физических параметров, значения которых поступают из последовательных портов цезиевых часов; следовательно, рекомендуется осуществлять постоянный контроль ряда показаний на сервере лаборатории.

В целях обеспечения совместимости с рекомендациями Консультативного комитета по времени и частоте (CCTF) (в которых для местной реализации UTC предлагается максимальное отклонение 100 нс [CCDS Report, 1993] от UTC) между главными часами и TSG необходимо установить шаговый микрофазный двигатель для корректировки частоты TSG с учетом времени UTC в соответствии с поправками, опубликованными ВРМ в *Circular T*, или для оценки точности по сравнению с первичным стандартом лаборатории. Некоторые типы цезиевых стандартов включают шаговый микродвигатель; в этом случае в цепочке формирования шкалы времени дополнительные устройства не требуются.

Стандартные сигналы, получаемые от эталонных часов, распределяются в лаборатории времени и частоты при помощи высококачественных коаксиальных кабелей или волоконно-оптических линий.

Усилители-распределители для стандартных частот UTC(k) и сигналов 1 с необходимы также для выполнения доступных для контроля измерений внутри лаборатории.

8.3 Локальная измерительная система

В лаборатории времени и частоты размещается оборудование, предназначенное для формирования шкалы времени и сравнения часов, оказания услуг распространения сигналов, а также спутниковые приемники, системы сбора данных и вспомогательная аппаратура контроля.

Установка и функционирование локальной измерительной системы внутри лаборатории имеет двойную задачу – предоставление показаний часов для расчета шкалы времени и для внутреннего сравнения времени и частоты между UTC(k) и всеми часами и стандартами частоты, которые поддерживаются в лаборатории. Специальные измерительные системы, как правило, требуются для выполнения плановых измерений на спутниках GPS или в других системах синхронизации, предусмотренных в целях соответствия измерений международным стандартам.

Локальная измерительная система состоит из счетчика интервалов времени высокого разрешения (ТИС), который в нужное время измеряет разницу показаний часов с частотой повторения в 1 с и повторяет цикл каждый час. Выбор оптимального решения, касающегося скорости измерений, напрямую зависит от вида деятельности, осуществляемой в лаборатории. Поскольку точность измерения связана с временной базой, частота внешнего опорного генератора UTC(k) передается на ТИС. Прочие факторы, такие как момент срабатывания, ошибка квантования и дифференциальная задержка каналов запуска и остановки, вносят вклад в уровень неопределенности при сравнении часов. Поэтому необходимо регулярно выполнять тщательную калибровку, которая позволит оценить стабильность измерительной системы. Все измерения, выполняемые ТИС, должны ссылаться на UTC(k), при этом сигналы "stop", поступающие от различных часов, передаются через мультиплексор сигнала времени. Цифровые часы обеспечивают необходимую временную маркировку для каждого измерения. Циклы измерений управляются компьютером, в котором хранятся все результаты измерений, поступающие от ТИС, от систем синхронизации и от систем контроля окружающей среды. Внешние соединения с ВРМ и другими NMI также могут управляться через выделенный сетевой сервер, обеспечивающий безопасный доступ к интернету.

8.4 Соответствие международным стандартам

Линии для сравнения времени, которые обычно используются в лабораториях отсчета времени в целях обеспечения соответствия UTC(k) международным эталонам времени и частоты UTC и TAI, базируются на приемниках GPS, которые работают в соответствии с требованиями BIPM, и на системах двусторонней спутниковой передачи и сигналов времени и частоты (TWSTFT), использующих спутники связи. Та же измерительная линия позволяет атомным часам, обслуживаемым в каждой лаборатории, принимать участие в вычислении этих эталонов. В большинстве лабораторий оборудование передачи сигналов времени совершенствуется, а вместо базового метода наподобие GPS используются другие методы синхронизации, например прием сигналов спутников GPS и ГЛОНАСС при помощи многоканальных приемников, многие из которых способны осуществлять двухчастотный прием, улучшенные функциональные характеристики измерений TWSTFT или фазы-несущей GPS с помощью приемников геодезического типа. Последние два метода имеют особое значение в плане соответствия более жестким требованиям к сравнениям частоты и времени, а также для межконтинентальных исходных данных. Все указанные средства нуждаются в приеме внешних эталонов времени и частоты UTC(k); особое внимание необходимо уделять выбору места установки их антенных систем и осуществлению связи с лабораторией времени и частоты для передачи сигналов.

Что касается устройств GPS и ГЛОНАСС, результаты измерений, как правило, хранятся внутри приемников, затем автоматически передаются системам сбора данных, при этом для TWSTFT может потребоваться дополнительная измерительная система.

Чтобы оценить точность какой-либо линии синхронизации, эталонный приемник лаборатории отсчета времени должен принимать участие в периодических кампаниях по калибровке, проводимых либо BIPM, либо региональными метрологическими организациями, путем обращения откалиброванного приемника GPS в целях контроля стабильности в зависимости от времени задержки приемника, используемого в лаборатории. В случае TWSTFT применение переносной станции VSAT и имитатора космической среды также может содействовать выполнению поставленных задач. Полное определение характеристик неопределенности для линий, используемых при создании UTC, а также информация относительно их калибровок публикуются в *Circular T* бюро BIPM; фрагмент таблицы, содержащий данную информацию, приведен на Рисунке 7-2 предыдущего раздела. В настоящее время уровень неопределенности, который может быть достигнут, составляет порядка нескольких наносекунд.

8.5 Службы распространения сигналов времени

Для удовлетворения потребностей пользователей в научных и промышленных сферах, а также для предоставления национальному сообществу официальных данных о точном времени национальный центр отсчета времени может ввести в действие несколько служб времени и распространения сигналов времени на основе специально выделенного вещания в диапазонах ОНЧ, НЧ, ВЧ и на ТВ, на спутниках, в телефонных сетях и в интернете.

Исчерпывающая информация о применяемых методах и уровнях неопределенности, полученная от пользователей, представлена в Справочнике МСЭ-R "Выбор и использование систем точной частоты и точного времени", а обновленный список излучений сигналов времени и стандартов частоты приведен в Рекомендациях МСЭ-R серии TF (<http://www.itu.int/rec/R-REC-TF/en>). Описание сигналов времени и служб распространения сигналов времени приводится также в годовом отчете BIPM по деятельности, связанной со временем.

На блок-схеме, изображенной на Рисунке 8-1, данный вид деятельности представлен двумя прямоугольниками, а именно "Службы распространения" и "NTP-сервер"; в целях документального оформления для пользователей соответствия измерений этих служб стандарту UTC(k) данная лаборатория должна задействовать ряд систем контроля, а отклонения частоты и времени и значения неопределенности распространяемых сигналов времени и частоты периодически должны публиковаться в бумажном или электронном виде.

Кроме того, центр отсчета времени может обеспечить соответствие измерений национальному стандарту путем публикации результатов измерений, проводимых в системе GPS, которую можно считать стандартом передачи информации. Это позволяет лабораториям второго уровня сопоставлять свои местные стандарты (главным образом генераторы на базе GPS) с международными эталонами времени.

Ссылки

BIPM Annual Report on Time Activities, Bureau International des Poids et Mesures, Available upon request from the BIPM.

CCDS – Report on the 14th Meeting, 1993.

CCTF – Report of the 15th Meeting, June 2001 (<http://www.bipm.org/cc/AllowedDocuments.jsp>).

CCTF – Report of the 17th Meeting, 2006 (<http://www.bipm.org/utis/common/pdf/CCTF17.pdf>).

CIPM/BIPM/OIML – Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes. Paris, October 1999.

ГЛАВА 9

**РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ СПУТНИКОВОЙ ПЕРЕДАЧЕ
И РАСПРОСТРАНЕНИИ СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ**

	<i>Стр.</i>
9.1 Пространственно-временной интервал	106
9.2 Принцип относительности	106
9.2.1 Метрический тензор.....	108
9.2.2 Гравитационный потенциал Земли.....	109
9.2.3 Замедление времени.....	111
9.2.4 Гравитационное красное смещение	112
9.2.5 Передача сигналов времени путем перемещения часов.....	114
9.2.6 Геоцентрическая инерциальная система координат	114
9.2.7 Геоцентрическая неподвижная относительно Земли система координат	115
9.3 Часы на борту спутника.....	118
9.4 Передача времени при помощи электромагнитных сигналов	122
9.4.1 Геоцентрическая инерциальная система координат	123
9.4.2 Геоцентрическая неподвижная относительно Земли система координат	126
9.4.3 Межспутниковая линия связи.....	127
9.4.4 Релятивистский доплеровский эффект	129
9.5 Заключение	131
Ссылки	131

9.1 Пространственно-временной интервал

Теория пространства, времени и гравитации согласно общей теории относительности основана на понятии инвариантного пространственно-временного интервала Римана, выраженного в следующей форме:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g_{00} c^2 dt^2 + 2 g_{0j} c dt dx^j + g_{ij} dx^i dx^j, \quad (9-1)$$

где:

- греческий индекс подразумевает диапазон 0, 1, 2, 3;
- латинский индекс подразумевает диапазон 1, 2, 3.

Повторяющийся индекс (один в верхней, другой в нижней позиции) предполагает суммирование по этому индексу. Основной математический объект – это метрический тензор $g_{\mu\nu}$, компоненты которого являются функциями координат $x^\alpha = (c t, x^i)$ и симметричны по индексам μ, ν (т. е. $g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$). Обратный метрический тензор $g^{\mu\nu}$ определяется формулой $g^{\mu\alpha} g_{\alpha\nu} = \delta^\mu_\nu$, где δ^μ_ν – символ Кронекера ($\delta^\mu_\nu = 1$, если $\mu = \nu$, 0 – в противном случае). В принятом в настоящем документе правиле знаков $-g_{00} > 0$.

При измерении длины и времени единственная основная величина – это время; длина является производным понятием. Таким образом, часы и световые сигналы являются единственными основными средствами измерений. Существуют два различных метода передачи сигналов времени между двумя удаленными часами:

- 1) перемещение промежуточных переносных часов;
- 2) электромагнитный сигнал.

Для передачи сигналов релятивистского времени необходимо различать координатное время и собственное время. Координатное время t того или иного события является одинаковым во всей пространственно-временной системе координат. Собственное время τ – это показания часов в собственной неподвижной системе координат. Собственное время зависит от состояния движения часов и их положения в гравитационном потенциале. Для перемещаемых часов пространственно-временной интервал равен

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \equiv -c^2 dt^2. \quad (9-2)$$

Для электромагнитного сигнала пространственно-временной интервал удовлетворяет условию

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = 0. \quad (9-3)$$

9.2 Принцип относительности

Согласно специальной теории относительности, сформулированной Эйнштейном в 1905 году, законы физики должны иметь одинаковый вид в каждой инерциальной системе отсчета. Данный постулат называется принципом относительности. Таким образом, в дополнение к законам механики во всех инерциальных системах должны действовать уравнения Максвелла для электромагнитного поля. Основным прогнозируемым результатом уравнений Максвелла является существование электромагнитных волн, которые распространяются в вакууме со скоростью света, однозначно определяемой выражением

$$c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0},$$

где:

μ_0 и ϵ_0 – электрические постоянные, представляющие проницаемость и удельную проводимость свободного пространства соответственно.

Таким образом, скорость света c должна быть одинаковой в каждой инерциальной системе отсчета.

В 1908 году Минковский обнаружил, что это свойство может выражаться инвариантностью четырехмерного пространственно-временного интервала в форме

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 = -c^2 dt'^2 + dx'^2 + dy'^2 + dz'^2, \quad (9-4)$$

так что для светового сигнала уравнение $ds^2 = 0$ представляет расширяющийся сферический волновой фронт либо в инерциальной системе отсчета $S(ct, x, y, z)$, либо в инерциальной системе отсчета $S'(ct', x', y', z')$. Коэффициенты дифференциалов координат задаются метрикой Минковского в виде $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} \equiv \text{diag}(-1, 1, 1, 1)$.

Преобразование координат, сохраняющее инвариантность данного выражения, – это преобразование Лоренца. Если S' движется со скоростью V вдоль оси x системы S , преобразование Лоренца равно:

$$x = \gamma(x' + V t'); \quad y = y'; \quad z = z'; \quad (9-5)$$

$$t = \gamma(t' + V x' / c^2),$$

где:

$$\gamma \equiv (1 - V^2/c^2)^{-1/2}.$$

Два события являются одновременными, если значения их координатного времени равны. Таким образом, второй член уравнения преобразования координатного времени подразумевает относительность одновременности – события, одновременные в S , не всегда являются одновременными в S' .

Основной принцип общей теории относительности, сформулированный Эйнштейном в 1916 году, заключается в том, что "законы физики должны иметь такую природу, чтобы они могли применяться в системах отсчета, находящихся в любом виде движения". Таким образом, в общей теории относительности преобразование координат между двумя системами отсчета является произвольным, а пространственно-временной интервал предполагает квадратичную дифференциальную форму, метрические компоненты которой являются функциями координат. По своей инвариантности при произвольном преобразовании координат $x^\alpha \rightarrow x^\alpha(x'^0, x'^1, x'^2, x'^3)$ пространственно-временной интервал равен

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g'_{\alpha\beta} dx'^\alpha dx'^\beta. \quad (9-6)$$

Преобразование дифференциалов координат имеет следующий вид:

$$dx^\mu = \frac{\partial x^\mu}{\partial x'^\alpha} dx'^\alpha. \quad (9-7)$$

Таким образом, заменяя это выражение в ds^2 , получаем преобразование метрики:

$$g'_{\alpha\beta} = \frac{\partial x^\mu}{\partial x'^\alpha} \frac{\partial x^\nu}{\partial x'^\beta} g_{\mu\nu}. \quad (9-8)$$

Метрика и дифференциалы координат являются примерами определенных величин, которые называются "тензоры". В любой системе координат тензор характеризуется собственным правилом преобразования в новую систему координат. Такое преобразование является линейным и однородным, поэтому если уравнение тензора действительно в одной системе координат, оно также действительно в любой другой системе координат. Таким образом, в общей теории относительности инвариантность законов физики в разных системах отсчета реализуется путем выражения соответствующих уравнений через тензоры.

9.2.1 Метрический тензор

Геометрические свойства пространства-времени определяются тензором Римана $R^{\alpha\beta\gamma\delta}$, который целиком построен из метрического тензора и его первой и второй производных. Преобразование координат, которое переводит заданную метрику $g_{\mu\nu}$ в форму метрики Минковского, $\eta_{\mu\nu}$, из специальной теории относительности, существует в том и только в том случае, если тензор Римана равен нулю. В этом случае пространство-время является плоским. В присутствии материи пространство-время искривляется, и метрика не может быть сведена к метрике Минковского по всему пространству и времени при любых преобразованиях координат. Однако всегда есть возможность найти систему координат, представленную свободно падающей системой отсчета, в которой первые производные метрики исчезают в выбранной точке, и метрика задается метрикой Минковского в окрестностях данной точки. Данное свойство проявляется в *принципе эквивалентности*, который гласит, что свободно падающая система отсчета на локальном уровне эквивалентна инерциальной системе отсчета в отсутствие гравитации. Иначе, этот принцип гласит, что неинерциальная система отсчета на локальном уровне неотличима от неподвижной системы отсчета в гравитационном поле. *Принцип эквивалентности* основан на экспериментальных наблюдениях, согласно которым все тела падают с одинаковым ускорением независимо от их состава или внутренней структуры, и выражается в ньютоновской теории гравитации в виде эквивалентности инерциальной и гравитационной масс.

Для заданного распределения материи метрический тензор определяется уравнением поля Эйнштейна:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}, \quad (9-9)$$

где:

- $R_{\mu\nu} = R^{\alpha}_{\mu\alpha\nu}$ – тензор Риччи, полученный путем свертки (суммирования) тензора Римана по его первому и третьему индексам;
- $R = g^{\mu\nu}R_{\mu\nu}$ – скалярная кривизна R ;
- $T_{\mu\nu}$ – тензор энергии импульса, а G – гравитационная постоянная Ньютона. В свободном пространстве уравнение поля сводится к $R_{\mu\nu} = 0$.

Однако это уравнение не предполагает более сильного условия $R^{\alpha\beta\gamma\delta} = 0$, которое подразумевает, что пространство-время является плоским.

В первом приближении, порядка $1/c^2$, уравнение поля Эйнштейна сводится к уравнению Пуассона $\nabla^2 U = -4\pi G\rho$, где U – гравитационный потенциал Ньютона, а ρ – плотность материи.

В свободном пространстве уравнение поля превращается в уравнение Лапласа $\nabla^2 U = 0$.

Для анализа перемещения часов в данном приближении метрика геоцентрической инерциальной (ECI) системы отсчета равна

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2, \quad g_{0j} = 0, \quad g_{ij} = \delta_{ij}, \quad (9-10)$$

где:

- δ_{ij} – символ Кронекера.

Путем преобразования координат метрика во вращающейся геоцентрической неподвижной относительно Земли (ECEF) системе отсчета превращается в

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2 - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2/c^2 = 1 - 2W/c^2, \quad g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j/c, \quad g_{ij} = \delta_{ij}, \quad (9-11)$$

где:

$\boldsymbol{\omega}$ – угловая скорость вращения Земли;

$W \equiv U + \frac{1}{2}(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2$ – геопотенциал Земли.

Для анализа световых сигналов необходимо разместить члены в g_{ij} в том же порядке, что и члены в g_{00} . Следовательно, для световых сигналов в инерциальной системе отсчета

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2, \quad g_{0j} = 0, \quad g_{ij} = (1 + 2U/c^2)\delta_{ij}, \quad (9-12)$$

а во вращающейся системе отсчета

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2 - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2/c^2 = 1 - 2W/c^2, \quad g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j/c, \quad g_{ij} = (1 + 2U/c^2)\delta_{ij}. \quad (9-13)$$

Подобные приближения для компонентов метрического тензора являются достаточными для решения практических задач, касающихся часов и световых сигналов.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. Согласно рекомендации IAU знак гравитационного потенциала Ньютона является положительным.

9.2.2 Гравитационный потенциал Земли

Гравитационный потенциал Земли U на радиальном расстоянии r , геоцентрической широте ϕ , и долготе λ является решением уравнения Лапласа $\nabla^2 U = 0$, которое может быть выражено в виде расширения последовательности в сферических гармониках:

$$\begin{aligned} U(r, \phi, \lambda) &= \frac{GM}{r} \left\{ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^n P_{nm}(\sin \phi) (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) \right\} = \\ &= \frac{GM}{r} \left\{ 1 - \sum_{n=2}^{\infty} J_n \left(\frac{R}{r}\right)^n P_n(\sin \phi) - \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=1}^n \left(\frac{R}{r}\right)^n P_{nm}(\sin \phi) (J_{mn} \cos m\lambda + K_{mn} \sin m\lambda) \right\}, \quad (9-14) \end{aligned}$$

где:

G – гравитационная постоянная;

M – масса Земли;

R – экваториальный радиус Земли;

$P_n(\sin \phi)$ – многочлены Лежандра степени n ;

$P_{nm}(\sin \phi)$ – сопряженные функции Лежандра степени n и порядка m .

Первый член – это потенциал сферической Земли. Слагаемые одинарной суммы называются зональными гармониками и связаны со сплюснутостью Земли. Члены двойного суммирования называются тессеральными гармониками и связаны с эллиптической формой экватора Земли. В том случае, если достаточно учесть только первую гармонику, связанную со сплюснутостью Земли, гравитационный потенциал может быть приблизительно выражен следующим образом:

$$U(r, \phi) = \frac{GM}{r} \left[1 + \frac{1}{2} J_2 \left(\frac{R}{r}\right)^2 (1 - 3 \sin^2 \phi) \right], \quad (9-15)$$

где:

$$J_2 - \text{коэффициент сплюснутости низшей степени}$$

$$P_2(x) = \frac{1}{2} (3x^2 - 1).$$

При проведении наземных измерений необходимо учитывать как гравитационный потенциал Земли, так и вращение Земли. Сумма гравитационного потенциала U и вращательного потенциала $\frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 = \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \phi$ равна геопотенциалу:

$$W = U + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 = U + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \phi, \quad (9-16)$$

который является решением $\nabla^2 W = -4\pi G\rho + 2\omega^2$, где ω – угловая скорость вращения Земли. Если оставить только первую поправку на сплюснутость Земли, геопотенциал может быть выражен как

$$W(r, \phi) \approx \frac{GM}{r} \left[1 + \frac{1}{2} J_2 \left(\frac{R}{r} \right)^2 (1 - 3 \sin^2 \phi) \right] + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \phi. \quad (9-17)$$

Поверхность с постоянным геопотенциалом называется геоидом, который приблизительно эквивалентен среднему уровню моря. Поскольку геопотенциал W_0 по всей поверхности геоида является постоянным, его значение может оцениваться на экваторе и задается следующим выражением:

$$W_0 \equiv U_0 + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R})^2 \approx \frac{GM}{R} \left(1 + \frac{1}{2} J_2 \right) + \frac{1}{2} \omega^2 R^2, \quad (9-18)$$

где:

$$U_0 - \text{гравитационный потенциал Ньютона на геоиде в положении } \mathbf{R}.$$

В модели Земли WGS-84 (NIMA Technical Report, 1997) гравитационная постоянная Земли равна

$$GM = 3,986\,004\,418 \times 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2,$$

экваториальный радиус Земли $R = 6\,378\,137,0$ м, а

угловая скорость вращения Земли $\omega = 7,292\,1150 \times 10^{-5}$ рад/с.

Кроме того, скорость света в точности равна 299 792 458 м/с.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Это значение определяет метр в международной системе единиц (СИ). Удельная проводимость свободного пространства $\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$, где проницаемость свободного пространства $\mu_0 \equiv 4\pi \times 10^{-7} \text{ Н/А}^2$ путем определения ампера. Таким образом, поскольку теперь обе постоянные определены, c и ϵ_0 больше не являются экспериментально измеряемыми величинами.

Коэффициент сплюснутости Земли второй степени приблизительно равен $J_2 = 0,001\,0826$.

Таким образом, $W_0 = 6,2637 \times 10^7 \text{ м}^2/\text{с}^2$, а $W_0 / c^2 = 6,9693 \times 10^{-10}$ (приблизительно).

Локальное гравитационное ускорение \mathbf{g} является градиентом геопотенциала. Таким образом,

$$\mathbf{g} = \nabla W = \nabla U - \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}). \quad (9-19)$$

Разница в геопотенциале на высоте h примерно равна $\Delta W \approx \mathbf{g} \cdot \Delta \mathbf{r} = -gh$.

Абсолютная величина гравитационного ускорения на сплюснутой вращающейся Земле выражается в замкнутом виде по формуле гравитации Сомильяны [Heiskanen and Moritz, 1967]:

$$g = g_0 \frac{1 + k \sin^2 \phi'}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi'}}, \quad (9-20)$$

где:

- ϕ' – геодезическая широта;
- $e^2 = 2f - f^2$ – квадрат первого эксцентриситета;
- f – эллиптичность;
- g_0 – значение g на экваторе.

Геодезическая широта ϕ' и геоцентрическая широта ϕ связаны точным уравнением:

$$\tan \phi = (1 - f)^2 \tan \phi' = (1 - e^2) \tan \phi'.$$

В модели Земли WGS-84:

- $k = 0,001\,931\,852\,652\,41$;
- $f = 1/298,257\,223\,563$;
- $e^2 = 0,006\,694\,379\,990\,14$; а
- $g_0 = 9,780\,325\,3359$ м/с².

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Условно считается, что ΔW является отрицательным, если часы находятся выше геоида.

9.2.3 Замедление времени

В специальной теории относительности пространственно-временной интервал для часов, движущихся со скоростью v относительно инерциальной системы отсчета, задается уравнением

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + \delta_{ij} dx^i dx^j = -c^2 (1 - v^2/c^2) dt^2 = -c^2 d\tau^2, \quad (9-21)$$

где:

$v^2 = \delta_{ij} (dx^i/dt)(dx^j/dt)$. Если двое часов имеют скорость v_1 и v_2 ,

$$d\tau_1 = \sqrt{1 - v_1^2/c^2} dt \quad (9-22)$$

и

$$d\tau_2 = \sqrt{1 - v_2^2/c^2} dt. \quad (9-23)$$

Поскольку интервалы собственного времени $d\tau_1$ и $d\tau_2$ соответствуют такому же интервалу координатного времени dt :

$$\frac{d\tau_2}{d\tau_1} = \sqrt{\frac{1 - v_2^2/c^2}{1 - v_1^2/c^2}} \approx 1 - \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} (v_2^2 - v_1^2). \quad (9-24)$$

Таким образом, часы, обладающие более высокой скоростью относительно инерциальной системы отсчета, будут идти медленнее, чем часы, обладающие меньшей скоростью относительно инерциальной системы отсчета.

Если $v_1 = 0$, то $d\tau_2 = \sqrt{1 - v_2^2/c^2} d\tau_1$, и наоборот $d\tau_1 = d\tau_2 / \sqrt{1 - v_2^2/c^2}$.

Таким образом, интервал собственного времени $d\tau_1$, зафиксированный стационарными часами, длиннее интервала собственного времени $d\tau_2$, зафиксированного движущимися часами. Это свойство называется замедлением или растяжением времени.

Эффект замедления времени всесторонне подтвержден результатами измерения времени жизни элементарных частиц. Например, оказывается, что высокоскоростные мюоны, вырабатываемые космическими лучами в верхних слоях атмосферы, судя по длине их пути перед распадом, живут дольше собственного времени существования неподвижных мюонов, как показали измерения в лаборатории [Frish and Smith, 1963].

Замедление времени наблюдается также при перемещении часов. Рассмотрим разницу между собственным временем τ_2 , зафиксированную часами, перемещаемыми с относительной скоростью v' вокруг экватора вращающейся Земли, и собственным временем τ_1 эталонных часов, которые остаются неподвижными в одной точке экватора. Относительно инерциальной системы отсчета скорость движения эталонных часов равна

$$v_1 = \omega R,$$

а скорость движения перемещаемых часов равна

$$v_2 = \omega R + v',$$

где:

ω – угловая скорость вращения Земли;

R – экваториальный радиус Земли.

Разница в значениях собственного времени (перемещаемые часы – эталонные часы) приблизительно равна

$$\tau_2 - \tau_1 \approx -\frac{1}{2} \frac{1}{c^2} (v_2^2 - v_1^2) \tau_1 = -\frac{1}{c^2} \left(\frac{1}{2} v'^2 + \omega R v' \right) \tau_1 = -\frac{2 \pi R}{c^2} \left(\frac{1}{2} |v'| \pm \omega R \right). \quad (9-25)$$

При движении на восток относительная скорость v' имеет положительный знак, и два члена складываются, однако при движении на запад относительная скорость имеет отрицательный знак, и два члена стремятся к взаимной нейтрализации. В системе отсчета вращающейся Земли второй член справа представляет собой эффект Саньяка. В 1971 году физики Джозеф Хафеле и Ричард Китинг [Round and Rebka, 1960] впервые продемонстрировали замедление времени на макроскопических атомных часах. Они перемещали комплект из четырех цезиевых часов вокруг земного шара на серийном реактивном самолете (один раз в восточном направлении и один раз в западном направлении) и проверили количественные значения асимметрии разности показаний часов для восточного и западного направлений.

9.2.4 Гравитационное красное смещение

В общей теории относительности пространственно-временной интервал для часов задается формулой

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g_{00} c^2 dt^2 + 2 g_{0j} c dt dx^j + g_{ij} dx^i dx^j = -c^2 d\tau^2. \quad (9-26)$$

В особом случае для неподвижных часов $dx^i = 0$ и $d\tau = \sqrt{-g_{00}} dt$.

Для двух неподвижных часов A и B в гравитационном потенциале в точках x_A и x_B интервалы собственного времени равны

$$d\tau_A = \sqrt{-g_{00}(x_A)} dt \quad (9-27)$$

и

$$d\tau_B = \sqrt{-g_{00}(x_B)} dt. \quad (9-28)$$

Поскольку интервалы собственного времени, $d\tau_A$ и $d\tau_B$, соответствуют такому же интервалу координатного времени dt , то

$$\frac{d\tau_B}{d\tau_A} = \frac{\sqrt{-g_{00}(x_B)}}{\sqrt{-g_{00}(x_A)}}. \quad (9-29)$$

Если часы разделяются по высоте их местоположения, $h = r_B - r_A$, в гравитационном потенциале вращающейся Земли, то

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2 - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2/c^2 = 1 - 2W/c^2 \quad \text{и} \quad (9-30)$$

$$\frac{d\tau_B}{d\tau_A} \approx \frac{1 - W_B/c^2}{1 - W_A/c^2} \approx 1 - \frac{1}{c^2}(W_B - W_A) = 1 - \frac{\Delta W}{c^2} \approx 1 + \frac{gh}{c^2}, \quad (9-31)$$

где:

W – геопотенциал, g – это локальное гравитационное ускорение;
 $\Delta W \approx -gh$.

В этом случае разница в показаниях собственного времени составляет

$$\tau_B - \tau_A = -\frac{1}{c^2} \Delta W \tau_A \approx -\frac{1}{c^2} gh \tau_A. \quad (9-32)$$

Таким образом, из-за разницы гравитационного потенциала собственное время, зафиксированное часами B на большей высоте (т. е. в более слабом гравитационном потенциале), будет больше собственного времени, зафиксированного часами A на меньшей высоте (т. е. в более сильном гравитационном потенциале). Если часы A передают в восходящем направлении периодический сигнал, который принимается часами B , то относительная разность частот равна

$$\frac{f_B - f_A}{f_A} = \frac{f_B}{f_A} - 1 = \frac{d\tau_A}{d\tau_B} - 1 = -\frac{gh}{c^2}. \quad (9-33)$$

Следовательно, частота принятого сигнала f_B , измеренная часами B , меньше частоты переданного сигнала f_A , измеренного часами A . То есть то же самое количество импульсов сигнала наблюдается в течение более длительного периода собственного времени. Этот эффект называется гравитационным красным смещением. (На практике термин "красное смещение" является общим и применяется для обозначения изменения частоты в любую сторону.)

Впервые гравитационное красное смещение было напрямую измерено в ходе эксперимента, проведенного в 1960 году в Гарвардском университете Робертом Паундом и Гленом Ребкой [Round and Rebka, 1960]. Ученым удалось точно измерить весьма незначительное изменение дробной части частоты фотонов гамма-излучения, поднимающихся и опускающихся в пределах заданного расстояния по вертикали. В этом эксперименте излучатель Fe^{57} перемещался с малой скоростью для получения доплеровского эффекта, который в точности компенсировал гравитационное красное смещение, что позволило добиться резонансного поглощения в узком диапазоне частот с помощью стационарной мишени-поглотителя Fe^{57} . Нужной точности удалось достичь путем использования недавно открытого эффекта Мёссбауэра, суть которого заключается в отсутствии импульса отдачи при испускании и поглощении, что происходит при введении изотопа в подходящий кристалл.

В 1975 году исследовательская группа, возглавляемая Кэрролом Эллеем [Alley, 1983], провела в Мэрилендском университете серию экспериментов с авиационными атомными часами. Эксперименты были разработаны специально для испытаний гравитационного красного смещения на трех различных частотах, и их результаты продемонстрировали полное соответствие теоретическим данным. Влияние гравитационного потенциала Земли измерялось также в рамках кругосветного эксперимента с атомными часами, проведенного в 1971 году Хафеле и Китингом.

На данный момент наиболее точное испытание красного смещения было проведено в 1976 году Робертом Вессотом [Vessot and Levine *et al.*, 1980] из Смитсоновской астрофизической обсерватории. В ходе эксперимента был использован водородный мазер, поднятый на высоту 10 000 км при помощи ракеты Scout D. Двухнаправленный сигнал, передаваемый через размещенное на борту ракеты оборудование связи, смешивался с однонаправленным сигналом для получения релятивистского изменения частоты. Гравитационный эффект на линиях вниз и линиях вверх полностью нейтрализуется, поэтому передаваемый сигнал подвергается двукратному воздействию доплеровского сдвига, а вот однонаправленный сигнал подвергается влиянию как гравитационного, так и доплеровского эффектов. Расхождение результатов испытания с теоретическими данными составило не более 0,01%.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. С точки зрения квантовой механики кинетическая энергия фотона равна $E = hf$, где h – постоянная Планка. Когда фотон поднимается на высоту, он теряет кинетическую энергию, и происходит понижение наблюдаемой частоты.

9.2.5 Передача сигналов времени путем перемещения часов

Для перемещаемых часов пространственно-временной интервал равен

$$ds^2 = g_{00} c^2 dt^2 + 2 g_{0j} c dt dx^j + g_{ij} dx^i dx^j = -c^2 d\tau^2. \quad (9-34)$$

Координатное время определяется как собственное время неподвижных стандартных часов в бесконечности, поскольку

$$\text{если } dx^i = 0 \text{ и } -g_{00} = 1, \text{ то } dt = d\tau.$$

Это квадратичное алгебраическое уравнение для dt .

Таким образом, координатное время, истекшее за период перемещения часов и соответствующее измеренному собственному времени, равно

$$\Delta t = \pm \int_{path} \frac{1}{\sqrt{-g_{00}}} \sqrt{1 + \frac{1}{c^2} \left(g_{ij} + \frac{g_{0i} g_{0j}}{-g_{00}} \right) \frac{dx^i}{d\tau} \frac{dx^j}{d\tau}} dt + \frac{1}{c} \int_{path} \frac{g_{0j}}{-g_{00}} \frac{dx^j}{d\tau} dt. \quad (9-35)$$

Таким образом, при передаче сигналов времени из точки A в точку B при помощи промежуточных переносных часов истекшее координатное время в первом приближении равно

$$\Delta t = \int_A^B \left[1 - \frac{1}{2}(-g_{00} - 1) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} g_{ij} \frac{dx^i}{dt} \frac{dx^j}{dt} \right] dt + \frac{1}{c} \int_A^B g_{0j} \frac{dx^j}{dt} dt. \quad (9-36)$$

Второй член – это эффект Саньяка для перемещаемых часов. В инерциальной системе отсчета $g_{0j} = 0$ и данный член отсутствует.

9.2.6 Геоцентрическая инерциальная система координат

При посредстве членов порядка $1/c^2$ вычисляются компоненты метрического тензора в системе координат ЕСІ:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2, \quad g_{0j} = 0, \quad \text{и } g_{ij} = \delta_{ij}.$$

Для этого порядка пространственно-временной интервал определяется как

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2U}{c^2} \right) c^2 dt^2 + \delta_{ij} dx^i dx^j = -c^2 \left(1 - \frac{2U}{c^2} - \frac{1}{c^2} v^2 \right) dt^2 = -c^2 d\tau^2, \quad (9-37)$$

где:

- U – гравитационный потенциал в месте расположения часов;
 v – скорость хода часов относительно инерциальной системы отсчета.

Таким образом, координатное время, истекшее за время перемещения часов, равно

$$\Delta t = \int_A^B \left(1 + \frac{1}{c^2} U + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right) d\tau. \quad (9-38)$$

Поправки под интегралом отражают эффекты гравитационного красного смещения, связанного с потенциалом Земли, и замедления времени, связанного со скоростью перемещения часов. Координатное время t , представленное в этой формуле, является геоцентрическим координатным временем (TCG), соответствующим шкале геоцентрического координатного времени, реализуемой относительно системы координат ECI, единицей измерения которой выбрана секунда СИ.

Для неподвижных часов в состоянии покоя в положении \mathbf{R} на вращающемся геоиде с гравитационным потенциалом U_0 и скоростью $\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}$ относительно системы отсчета ECI истекшее координатное время равно

$$\Delta t = \int_A^B \left\{ 1 + \frac{1}{c^2} U_0 + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R})^2 \right\} d\tau = (1 + W_0 / c^2) \Delta \tau, \quad (9-39)$$

где:

- W_0 – геопотенциал по всей поверхности геоида.

Поскольку W_0 является постоянной величиной, а координатное время t – это глобальная координата, повсюду на геоиде часы показывают одно и то же собственное время $\Delta \tau$. Координатное время может быть приравнено к собственному времени часов на геоиде путем изменения шкалы координатного времени следующим образом:

$$\Delta t' \equiv (1 - W_0 / c^2) \Delta t = \Delta \tau. \quad (9-40)$$

Таким образом, истекшее координатное время, измеренное при помощи собственного времени эталонных часов на геоиде, которое соответствует собственному времени часов с потенциалом U и скоростью движения v относительно системы отсчета ECI, равно

$$\Delta t' = \int_A^B \left\{ 1 + \frac{1}{c^2} (U - W_0) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right\} d\tau. \quad (9-41)$$

Следует отметить, что W_0 учитывает влияние вращения Земли, а U – не учитывает. Это уравнение может использоваться как для часов у поверхности Земли, так и для часов на спутниках, находящихся на высоте вплоть до геостационарной орбиты (35 786 км). Координатное время t' , представленное данной формулой, – это время ТТ, определяемое как шкала координатного времени, реализуемого часами на вращающемся геоиде, единицей измерения которого является секунда СИ.

Следовательно, $t' \equiv \text{ТТ}$ однозначно отличается от $t \equiv \text{TCG}$ на постоянное значение скорости хода, таким образом, $d\text{ТТ}/d\text{TCG} = 1 - L_G$;

где:

$$L_G \equiv W_0 / c^2 = 6,969\,290\,134 \times 10^{-10} \text{ (приблизительно } 60,2 \text{ мкс/сутки).}$$

ТТ является идеальной формой ТАИ.

9.2.7 Геоцентрическая неподвижная относительно Земли система координат

Через посредство членов порядка $1/c^2$ вычисляются компоненты метрического тензора в геоцентрической неподвижной относительно Земли (ECEF) системе координат:

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2 - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2/c^2 = 1 - 2W/c^2, \quad g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j/c, \quad \text{а } g_{ij} = \delta_{ij}.$$

Для этого порядка пространственно-временной интервал равен

$$ds^2 = - \left[1 - 2 \frac{1}{c^2} U - \frac{1}{c^2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 \right] c^2 dt^2 + 2 (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j dx^j c dt + \delta_{ij} dx^i dx^j = -c^2 dt^2. \quad (9-42)$$

Таким образом, истекшее координатное время равно

$$\Delta t = \int_A^B \left\{ 1 + U/c^2 + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 / c^2 + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' / c + \frac{1}{2} v'^2 / c^2 \right\} dt, \quad (9-43)$$

где

\mathbf{v}' – скорость движения часов относительно вращающейся Земли. Данный результат также следует из уравнения для Δt относительно инерциальной системы отсчета путем подстановки $\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}$ с тем же приближением.

Для того чтобы привести это координатное время в соответствие с собственным временем, зафиксированным неподвижными часами на геоиде, оно умножается на коэффициент масштабирования $1 - W_0 / c^2$, в результате чего получаем:

$$\Delta t' = \left(1 - \frac{1}{c^2} W_0 \right) \Delta t = \int_A^B \left\{ 1 + \frac{1}{c^2} \left[U + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 - W_0 \right] + \frac{1}{2} v'^2 \right\} dt + \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' dt. \quad (9-44)$$

Член в скобках в первом интеграле может быть выражен как

$$U + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 - W_0 = W - W_0 = \Delta W = -g h, \quad (9-45)$$

где:

- W – геопотенциал на высоте h ;
- W_0 – геопотенциал на поверхности геоида;
- g – локальное гравитационное ускорение.

Таким образом, истекшее координатное время становится равным

$$\Delta t' = \int_A^B \left(1 - \frac{1}{c^2} g h + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v'^2 \right) dt + \frac{1}{c^2} \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' dt. \quad (9-46)$$

Второй интеграл – этот эффект Саньяка для перемещаемых часов. Эффект Саньяка – это кинематическое свойство, характерное для вращающейся системы отсчета. Этот член может быть выражен как

$$\Delta t_{Sagnac} = \frac{1}{c^2} \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' dt = \frac{1}{c^2} \int_A^B \boldsymbol{\omega} \cdot (\mathbf{r} \times d\mathbf{r}) = 2 \frac{1}{c^2} \int_A^B \boldsymbol{\omega} \cdot d\mathbf{A} = \frac{2\boldsymbol{\omega}A}{c^2}, \quad (9-47)$$

где:

- A – область, охватываемая вектором положения относительно центра Земли, спроецированным на экваториальную плоскость (с положительным знаком для восточного направления и отрицательным – для западного).

Эффект Саньяка может быть также выражен как

$$\Delta t_{Sagnac} = \frac{1}{c^2} \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}' d\tau = \frac{1}{c^2} \int_A^B (\omega R \cos \phi) (v' \cos \theta) d\tau \frac{\omega}{c^2} \int_A^B R^2 \cos^2 \phi d\lambda, \quad (9-48)$$

где:

- R – радиус Земли, ϕ – широта;
- λ – долгота;
- $v' \cos \theta$ – компонент скорости, направленный на восток. Направление θ , измеренное относительно восточного направления, является дополнением азимута Az , измеренного относительно северного направления, так что $\cos \theta = \sin Az$.

Поправка Саньяка к истекшему координатному времени имеет положительный знак для часов, движущихся на восток, и отрицательный – для часов, движущихся на запад; для часов, движущихся на север или на юг, она равна нулю.

Таким образом, при передаче сигналов времени из точки A в точку B при помощи перевозимых часов истекшее координатное время равно

$$\Delta t' = \int_A^B \left(1 - \frac{1}{c^2} g h + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v'^2 \right) d\tau + \frac{\omega}{c^2} \int_A^B R^2 \cos^2 \phi d\lambda. \quad (9-49)$$

В соответствии с данной формулой существует три релятивистских эффекта, которые необходимо учитывать. Поправки под первым интегралом – это члены гравитационного красного смещения и замедления времени. Поправка, заданная вторым интегралом, – это эффект Саньяка. В общем случае координатное время должно численно суммироваться по определенной трассе.

Для часов, которые перемещаются вокруг экватора в восточном направлении и возвращаются в исходную точку, поправка Саньяка равна 207,4 нс.

Для замкнутого контура, ограничивающего небольшую область S на поверхности Земли,

$$A \approx S \sin \bar{\phi}, \text{ где } \bar{\phi} \text{ – средняя широта, определяемая в центре } S.$$

Если часы перемещаются вперед-назад между двумя точками одной и той же трассы, поправки Саньяка взаимно нейтрализуются, и суммарный эффект Саньяка равен нулю.

Если трасса проходит по дуге большого круга, то $\cos \phi \cos \theta = \cos i$ – это постоянная величина, где i – наклонение плоскости большого круга относительно экватора.

Площадь проекции равна $A = \frac{1}{2} R^2 \gamma \cos i$, где γ – дуга большого круга от точки 1 до точки 2 в начале и конце трассы.

Таким образом, поправка Саньяка равна

$$\Delta t_{Sagnac} = \frac{2\omega A}{c^2} = \frac{\omega R^2}{c^2} \gamma \cos i. \quad (9-50)$$

По правилам сферической тригонометрии γ определяется как

$$\cos \gamma = \sin \phi_1 \sin \phi_2 + \cos \phi_1 \cos \phi_2 \cos(\lambda_2 - \lambda_1), \quad (9-51)$$

где:

- ϕ и λ – широта и долгота каждой точки.

Наклонение плоскости большого круга определяется как

$$\tan i = \begin{cases} \tan \phi_1 \csc \beta, & \beta \neq 0, \phi_1 \neq 0, \\ \tan \phi_2 \csc(\lambda_2 - \lambda_1), & \beta = \phi_1 = 0, \end{cases} \quad (9-52)$$

так что точка 1 берется к западу от точки 2. Угол β представляет собой разность долгот между точкой пересечения большого круга с экватором и точкой 1, определяемую как

$$\cot \beta = \frac{\tan \phi_2}{\tan \phi_1} \csc(\lambda_2 - \lambda_1) - \cot(\lambda_2 - \lambda_1) . \quad (9-53)$$

В любой точке большого круга широта может выражаться по отношению к долготе как

$$\tan \phi = \tan i \sin(\lambda_2 - \lambda_1 + \beta) . \quad (9-54)$$

Используя данное выражение и тождественное равенство $\cos^2 \phi = 1 / (1 + \tan^2 \phi)$, а также отмечая, что $\tan(\lambda_2 - \lambda_1 + \beta) = \cos i \tan(\gamma + \psi)$ и $\tan \beta = \cos i \tan \psi$, где ψ – дуга большого круга от точки пересечения с экватором до точки 1, можно в качестве варианта показать, что

$$\Delta t_{Sagnac} = \frac{\omega}{c^2} \int_A^B R^2 \cos^2 \phi \, d\lambda = \frac{\omega R^2}{c^2} \gamma \cos i , \quad (9-55)$$

как указано выше.

В качестве примера рассмотрим измерение передачи времени между Национальной физической лабораторией и Военно-морской обсерваторией США путем перемещения атомных часов. Предположим, что часы перемещаются на борту самолета по маршруту, представляющему траекторию большого круга, от Лондона до Вашингтона, округ Колумбия, на средней высоте 10 000 м со средней скоростью 220 м/с, при этом время полета составляет приблизительно 7,5 ч. Интервал собственного времени, зафиксированный часами в полете, равен $\Delta\tau$, а интервал собственного времени, зафиксированный эталонными часами на геоиде, равен $\Delta\tau' = \Delta t'$. Таким образом, разница в собственном времени $\Delta\tau - \Delta\tau'$ (часы в полете – эталонные часы) составляет +29 нс вследствие гравитационного красного смещения и –7 нс вследствие замедления времени. При полете на запад эффект Саньяка равен +18 нс. Следовательно, для часов в полете получаем всего +40 нс относительно эталонных часов.

С другой стороны, при полете на восток из Вашингтона в Лондон эффект Саньяка составляет –18 нс, и для часов в полете получаем всего лишь +4 нс. При полете в оба конца поправки Саньяка взаимно нейтрализуются в том случае, если трассы совпадают, и суммарное итоговое изменение составляет +44 нс ($= 2 \times 29$ нс – 2×7 нс), что полностью обусловлено гравитационным красным смещением и замедлением времени.

9.3 Часы на борту спутника

Для часов, находящихся на борту спутника, истекшее координатное время по отношению к системе отсчета ЕСИ равно:

$$\Delta t = \int_A^B \left(1 + \frac{1}{c^2} U + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right) d\tau . \quad (9-56)$$

Если спутник движется по невозмущенной кеплеровской орбите, гравитационный потенциал равен:

$$U = \frac{GM}{r} , \quad (9-57)$$

а скорость спутника определяется сохранением энергии E (на единицу массы):

$$E = \frac{1}{2}v^2 - U = \frac{1}{2}v^2 - \frac{GM}{r} = -\frac{GM}{2a}, \quad (9-58)$$

где:

a – большая полуось орбиты.

Таким образом, истекшее координатное время равно:

$$\Delta t = \int_{orbit} \left(1 - \frac{1}{c^2} \frac{GM}{2a} + \frac{1}{c^2} \frac{2GM}{r} \right) d\tau = \left(1 - \frac{1}{c^2} \frac{GM}{2a} \right) \Delta\tau + \frac{2GM}{c^2} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{1}{r} d\tau. \quad (9-59)$$

Для кеплеровской орбиты радиальное расстояние

$$r = a(1 - e \cos E),$$

где:

e – эксцентриситет орбиты;

E – эксцентрическая аномалия.

Кроме того, по уравнению Кеплера

$$M \equiv n(\tau - \tau_0) = E - e \sin E,$$

где:

M – средняя аномалия;

$n \equiv 2\pi/T = \sqrt{GM/a^3}$ – среднее движение;

T – период обращения по орбите;

τ_0 – время прохождения перигея.

Таким образом, интеграл равен:

$$\int_{\tau_0}^{\tau} \frac{1}{r} d\tau = \frac{1}{na} E = \frac{1}{a} \Delta\tau + \sqrt{\frac{a}{GM}} e \sin E, \quad (9-60)$$

где:

$$\Delta\tau = \tau - \tau_0.$$

Следовательно,

$$\Delta t = \left(1 + \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} \right) \Delta\tau + \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E. \quad (9-61)$$

Целесообразно изменить шкалу:

$$\Delta t' = \left(1 - \frac{1}{c^2} W_0 \right) \Delta t = \int_A^B \left\{ 1 + \frac{1}{c^2} (U - W_0) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} v^2 \right\} d\tau, \quad (9-62)$$

так чтобы координатное время соответствовало собственному времени, зарегистрированному часами на геоиде. Таким образом, часы на геоиде становятся часами координатного времени. Следовательно, истекшее координатное время равно:

$$\Delta t' = \left(1 + \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} - \frac{1}{c^2} W_0 \right) \Delta\tau + \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E. \quad (9-63)$$

Первый член представляет собой постоянный сдвиг скорости хода между часами спутника и часами на геоиде. Поправка к интервалу собственного времени спутниковых часов равна:

$$k \equiv 1 + \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} - \frac{1}{c^2} W_0 = \frac{3}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{a} - \frac{1}{c^2} \frac{GM}{R} \left(1 + \frac{1}{2} J_2 \right) - \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} \omega^2 R^2. \quad (9-64)$$

Значение k равно нулю для большой полуоси, длина которой составляет приблизительно 9545 км.

На этом расстоянии эффекты гравитационного красного смещения и замедления времени взаимно нейтрализуются. На более низких орбитах замедление времени преобладает, и k является положительным, тогда как на более высоких орбитах преобладает гравитационное смещение, и k является отрицательным.

Второй член – это малая релятивистская периодическая поправка, обусловленная орбитальным эксцентриситетом, которая может быть выражена без приближения как

$$\Delta t_r = \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E = \frac{2 \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{c^2}, \quad (9-65)$$

где:

\mathbf{r} и \mathbf{v} – положение и скорость спутника.

Поскольку $\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}$ является скалярной величиной, она может оцениваться либо в системе координат ECI, либо в системе координат ECEF. Таким образом, интервал координатного времени может быть выражен в виде

$$\Delta t' = (1 + k) \Delta \tau + \Delta t_r.$$

Собственное время спутниковых часов равно:

$$\Delta \tau = (1 - k) \Delta t' + \Delta \tau_r,$$

где:

поправка к собственному времени равна отрицательной поправке к координатному времени: $\Delta \tau_r \equiv -\Delta t_r$.

Путем настройки скорости хода спутниковых часов согласно $\Delta t' = (1 + k) \Delta \tau$, спутниковые часы могут быть приведены к той же средней скорости хода, что и часы на геоиде. Следовательно, собственное время принимает значение

$$\Delta \tau' = \Delta t' + \Delta \tau_r.$$

Таким образом, если не считать малой периодической поправки, спутниковые часы также становятся координатными часами.

Для спутника GPS, большая полуось орбиты которого равна 26 562 км, секулярное смещение скорости хода равно

$$k = -4,464\,733 \times 10^{-10} = -38,575\,293 \text{ мкс/сутки.}$$

Следовательно часы спутника GPS идут приблизительно на 38 мкс/сутки быстрее относительно стандартных часов на геоиде. Эта величина складывается из ускорения хода на 45 мкс/сутки, обусловленного разницей в гравитационном потенциале, и замедления на 7 мкс/сутки, обусловленного разницей в скорости хода.

Этот эффект является существенным по сравнению с номинальной точностью часов, составляющей 10 нс за несколько часов. В целях компенсации разницы в скорости хода перед запуском на спутниковых часах GPS устанавливается дробное смещение, равное $\Delta f/f = -4,464\,733 \times 10^{-10}$, эквивалентное изменению тактовой частоты 10,23 МГц, при этом $\Delta f = -0,004\,5674$ Гц.

Полученная в результате частота равна 10 229 999,995 4326 Гц, таким образом, наблюдателю на геоиде кажется, что частота остается неизменной. Если максимальный эксцентриситет орбиты равен 0,02, периодический член $\Delta\tau$, имеет амплитуду 46 нс при периоде обращения по орбите, равном 11,967 часа. В пользовательском приемнике применяется релятивистская поправка.

Впервые разность скорости хода была измерена в 1977 году на сигналах, полученных со спутника NTS-2, являющегося прототипом GPS, в соответствии с общей теорией относительности с точностью до 0,7% [Buisson *et al.*, 1977]. Релятивистские перепады частоты наблюдались также во время маневров, связанных с изменением орбиты [Epstein *et al.*, 2001]. Амплитуда периодического члена может быть значительной для высокоэллиптических орбит. Например на 12-часовой орбите "Молния", имеющей эксцентриситет 0,722, амплитуда составляет 1,7 мкс.

Эти релятивистские поправки являются достаточными для измерения времени с точностью до наносекунд. Для более точных измерений времени следующим наиболее важным фактором является вклад в гравитационное красное смещение, обусловленное приведенным выше возмущением потенциала $U(r, \phi)$, связанного со сплюснутостью Земли, J_2 . Возмущенная большая полуось a и радиальное расстояние r составляют [Kozai, 1959]

$$a = \bar{a} \left[1 + \frac{3}{2} J_2 \left(\frac{R}{\bar{a}} \right)^2 \sin^2 i \cos(2u) \right] \quad (9-66)$$

и

$$r = \bar{a} \left[1 - e \cos E + \frac{1}{4} J_2 \left(\frac{R}{\bar{a}} \right)^2 \sin^2 i \cos(2u) \right], \quad (9-67)$$

где:

- \bar{a} – усредненная большая полуось;
- e – эксцентриситет (предположительно должен быть небольшим);
- E – эксцентричная аномалия;
- i – наклонение;
- u – аргументы широты.

Таким образом, возмущенная большая полуось a является периодической функцией u . Суммарная энергия E (которая может рассматриваться как определяющая величина для a) равна

$$E = \frac{1}{2} v^2 - U(r, \phi) = \left(\frac{GM}{r} - \frac{GM}{2a} \right) - U(r, \phi) = -\frac{GM}{2\bar{a}} \left[1 + J_2 \left(\frac{R}{\bar{a}} \right)^2 \left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 i \right) \right] \quad (9-68)$$

и согласно требованию является постоянной величиной.

Следовательно, подставляя $\frac{1}{2}v^2$ и $U(r, \phi)$ в выражение для истекшего координатного времени $\Delta t'$, с учетом того что $\sin \phi = \sin i \sin u$, а $u \approx n \Delta\tau$, где $\Delta\tau$ – собственное время от восходящего узла, измеренного спутниковыми часами, находим (NIMA Technical Report, 1997):

$$\Delta t_{obliteness} = \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM}{\bar{a}} J_2 \left(\frac{R}{\bar{a}} \right)^2 \left[\left(1 - \frac{3}{2} \sin^2 i \right) \Delta\tau + \frac{\sin^2 i}{n} \sin(2n \Delta\tau) \right]. \quad (9-69)$$

Для орбиты GPS, имеющей наклонение 55° , периодический член имеет амплитуду в 24 пс.

Согласно *принципу эквивалентности* гравитационные потенциалы Луны и Солнца не оказывают прямого воздействия на часы, находящиеся на спутнике на околоземной орбите, поскольку в этих потенциалах Земля представляет собой свободно падающую систему отсчета.

Таким образом, вышеуказанные потенциалы проявляются в приливно-отливных явлениях. Приливный потенциал, обусловленный сторонним внешним телом, приблизительно определяется как

$$U_{tidal} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U_{ext}}{\partial x^i \partial x^j} x^i x^j \approx \frac{GM_{ext}}{r_E^3} (r_S - r_E)^2, \quad (9-70)$$

где:

r_S и r_E – расстояния до стороннего тела от спутника и от Земли, соответственно;

$$r_S - r_E \approx r \cos i \sin(n \Delta\tau),$$

где:

r – радиус орбиты;

i – наклонение орбиты относительно стороннего тела, являющееся переменной величиной.

Таким образом, поправка к интервалу координатного времени равна:

$$\Delta t_{tidal} \approx \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} \frac{GM_{ext}}{r_E} \left(\frac{r}{r_E} \right)^2 \cos^2 i \left[\Delta\tau - \frac{1}{2n} \sin(2n \Delta\tau) \right]. \quad (9-71)$$

Влияние приливо-отливных явлений на часы GPS невелико. Без учета коэффициента наклона для Луны секулярная скорость дрейфа составляет 15 пс за один оборот, а амплитуда периодического члена равна 1 пс. Для Солнца эти значения составляют 7 пс за один оборот и 0,5 пс, соответственно. Хотя масса Солнца превышает массу Луны примерно в 30 миллионов раз, оно находится на удалении от Земли, примерно в 400 раз превышающем расстояние от Луны до Земли. Поскольку приливный потенциал изменяется обратно пропорционально кубу расстояния, приливо-отливное влияние Солнца составляет примерно половину от лунного.

9.4 Передача времени при помощи электромагнитных сигналов

В специальной теории относительности уравнение распространения света в инерциальной системе отсчета выглядит следующим образом:

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 = 0, \quad (9-72)$$

где:

$\eta_{\mu\nu}$ – метрика Минковского.

Время распространения сигнала между двумя точками A и B вычисляется просто как

$$\Delta t_{AB} = \Delta t_{BA} = \frac{1}{c} \int_A^B \sqrt{\delta_{ij} dx^i dx^j} = \frac{1}{c} \int_A^B \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}. \quad (9-73)$$

Постулат Эйнштейна – это соглашение в специальной теории относительности, используемое для синхронизации часов в инерциальной системе отсчета при помощи электромагнитных сигналов, в частности световых или радиолокационных импульсов. Предположим, что сигнал передается в точке A , а принимается в точке B , где он отражается и передается обратно к приемнику в точке A . Если значения координатного времени передачи, отражения и приема, измеренные часами в точках A и B , равны соответственно t_1 , t_2 , и t_3 , то, по определению, часы синхронизированы, если $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$. Поскольку $\Delta t_{AB} = t_2 - t_1$ и $\Delta t_{BA} = t_3 - t_2$, то

$$t_2 \equiv \frac{1}{2} \left[(t_1 + \Delta t_{AB}) + (t_3 - \Delta t_{BA}) \right] = \frac{1}{2} (t_1 + t_3). \quad (9-74)$$

Таким образом, координатное время отражения t_2 отождествляется с серединой отрезка времени между t_1 и t_3 . Часам A назначаются значения собственного времени $\tau_1 = t_1$ и $\tau_3 = t_3$, а часам B назначается собственное время $\tau_2 = t_2$. При помощи этого метода может быть сформирована шкала

координатного времени, которая определяется по показаниям пространственно распределенной сети стандартных часов. Если часы A синхронизируются с часами B , а часы B синхронизируются с часами C , то часы A также синхронизируются с часами C .

В общей теории относительности уравнение распространения света выглядит как

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = g_{ij} dx^i dx^j + 2g_{0j} dx^j c dt + g_{00} c^2 dt^2 = 0. \quad (9-75)$$

Это квадратное уравнение для приращения координатного времени dt . Таким образом, истекшее координатное время распространения составляет

$$\Delta t = \pm \frac{1}{c} \int_{path} \frac{1}{-g_{00}} \sqrt{(-g_{00} g_{ij} + g_{0i} g_{0j})} dx^i dx^j + \frac{1}{c} \int_{path} \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j. \quad (9-76)$$

Два корня соответствуют распространению света в прямом и обратном направлениях. Следовательно, задавая Δt_{AB} и Δt_{BA} как значения времени распространения в каждом направлении (с пределами интегрирования от A до B и от B до A соответственно), получаем

$$\Delta t_{AB} = \frac{1}{c} \int_A^B \frac{1}{\sqrt{-g_{00}}} \sqrt{\left(g_{ij} + \frac{g_{0i} g_{0j}}{-g_{00}}\right)} dx^i dx^j + \frac{1}{c} \int_A^B \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j \quad (9-77)$$

и

$$\Delta t_{BA} = -\frac{1}{c} \int_B^A \frac{1}{\sqrt{-g_{00}}} \sqrt{\left(g_{ij} + \frac{g_{0i} g_{0j}}{-g_{00}}\right)} dx^i dx^j + \frac{1}{c} \int_B^A \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j. \quad (9-78)$$

Первый член – это время распространения вдоль трассы с пространственным интервалом $dr^2 \equiv \gamma_{ij} dx^i dx^j$, где $\gamma_{ij} \equiv g_{ij} + g_{0i} g_{0j}/(-g_{00})$ является трехмерной метрикой. Второй член определяет эффект Саньяка.

Предположим, импульс посылается эталонными часами в точке A в момент времени t_1 , затем отражается удаленными часами в точке B в момент времени t_2 и принимается эталонными часами A в момент времени t_3 . Координатное время отражения в точке B равно

$$t_2 = \frac{1}{2} [(t_1 + \Delta t_{AB}) + (t_3 - \Delta t_{BA})] = \frac{1}{2} (t_1 + t_3) + \frac{1}{c} \int_A^B \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j. \quad (9-79)$$

В общем случае координатное время отражения будет зависеть от компонентов метрик g_{0j} и $-g_{00}$, а также от трассы распространения света от A до B . Таким образом, если g_{0j} не равно нулю, то однозначная синхронизация часов в эйнштейновском понимании невозможна. Это происходит в случае вращающейся системы отсчета при наличии эффекта Саньяка, определяемого вторым членом.

9.4.1 Геоцентрическая инерциальная система координат

В первом приближении гравитационным потенциалом можно пренебречь. Таким образом, в системе координат ЕСИ данная метрика преобразуется в $-g_{00} \approx 1$, $g_{0j} = 0$, и $g_{ij} \approx \delta_{ij}$.

Интегрируя уравнение $ds^2 = 0$ вдоль трассы, получаем время распространения сигнала:

$$\Delta t = \frac{1}{c} \int_{path} \sqrt{\delta_{ij} dx^i dx^j} = \frac{\rho}{c}, \quad (9-80)$$

где:

ρ – длина трассы распространения в системе ЕСІ.

Это не что иное, как нерелятивистское время распространения вдоль трассы с евклидовым пространственным интервалом $d\rho^2 \approx \delta_{ij} dx^i dx^j$.

Если сигнал передается со спутника в координатное время t_T на движущийся приемник в координатном времени t_R , то координатное время, истекшее при прохождении всей трассы в системе ЕСІ, равно

$$\Delta t = \frac{\rho}{c} = \frac{1}{c} |\mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)| = \frac{1}{c} |\Delta \mathbf{r} + \mathbf{v}_R (t_R - t_T)| \approx \frac{1}{c} |\Delta \mathbf{r}| + \frac{1}{c^2} \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R, \quad (9-81)$$

где:

$\Delta \mathbf{r} \equiv \mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)$ – разница между положением приемника и спутника в координатном времени передачи t_T , а \mathbf{v}_R – это скорость приемника в системе отсчета ЕСІ.

Таким образом, поправка к координатному времени, связанная со скоростью перемещения приемника, равна

$$\Delta t_v \approx \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R / c^2. \quad (9-82)$$

Если приемник находится в положении \mathbf{R} и имеет скорость \mathbf{v}'_R относительно вращающегося геоида, то $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{R}(t_T) - \mathbf{r}_T(t_T)$ и $\mathbf{v}_R = \mathbf{v}'_R + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}$.

В этом случае поправка к скорости приемника превращается в сумму двух членов:

$$\Delta t_v = \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}'_R / c^2 + \boldsymbol{\omega} \cdot [\mathbf{r}_T(t_T) \times \mathbf{R}(t_T)] / c^2 = |\Delta \mathbf{r}| v'_R \cos \theta / c^2 + 2\omega A / c^2, \quad (9-83)$$

где:

$|\Delta \mathbf{r}|$ – дальность;

θ – угол между скоростью перемещения приемника и линией, соединяющей спутник и приемник, а A – область, ограниченная треугольником, вершинами которого являются спутник, приемник и центр Земли, спроектированный на плоскость экватора, в координатное время передачи t_T .

Во вращающейся системе отсчета Земли первый член – это поправка к скорости изменения дальности или к интегрированному доплеровскому сдвигу, а второй член – это поправка Саньяка.

Время распространения Δt – это время, измеренное стандартными часами в состоянии покоя в бесконечности. Для того чтобы определить время распространения относительно часов на поверхности Земли, необходимо учесть влияние геопотенциала. Таким образом, при изменении масштаба $\Delta t' = (1 - W_0/c^2)\Delta t$ время распространения превращается в $\Delta t' = (1 - W_0/c^2)\rho/c$.

Для спутника GPS максимальное время распространения сигнала равно 86 мс, а поправка составляет 60 пс.

Для учета влияния гравитационного геопотенциала U на световой сигнал необходимо включить потенциал как в пространственную, так и во временную части метрики. Компонентами метрического тензора являются

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2, \quad g_{0j} = 0 \quad \text{и} \quad g_{ij} = (1 + 2U/c^2) \delta_{ij}.$$

Следовательно, из уравнения $ds^2 = 0$ истекшее координатное время распространения, измеренное часами в бесконечности, равно

$$\Delta t = \frac{1}{c} \int_{path} \sqrt{\frac{g_{ij}}{-g_{00}}} dx^i dx^j \approx \frac{1}{c} \int_{path} (1 + 2U/c^2) \sqrt{\delta_{ij}} dx^i dx^j = \frac{\rho}{c} + \frac{2}{c^3} \int_{path} U d\rho, \quad (9-84)$$

где:

$$\text{гравитационный потенциал} - U = GM / r.$$

Первый член – это евклидово время распространения, а второй член – гравитационная временная задержка Δt_{delay} . Для прямолинейной трассы в радиальном направлении получаем

$$\Delta t_{delay} = \frac{2}{c^3} \int_R^r \frac{GM}{r} dr = \frac{2 GM}{c^3} \ln \frac{r}{R}. \quad (9-85)$$

В общем случае однако дальность ρ , угол места θ и радиальное расстояние r соотносятся по закону косинусов $r^2 = R^2 + \rho^2 + 2 R \rho \sin \theta$.

Дальность может быть выражена на основе угла места следующим образом:

$$\rho = \sqrt{r^2 - (R \cos \theta)^2} - R \sin \theta.$$

Следовательно, гравитационная временная задержка составляет

$$\Delta t_{delay} = \frac{2}{c^3} \int_0^\rho \frac{GM}{\sqrt{R^2 + \rho^2 + 2 R \rho \sin \theta}} d\rho = \frac{2 GM}{c^3} \ln \left[\frac{r + \sqrt{r^2 - (R \cos \theta)^2}}{R(1 + \sin \theta)} \right]. \quad (9-86)$$

Можно вывести альтернативную формулу, включающую расстояния r , R и ρ симметричным образом.

Поскольку $\sqrt{r^2 - (R \cos \theta)^2} = \rho + R \sin \theta$ и $R \sin \theta = (r^2 - R^2 - \rho^2) / 2 \rho$, аргумент логарифма равен

$$\frac{2 r \rho + \rho^2 + r^2 - R^2}{2 R \rho + r^2 - R^2 - \rho^2} = \frac{(r + \rho)^2 - R^2}{r^2 - (\rho - R)^2} = \frac{(r + \rho + R)(r + \rho - R)}{(r + \rho - R)(r - \rho + R)} = \frac{R + r + \rho}{R + r - \rho}. \quad (9-87)$$

Таким образом, гравитационная временная задержка относительно часов в бесконечности может быть выражена как

$$\Delta t_{delay} = \frac{2 GM}{c^3} \ln \left(\frac{R + r + \rho}{R + r - \rho} \right). \quad (9-88)$$

Если $\rho = r - R$, это уравнение сокращается для временной задержки на прямолинейной трассе.

Следовательно, суммарная релятивистская поправка относительно часов на геоиде равна

$$\Delta t'_{delay} = -\frac{W_0 \rho}{c^3} + \frac{2 GM}{c^3} \ln \left(\frac{R + r + \rho}{R + r - \rho} \right). \quad (9-89)$$

Первый член – это доля в геопотенциале, связанная с изменением масштаба, а второй член – это гравитационная временная задержка. Эти члены вблизи Земли имеют тенденцию к взаимной нейтрализации.

Предварительно рассчитанная гравитационная временная задержка была подтверждена в 1967 и 1971 годах Ирвином Шапиро [Shapiro, 1980] с использованием радиолокатора, измеряющего дальность до планет Меркурий и Венера. Временные задержки при распространении сигнала туда и обратно во время верхнего солнцестояния приблизительно равны 240 мкс и 180 мкс, соответственно. При более точном измерении дальности до спускаемого аппарата "Викинг" на Марсе во время верхнего солнцестояния была отмечена гравитационная задержка примерно в 250 мкс.

Для спутника GPS с радиусом орбиты 26 562 км и углом места 40° релятивистская задержка на трассе составляет 48 пс относительно часов в бесконечности и -3 пс относительно часов на геоиде. Для спутника "LAGEOS" с радиусом орбиты 12 270 км максимальная задержка равна 38 пс относительно часов в бесконечности и 14 пс относительно часов на геоиде. Для сигнала, отправленного с экватора на геостационарный спутник на орбите радиусом 42 164 км, поправка составляет 56 пс относительно часов в бесконечности и -27 пс относительно часов на геоиде.

9.4.2 Геоцентрическая неподвижная относительно Земли система координат

Во вращающейся системе координат ECEF координатное время распространения электромагнитного сигнала равно

$$\Delta t = \frac{\rho'}{c} + \frac{1}{c} \int_{path} \frac{g_{0j}}{-g_{00}} dx^j, \quad (9-90)$$

где:

ρ' – длина трассы распространения в системе отсчета ECEF.

Если приемник обладает скоростью \mathbf{v}'_R , то $\rho' = |\mathbf{R}(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)| \approx |\Delta \mathbf{r}| + \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}'_R / c$ и применяется поправка к скорости изменения дальности $\Delta t_{v'} = \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}'_R / c^2$, где $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{R}(t_T) - \mathbf{r}_T(t_T)$.

Интегральный член в уравнении Δt представляет эффект Саньяка.

Метрические компоненты представляют собой

$$-g_{00} \approx 1, g_{0j} = (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})_j / c \text{ и } g_{ij} \approx \delta_{ij}.$$

Следовательно, составляющая эффекта Саньяка равна

$$\Delta t_{Sagnac} \approx \frac{1}{c^2} \int_A^B (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} = \frac{1}{c^2} \int_A^B \boldsymbol{\omega} \cdot (\mathbf{r} \times d\mathbf{r}) = 2 \frac{1}{c^2} \int_A^B \boldsymbol{\omega} \cdot d\mathbf{A} = \frac{2\boldsymbol{\omega} A}{c^2}, \quad (9-91)$$

где:

A – перпендикулярная проекция области, сформированной центром вращения и конечными точками трассы распространения света.

Трасса с точки зрения вращающейся системы отсчета приближенно представляет собой прямую линию. Для конечных точек (x_A, y_A) и (x_B, y_B) эффект Саньяка может быть выражен как

$$\Delta t_{Sagnac} = \frac{2\boldsymbol{\omega} A}{c^2} = \boldsymbol{\omega} \cdot (\mathbf{r}_A \times \mathbf{r}_B) = \frac{\omega}{c^2} (x_A y_B - y_A x_B). \quad (9-92)$$

Для приемника в состоянии покоя, находящегося на Земле, наблюдатель в системе отсчета ECEF считает приемник стационарным и применяет поправку Саньяка, однако наблюдатель в системе отсчета ECI видит перемещение приемника, связанное с вращением Земли, и применяет поправку к скорости. Суммарное время распространения равно

$$\Delta t = |\Delta \mathbf{r}| / c + \Delta \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}'_R / c^2 + 2 \boldsymbol{\omega} A / c^2 = |\mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)| / c.$$

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Термин "эффект Саньяка" содержится в словаре только того наблюдателя, который находится во вращающейся системе отсчета. Соответствующую поправку, применяемую наблюдателем в инерциальной системе отсчета, следует называть "поправка к скорости".

Как указано в документации GPS [Navstar GPS, 2000], суммарная поправка к времени распространения для сигнала GPS применяется в приемнике пользователя. Максимальная величина эффекта Саньяка составляет 133 нс, что происходит в том случае, когда приемник находится на экваторе, а спутник – на горизонте. С точки зрения наблюдателя в инерциальной системе отсчета, эта

поправка связана с перемещением приемника со скоростью 465 м/с по отношению к системе отсчета ЕСІ в течение времени распространения сигнала, равного 86 мс. Логичность применения данной поправки была продемонстрирована по завершении измерений GPS общего порядка, проведенных одновременно между парами центров отсчета времени по всему миру [Allen *et al.*, 1985].

Эффект Саньяка также должен учитываться при передаче времени посредством электромагнитных сигналов через геостационарный спутник. Это свойство было подтверждено стандартными методами при сравнении с синхронизацией посредством перемещения часов [Saburi, 1976]. Предположим, что Земля представляет собой сферу с радиусом R и что орбита спутника является идеальной окружностью с радиусом r в плоскости экватора. Координаты земной станции на широте ϕ_E и восточной долготе λ_E таковы:

$$x_E = R \cos \phi_E \cos \lambda_E \quad \text{и} \quad y_E = R \cos \phi_E \sin \lambda_E,$$

где:

$$R = 6371 \text{ км} - \text{это средний радиус Земли.}$$

Координаты спутника соответствуют

$$x_S = r \cos \lambda_S \quad \text{и} \quad y_S = r \sin \lambda_S,$$

где:

$$r = 42\,164 \text{ км} - \text{это радиус геостационарной орбиты.}$$

В этом случае для трассы распространения сигнала на линии вверх в восточном направлении от земной станции A до спутника

$$\Delta t_1 = \frac{\omega}{c^2} (x_{EA} y_S - y_{EA} x_S) = \frac{\omega}{c^2} R r \cos \phi_{EA} \sin (\lambda_S - \lambda_{EA}). \quad (9-93)$$

Аналогично для трассы распространения сигнала на линии вниз в восточном направлении от спутника до земной станции B :

$$\Delta t_2 = \frac{\omega}{c^2} (x_S y_{EB} - y_S x_{EB}) = \frac{\omega}{c^2} R r \cos \phi_{EB} \sin (\lambda_{EB} - \lambda_S). \quad (9-94)$$

Суммарная поправка Саньяка равна сумме этих двух членов – $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$. Для трассы распространения сигнала в западном направлении данная поправка имеет то же значение, но с противоположным знаком.

В качестве примера рассмотрим результаты измерения двусторонней спутниковой передачи сигналов времени (TWSTT) из Национального института стандартов и технологий в Боулдере, штат Колорадо (широта $40,0^\circ$, долгота $105,3^\circ$ W), в Военно-морскую обсерваторию США в Вашингтоне (широта $38,9^\circ$, долгота $77,1^\circ$ W) через геостационарный спутник на долготе $97,0^\circ$ W. Поправки Саньяка равны 24,1 нс для линии вверх и 57,7 нс для линии вниз, а суммарная поправка составляет 81,8 нс. Для трассы распространения сигнала в противоположном направлении поправка составляет –81,8 нс.

Однако в реальности Земля не является идеальной сферой. Кроме того, спутниковая орбита подвергается возмущениям, поэтому не является ни идеально круговой, ни лежащей точно в плоскости экватора. Погрешность поправки Саньяка составляет порядка 0,1 нс при погрешности положения земной станции в 300 м и погрешности долготы спутника в 1° или погрешности широты спутника в $0,2^\circ$. Для проведения более точных расчетов необходимо оценить координаты земной станции и спутника, принимая во внимание форму Земли и элементы орбиты спутника.

9.4.3 Межспутниковая линия связи

Анализ электромагнитных сигналов, используемых при обеспечении резервных каналов связи, передаче сигналов времени между спутниками и наземными станциями, а также при обеспечении функциональной совместимости в спутниковых группировках, включает три этапа:

- 1) релятивистское преобразование показаний собственного времени часов в передатчике в координатное время передачи в принятой системе координат;
- 2) расчет координатного времени распространения сигнала, включая релятивистские и нерелятивистские эффекты;
- 3) релятивистское преобразование координатного времени приема в принятой системе координат в показания собственного времени часов в приемнике.

Кроме того, все значения собственного времени должны быть скорректированы с учетом "аппаратного" воздействия, в частности шума при обработке и условий эксплуатации часов.

Рассмотрим релятивистскую передачу сигналов времени между атомными часами A и B , находящимися на борту двух спутников, по линии межспутниковой связи. Предположим, что собственное время τ каждого часа регулируется согласно формуле $\Delta\tau' = (1 + k) \Delta\tau$ так, чтобы результирующее собственное время τ' в среднем равнялось координатному времени t' , реализуемому атомными часами на геоиде. Если каждые часы имеют положение \mathbf{r} и скорость \mathbf{v} в системе отсчета ЕСИ, то $\Delta\tau' = \Delta t' + \Delta t_r$, при этом релятивистская поправка равна

$$\Delta t_r = -2 \frac{1}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E = -\frac{2 \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{c^2}. \quad (9-95)$$

Таким образом, собственное время часов A в координатное время передачи равно

$$\tau'_T = t'_T - 2 \mathbf{r}_T \cdot \mathbf{v}_T / c^2,$$

а собственное время часов B в координатное время приема равно

$$\tau'_R = t'_R - 2 \mathbf{r}_R \cdot \mathbf{v}_R / c^2 + \Delta\tau_R,$$

где:

$\Delta\tau_R$ – смещение синхронизации часов B по отношению к часам A .

Координатное время распространения сигнала, измеренное часами в бесконечности, равно

$$t_R - t_T = \frac{\rho}{c} + \Delta t_{delay}, \quad (9-96)$$

где:

ρ – расстояние по трассе от первого спутника во время передачи до второго спутника во время приема;

Δt_{delay} – гравитационная временная задержка.

Расстояние по трассе равно

$$\rho = |\mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)| = |\Delta\mathbf{r} + \mathbf{v}_R (t_R - t_T)| \approx |\Delta\mathbf{r}| + \frac{1}{c} \Delta\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R, \quad (9-97)$$

где:

$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_R - \mathbf{r}_T$ – расстояние между двумя спутниками в координатное время передачи.

Гравитационная временная задержка равна

$$\Delta t_{delay} = \frac{2 GM}{c^3} \ln \left(\frac{r_T + r_R + \rho}{r_T + r_R - \rho} \right). \quad (9-98)$$

Координатное время распространения сигнала, измеренное часами на геоиде, равно

$$t'_R - t'_T = (1 - W_0/c^2)(t_R - t_T).$$

Следовательно, разность значений идеального собственного времени составляет

$$\tau'_R - \tau'_T = \Delta\tau_R + \frac{|\Delta\mathbf{r}|}{c} + \frac{\Delta\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}_R}{c^2} - \frac{2\mathbf{r}_R \cdot \mathbf{v}_R}{c^2} + \frac{2\mathbf{r}_T \cdot \mathbf{v}_T}{c^2} - \frac{W_0|\Delta\mathbf{r}|}{c^3} + \frac{2GM}{c^3} \ln\left(\frac{r_T + r_R + \rho}{r_T + r_R - \rho}\right). \quad (9-99)$$

Фактические показания часов являются "аппаратными" значениями собственного времени, подверженными смещению из-за шума и условий окружающей среды. Кроме того, может существовать нерелятивистская задержка на трассе распространения, связанная с остаточным влиянием атмосферы.

9.4.4 Релятивистский доплеровский эффект

Рассмотрим передатчик, имеющий положение \mathbf{r}_T и скорость \mathbf{v}_T , передающий электромагнитный сигнал в координатное время t_T , и земную станцию, имеющую положение \mathbf{r}_R и скорость \mathbf{v}_R , которая принимает сигнал в координатное время t_R относительно системы отсчета ECI. Отношение собственной частоты f_T передаваемого сигнала к собственной частоте f_R принимаемого сигнала обратно пропорционально отношению периодов собственного времени.

Следовательно,

$$\frac{f_R}{f_T} = \frac{d\tau_T}{d\tau_R}. \quad (9-100)$$

Это выражение может быть записано с использованием дифференциалов координатного времени следующим образом:

$$\frac{f_R}{f_T} = \frac{(dt_R/d\tau_R) dt_T}{(dt_T/d\tau_T) dt_R}. \quad (9-101)$$

Расстояние от передатчика до приемника равно

$$\rho \equiv \mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T).$$

Разница в значениях координатного времени между приемом и передачей составляет

$$t_R - t_T = \rho/c = |\mathbf{r}_R(t_R) - \mathbf{r}_T(t_T)|/c.$$

Дифференцируя обе части применительно к t_R , получаем

$$1 - \frac{dt_T}{dt_R} = \frac{1}{c} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t_R} + \frac{\partial \rho}{\partial t_T} \frac{dt_T}{dt_R} \right) = \frac{1}{c} \left(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_R - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_T \frac{dt_T}{dt_R} \right), \quad (9-102)$$

где единичный вектор нормали в направлении распространения сигнала от передатчика к приемнику равен

$$\mathbf{n} \equiv \frac{1}{\rho} \boldsymbol{\rho} = \frac{\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_T}{|\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_T|}. \quad (9-103)$$

Следовательно,

$$\frac{dt_T}{dt_R} = \frac{1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_R/c}{1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_T/c}. \quad (9-104)$$

Для измерений, подвергающихся анализу в системе отсчета ЕСИ с гравитационным потенциалом U , компоненты метрического тензора равны

$$-g_{00} = 1 - 2U/c^2, \quad g_{0j} = 0 \quad \text{и} \quad g_{ij} = \delta_{ij}, \quad \text{а пространственно-временной интервал составляет}$$

$$ds^2 = -c^2 (1 - 2U/c^2 - v^2/c^2) dt^2 = -c^2 d\tau^2.$$

Следовательно,

$$\frac{dt_R}{d\tau_R} = \frac{1}{\sqrt{1 - 2U_R/c^2 - v_R^2/c^2}} \quad (9-105)$$

и

$$\frac{dt_T}{d\tau_T} = \frac{1}{\sqrt{1 - 2U_T/c^2 - v_T^2/c^2}}. \quad (9-106)$$

Таким образом,

$$\frac{f_R}{f_T} = \frac{\sqrt{1 - 2U_T/c^2 - v_T^2/c^2}}{\sqrt{1 - 2U_R/c^2 - v_R^2/c^2}} \frac{(1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_R/c)}{(1 - \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_T/c)}. \quad (9-107)$$

Это уравнение релятивистского доплеровского эффекта. Первый множитель – это релятивистская поправка, а второй множитель – классический доплеровский эффект. Раскладывая члены по порядку v^2/c^2 , получаем:

$$\frac{\Delta f}{f_T} = \frac{1}{c} \left(1 + \frac{1}{c} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_T \right) [\mathbf{n} \cdot (\mathbf{v}_T - \mathbf{v}_R)] + \frac{1}{c^2} (U_R - U_T) + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} (v_R^2 - v_T^2), \quad (9-108)$$

где:

$$\Delta f \equiv f_R - f_T.$$

Следует отметить два свойства, присущие данному уравнению. Во-первых, существует член порядка v^2/c^2 , который изначально является нерелятивистским. Во-вторых, не существует смешанных членов вида $\mathbf{v}_T \cdot \mathbf{v}_R/c^2$.

Особый интерес представляет случай, когда передатчик находится на спутнике, а приемник – на вращающейся Земле. Скорость спутника относительно системы отсчета ЕСИ задается уравнением кинетической энергии, а радиальная координата равна

$$r = a (1 - e^2) / (1 + e \cos \nu),$$

где:

a и e – большая полуось и эксцентриситет орбиты; a

ν – истинная аномалия.

Кроме того, скорость перемещения приемника на широте ϕ_R равна

$$v_R = \omega R \cos \phi_R.$$

Гравитационный потенциал в спутниковом передатчике равен $U_T = GM/r$, а гравитационный потенциал в приемнике земной станции равен $U_R = GM/R$.

Таким образом, пренебрегая членами порядка e^2

$$\frac{\Delta f}{f_T} = \frac{1}{c} \left(1 + \frac{1}{c} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_T \right) [\mathbf{n} \cdot (\mathbf{v}_T - \mathbf{v}_R)] + \frac{GM}{c^2} \left(\frac{1}{R} - \frac{3}{2a} \right) - \frac{2GM}{c^2 a} e \cos \nu + \frac{1}{2} \frac{1}{c^2} \omega^2 R^2 \cos^2 \phi_R. \quad (9-109)$$

Первый член – это классический доплеровский эффект. Второй член – секулярная часть комбинации эффектов замедления времени и гравитационного красного смещения. Третий член – остаточный релятивистский периодический эффект. Впервые наличие этого эффекта было отмечено в 1969 году Р. Е. Дженкинсом [Jenkins, 1969]. Четвертый член обусловлен скоростью движения земной станции. Для спутника GPS с эксцентриситетом орбиты 0,02 амплитуда периодического эффекта составляет $6,7 \times 10^{-12}$. Это означает, что несущая частота L1 GPS, равная 1,57542 ГГц, подвергается модуляции, связанной с теорией относительности, амплитудой 0,011 Гц и периодом, равным периоду спутниковой орбиты, составляющему 11,967 ч.

9.5 Заключение

Общая теория относительности составляет основу современных концепций пространства, времени и гравитации. За последние четыре десятилетия разнообразные прогнозы, полученные на ее основе, получили подтверждение в целом ряде экспериментов, проведенных с высокой точностью. Таким образом, теория относительности стала важным практическим соображением для систем точного измерения времени, применяемых в технике, физике и астрономии.

Существуют три основных явления – замедление времени, гравитационное красное смещение и эффект Саньяка. Система глобального определения местоположения может служить примером технической системы, для которой данные явления имеют большое значение. Совокупный эффект замедления времени и красного смещения приводит к секулярному сдвигу скорости хода часов в 38 мкс в день и остаточному периодическому отклонению с амплитудой до 46 нс, в то время как эффект Саньяка, как правило, составляет величину порядка 100 нс. Система GPS служит лабораторией для релятивистских измерений времени на уровне от одной до десяти наносекунд. Иллюстрацией успешного применения теории относительности при проведении измерений времени и местоположения при помощи GPS может служить функциональная точность системы и результаты многочисленных экспериментов, предназначенных для проведения испытаний отдельных явлений в широком диапазоне условий. При проведении измерений времени при помощи часов в космосе с уровнем точности в несколько пикосекунд следует учитывать дополнительные явления, включая влияние красного смещения из-за сплюснутости Земли, приливно-отливные потенциалы Солнца и Луны, а также влияние гравитации на скорость распространения света как такового.

Представляя не только теоретический научный интерес, поправки, внесенные на основе общей теории относительности, необходимы для непрерывного измерения и распространения сигналов точного времени наземными и космическими атомными часами.

Ссылки

- ALLEY C.O. [1983] Proper Time Experiments in Gravitational Fields With Atomic Clocks, Aircraft, and Laser Light Pulses. Quantum Optics, Experimental Gravitation, and Measurement Theory, edited by P. Meystre and M.O. Scully, Plenum, New York, p. 363-427.
- ALLEN D.W., WEISS M.A. and ASHBY N. [1985] Around-the-World Relativistic Sagnac Experiment. *Science* **228**, p. 69-70.
- ASHBY N. [2001] Relativistic Effects on SV Clocks Due to Orbit Changes, and Due to Earth's Oblateness. Proc. 33rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, U. S. Naval Observatory, Washington, D.C, p. 509-524.
- BUISSON J.A., EASTON R.L. and MCCASKILL T.B. [1977] Initial Results of the Navstar GPS NTS-2 Satellite. Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, U. S. Naval Observatory, Washington, D.C, p. 177-200.
- DEPARTMENT of DEFENSE WGS 84 [1997] NIMA Tech. Rep. TR8350.2, 3rd edition. National Imagery and Mapping Agency, Bethesda, MD.
- EPSTEIN M., STOLL E. and FINE J. [2001] Observable Relativistic Frequency Steps Induced by GPS Orbit Changes. Proc. 33rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, U. S. Naval Observatory, Washington, D.C, p. 493-508.

- FRISCH D.H. and SMITH J.H. [1963] Measurement of the Relativistic Time Dilation Using μ -Mesons. *Am. J. Phys.* **31**, p. 342-355.
- HAFELE J.C. and KEATING R.E. [1972] Around-the-World Atomic Clocks: Predicted Relativistic Time Gains; Observed Relativistic Time Gains. *Science* **177**, p. 166-170.
- HEISKANEN W.A. and MORITZ H. [1967] *Physical Geodesy*. Freeman, San Francisco, p. 70.
- JENKINS R. E. [1969] A Satellite Observation of the Relativistic Doppler Shift. *Astron. J.* **74**, p. 960-963.
- KOZAI Y. [1959] The Motion of a Close Earth Satellite. *Astron. J.* **64**, p. 367-377.
- NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Interfaces, ICD-GPS-200C-004 [2000] Arinc Research Corporation, El Segundo, CA.
- POUND R.V. and REBKA Jr .G.A. [1960] Apparent Weight of Photons. *Phys. Rev. Lett.* **4**, 337-341.
- SABURI Y. [1976] Observed Time Discontinuity of Clock Synchronization in Rotating Frame of the Earth. *J. Radio Research Laboratories* **23**, p. 255-265.
- SHAPIRO I.I. [1980] Experimental Tests of General Relativity, in *General Relativity and Gravitation*, edited by A. Held, Plenum, New York, Vol. II, p. 469-489.
- VESSOT R.F.C. and LEVINE M.W. *et al.* [1980] Tests of Relativistic Gravitation With a Space-Borne Hydrogen Maser. *Phys. Rev. Lett.* **45**, p. 2081-2084.

ГЛАВА 10

ОРИЕНТАЦИЯ ЗЕМЛИ И ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

	<i>Стр.</i>
10.1 Введение.....	134
10.2 Ориентация Земли.....	134
10.2.1 Прецессия/нутація.....	136
10.2.2 Движение полюсов.....	136
10.3 Всемирное время (UT).....	137
10.4 Геодезические системы	138
10.5 Эталонные поверхности	138
10.5.1 Геоид	138
10.5.2 Эллипсоид.....	138
10.5.3 Типы координат.....	139
Ссылки	141

10.1 Введение

Системы координат (или опорные системы) состоят из следующих элементов:

- 1) заданной исходной точки;
- 2) направления основных осей;
- 3) набора стандартных моделей и процедур, которые используются для реализации системы.

В таком случае система отсчета – это реализация конкретной системы координат через набор значений координат, присваиваемый определяющим элементам. Ориентацией Земли называются процедуры и модели, используемые для взаимосвязи земной геодезической системы координат и небесной системы.

Более точно и подробно эта информация изложена в условных обозначениях Международной службы вращения и систем координат Земли (IERS), доступных в электронном виде по адресу <http://www.iers.org/iers/products/conv/>.

Небесные системы координат определяются астрономами, при этом в большинстве случаев считается, что исходные точки наиболее современных систем находятся в барицентре Солнечной системы, а полярные оси этих систем определенным образом связаны с осью Земли. Следовательно, третья ось лежит в экваториальной плоскости, перпендикулярной к полярной оси, и направлена на исходную точку, находящуюся в этой плоскости. Таким образом, из перечня положений и возможных движений астрономических объектов формируются соответствующие небесные системы отсчета. Международный астрономический союз определил стандартную небесную систему координат и систему отсчета, которые получили названия Международная небесная система координат (ICRS) и Международная небесная система отсчета (ICRF) соответственно. Система ICRF сформирована из предварительно заданных позиций удаленных источников радиоизлучения.

Аналогичным образом, исходные точки земных систем координат, как правило, расположены в центре массы Земли, а их полярные оси связаны с направлением оси, неподвижной относительно земной коры. Исходная точка долгот в экваториальной плоскости задает третье направление. Аналогично небесным системам отсчета земные системы отсчета представляют собой перечень координат объектов и возможных перемещений. Международная земная система координат (ITRS) и Международная земная система отсчета (ITRF), поддерживаемые службой IERS, приняты в качестве международных стандартов.

10.2 Ориентация Земли

Ориентация Земли определяется пятью углами. В большинстве случаев достаточно трех углов, а пять углов используются, для того чтобы описать соответствующие физические процессы и упростить применение преобразований.

Два угла используются для моделирования изменений направления земной оси в стандартной небесной системе. Эту ось называют небесным промежуточным полюсом (CIP), и ее движение обусловлено прецессией и нутацией Земли. Эти явления вызываются воздействием гравитационного тяготения тел Солнечной системы, главным образом Солнца и Луны, на Землю, которая не обладает сферической формой. Аперриодическая составляющая движения называется прецессией, а периодическая составляющая – нутацией. Обе составляющих движения зависят от положения тел Солнечной системы и инерциальной структуры Земли, однако они могут быть с достаточной точностью смоделированы математическим путем.

Два других угла используются для описания движения оси CIP по поверхности земной коры. Это явление называется "движение полюсов" и обусловлено геофизическими и метеорологическими колебаниями в Земле и ее атмосфере. Основными компонентами являются линейный дрейф и два периодических движения, периоды которых составляют 365 и 435 дней. Движение полюсов с трудом поддается моделированию, поскольку сложно прогнозировать силы, вызывающие движение. В результате эти углы должны наблюдаться при помощи астрономических методов и данные о них должны регулярно сообщаться пользователям.

Ось CIP представляет собой условно определяемый полюс, разделяющий движение полюса земной системы координат (TRS) в небесной системе координат (CRS) на небесное движение оси CIP (прецессию и нутацию), включая все члены, периоды которых превышают 2 дня в системе CRS (значения частоты от $-0,5$ цикла за звездные сутки (cpsd)) ((в организациях, занимающихся измерением времени и частоты, а также в МСЭ использование отрицательных значений частоты не принято и в каждом случае должно быть обосновано)) и $+0,5$ cpsd), и земное движение оси CIP (движение полюсов), включая все члены вне полосы частот обратного суточного движения в системе TRS (частоты ниже $-1,5$ cpsd или выше $-0,5$ cpsd).

Последний из пяти углов характеризует угол вращения Земли и выражается как разность времени $[UT1 - UTC]$, где $UT1$ – это астрономическое время, которое определяется при помощи наблюдений удаленных источников радиоизлучения, а UTC – это равномерная шкала времени – Всемирное координированное время. Основные виды изменения скорости вращения Земли включают постоянное замедление, связанное с приливными явлениями и таянием ледников; колебания, обусловленные изменениями внутреннего распределения массы Земли; колебания, вызываемые метеорологическими факторами, в основном сезонного характера, а также периодические колебания, вызываемые приливами и отливами. Как и движение полюсов, значения разности $UT1 - UTC$ с трудом поддаются моделированию и прогнозированию и должны наблюдаться астрономическим путем и регулярно сообщаться пользователям.

Резолюция В1.8, принятая XXIV Генеральной ассамблеей Международного астрономического союза в августе 2000 года, рекомендует использование "невращающейся исходной точки" [Guinot, 1979] как в геоцентрической небесной системе координат (GCRS), так и в системе ITRS, и эти исходные точки обозначаются как небесная эфемеридная исходная точка (CEO) и земная эфемеридная исходная точка (TEO). Угол вращения Земли определяется как угол, измеренный вдоль экватора CIP между CEO и TEO. Кроме того, данная резолюция рекомендует, чтобы время $UT1$ было линейно пропорционально углу вращения Земли и чтобы преобразования между ITRS и GCRS определялись положением CIP в системе GCRS, положением CIP в системе ITRS и углом вращения Земли.

В математической форме процедуру преобразования TRS в CRS в эпоху t можно записать как

$$[CRS(t)] = Q(t) R(t) W(t) [TRS(t)], \quad (10-1)$$

где $Q(t)$, $R(t)$ и $W(t)$ – это матрицы преобразования, описывающие движение небесного полюса в небесной системе (прецессия/нутация), вращение Земли вокруг оси полюса и движение полюса соответственно. Параметр t , который используется в этом и во всех последующих выражениях, определяется как

$$t = [TT - 2000 \text{ January } 1, 12\text{h TT} - \text{in days}] / 36\,525. \quad (10-2)$$

Следует отметить, что 2000 January 1,5 TT – юлианская дата 2 451 545,0 TT.

При последующем рассмотрении матриц вращения, используемых при преобразованиях, используется нотация R_1 , R_2 и R_3 для обозначения вращений вокруг осей x , y и z системы координат соответственно. То есть

$$R_1(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}; \quad (10-3)$$

$$R_2(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}; \quad (10-4)$$

$$R_3(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10-5)$$

10.2.1 Прецессия/нута́ция

Гравитационные силы, вызываемые телами Солнечной системы, действуют на Землю, форма которой не является сферической. Воздействие этих сил приводит к перемещениям в направлении движения Земли в небесной системе координат. За период в 26 000 лет движущаяся ось описывает в пространстве конус. Это движение называется прецессией. В дополнение к прецессионному движению нута́ция вызывает гораздо менее интенсивное периодическое наклонное колебание оси. Основным периодом нута́ционного перемещения составляет 18,6 лет. Для описания этого движения IAU рекомендует использовать прецессионно-нута́ционную модель IAU 2000A с началом отсчета 1 января 2003 года либо сокращенную версию IAU 2000B для тех, кому необходима модель с уровнем точности в 1 миллисекунду дуги (mas).

Обращаясь к уравнению (10-1), прецессионно-нута́ционную матрицу $Q(t)$ можно записать как

$$Q(t) = \begin{bmatrix} 1 - aX^2 & -aXY & X \\ -aXY & 1 - aY^2 & Y \\ -X & -Y & 1 - a(X^2 + Y^2) \end{bmatrix} \bullet R_3(s) \quad (10-6)$$

при

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{8}(X^2 + Y^2),$$

где:

X и Y – "координаты" CIP в системе CRS, представленные в стандартных моделях IAU 2000A или IAU 2000B, которые основаны на геофизической и астрономической теориях.

Данная формулировка моделирует движение полюса, обусловленное лунно-солнечным и планетарным движениями. В нее не входит понятие, которое в литературе называется "планетарной прецессией", представляющее собой перемещение эклиптики (пути движения Земли по орбите) и вызываемое планетарной гравитацией. До того как в 2000 году IAU принял данную процедуру для описания прецессии и нута́ции Земли, эклиптика использовалась в качестве основной плоскости координат, а ее движение описывалось стандартным выражением, основанным на астрономической теории. Комбинированная прецессия/нута́ция полюса Земли и эклиптики получила название общая прецессия.

Величина s определяет положение небесной эфемеридной исходной точки на экваторе небесного промежуточного полюса. Эта величина задается формулой

$$s = XY/2 + \sum_{i=0}^{i=3} c_i t^i + \sum_k C_k \sin \alpha_k + 1,71 t \sin \Omega + 3,57 t \cos 2\Omega \\ + 743,53 t^2 \sin \Omega + 56,91 t^2 \sin (3F - 2D + 2\Omega) + 9,84 t^2 \sin (2F + 2\Omega) - 8,85 t^2 \sin 2\Omega \quad (10-7)$$

Таблицы и программное обеспечение для реализации описанного выше алгоритма приведены в условных обозначениях IERS [McCarthy and Petit, 2003].

10.2.2 Движение полюсов

Полюс CIP также движется в системе TRF, однако его перемещение невозможно смоделировать. Вместо этого необходимо наблюдать за данным перемещением и соответствующим образом учитывать его при выполнении преобразований между системами координат. Перемещение представляется в виде полярных координат x и y , выраженных в угловых единицах измерения. Ось x направлена вдоль меридиана 0° , а ось y направлена вдоль 90° западной долготы. Система меридианов косвенно определяется принятыми позициями объектов в системе координат TRF.

Движение полюсов складывается главным образом из приблизительно линейного дрейфа и двух периодических членов. Первый – это свободное движение полюса, названное чандлеровским колебанием в честь его первооткрывателя Сета К. Чандлера. Его период составляет 435 дней и соответствует свободному движению нетвердой Земли, которое изначально было предсказано Л. Эйлером для абсолютно твердой Земли в 1758 году. Вторым основным компонентом движения полюсов является годовое перемещение, вызываемое сезонным перераспределением массы атмосферы Земли.

Степень этих перемещений мала, однако имеет большое значение для точного преобразования между системами отсчета. Линейный дрейф составляет несколько сантиметров в год в направлении 75° западной долготы. При периодическом движении СР перемещается с амплитудой в несколько десятков метров.

В математической форме, если вновь обратиться к уравнению (10-1), это вращение выражается как

$$W(t) = R_3(-s')R_1(y)R_2(x). \quad (10-8)$$

Информация о полярных координатах должна отслеживаться и сообщаться пользователям. Эти данные можно получить в Международной службе вращения и систем координат Земли (IERS). Эти данные представлены в виде серии файлов, содержащих самую свежую информацию и предварительные расчеты на будущее. См. <http://www.iers.org/iers/products>.

Величина s' для XXI века может быть приблизительно выражена как функция времени согласно формуле

$$s' = -47 \mu\text{s} t. \quad (10-9)$$

10.3 Всемирное время (UT)

Солнечное время основано на вращении Земли относительно Солнца. Среднее солнечное время было введено в целях устранения несоответствий в солнечном времени, вызванных отклонением эклиптики и переменной скоростью Земли на ее околосолнечной орбите. Оно представляет собой часовой угол воображаемой точки, движущейся равномерно вдоль небесного экватора с той же скоростью, что и средняя скорость движения Солнца вдоль эклиптики. На практике это интервалы звездного времени, которые наблюдаются напрямую астрономическими методами, а затем преобразуются в интервалы среднего солнечного времени путем деления на 1,00273790935.

Среднее солнечное время, определенное для меридиана долготы 0°, называется UT1. Для определения разности между этим временем и всемирным координированным временем (UTC) был проведен ряд астрономических наблюдений. Необработанные результаты наблюдений времени называются UT0. Для получения UT1 эти данные должны корректироваться с учетом движения полюсов Земли. Влияние движения полюсов может составлять несколько сотых долей секунды. Служба IERS получает эти данные и поддерживает шкалу времени UT1.

Результаты наблюдений показывают, что скорость вращения Земли подвержена колебаниям, которые могут быть разделены на три вида: секулярные, нерегулярные и периодические. Секулярные колебания скорости вращения связаны с видимым линейным увеличением продолжительности дня, обусловленным, как правило, приливным трением. Это явление вызывает снижение скорости вращения Земли, которое приводит к увеличению продолжительности дня на величину приблизительно от 0,0005 до 0,0035 с в столетие. Нерегулярные изменения скорости являются, по-видимому, результатом случайных ускорений, но могут быть взаимосвязаны с физическими процессами, происходящими на Земле или внутри нее. Они включают десятилетние колебания, типичные периоды которых составляют 5–10 лет, а также отклонения, происходящие в более коротких временных масштабах.

Периодические отклонения связаны с периодически повторяющимися физическими процессами, воздействующими на Землю. Приливные явления, вызванные Луной и Солнцем в твердой оболочке Земли, приводят к периодическим колебаниям продолжительности дня порядка 0,0005 с с периодами в 1 год, 1/2 года, 27,55 дней и 13,66 дней.

Если вновь обратиться к уравнению (10-1), это вращение определяется как

$$R(t) = R_3(-\theta). \quad (10-10)$$

θ – это угол вращения Земли между СЕО и ТЕО в день t на экваторе СР. Эта величина может быть получена из стандартного отношения к UT1 [Capitaine *et al.*, 2000]:

$$\theta(T_u) = 2\pi(0,7790572732640 + 1,00273781191135448T_u), \quad (10-11)$$

где:

T_u = (юлианская дата – 2 451 545,0), а $UT1 = UTC + (UT1 - UTC)$, или эквивалентно

$$\theta(T_u) = 2\pi(UT1 \text{ Julian Days elapsed since } 2\,451\,545,0 + 0,7790572732640 + 1,00273781191135448T_u).$$

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Более подробная информация приведена в главе 7 "Шкалы времени".

10.4 Геодезические системы

Как уже рассматривалось выше, исходные точки земных систем координат, как правило, расположены в центре массы Земли, а их полярные оси связаны с направлением оси, неподвижной относительно земной коры. Исходная точка долгот в экваториальной плоскости задает третье направление. Земные системы отсчета представляют собой перечень координат объектов и возможных перемещений. Эти координаты могут быть выражены в виде набора декартовых (x, y, z) координат объекта. Зачастую они описываются при помощи широты, долготы и высоты размещения над некоторой эталонной поверхностью. Эта поверхность может представлять собой эталонный эллипсоид или поверхность геопотенциала.

10.5 Эталонные поверхности

10.5.1 Геоид

Можно считать, что Земля состоит из набора поверхностей, каждая из которых обладает одинаковым потенциалом гравитации. Этот потенциал включает не только гравитационный потенциал, но и потенциал, связанный с центробежными силами. Эти поверхности называются геопами, а поверхность, приблизительно совпадающая со средней поверхностью моря, называется геоидом. Геоид является естественной эталонной поверхностью, поскольку отвесная линия перпендикулярна этой поверхности, а измерение высот вдоль отвесной линии не представляет трудностей. Геоидом, как правило, именуется поверхность, совпадающая со средним уровнем моря. Она определяется путем описания ее высоты над эталонным эллипсоидом, называемой геоидальной высотой, вдоль линии, перпендикулярной эллипсоиду.

Высота рельефа поверхности над геоидом, измеренная вдоль отвесной линии, называется высотой среднего уровня моря или ортометрической высотой.

10.5.2 Эллипсоид

Эталонный эллипсоид используется для описания приблизительной формы Земли в справочных целях. Он определяется большой полуосью (экваториальным радиусом) и сжатием (отношением между экваториальным и полярным радиусами). Сжатие определяется как

$$f = \frac{a-b}{a}, \quad (10-12)$$

где:

a и b – экваториальный и полярный радиусы соответственно.

Высота рельефа поверхности над эллипсоидом вдоль линии, перпендикулярной эллипсоиду, называется эллипсоидальной высотой. Например, для WGS 84 эллипсоид $a = 6\,378\,137,0$ м, $a f = 1,0/298,2572235630$.

10.5.3 Типы координат

10.5.3.1 Геоцентрические координаты

Геоцентрические координаты указываются относительно центра Земли. Они могут быть заданы в векторном формате, т. е. в декартовых координатах объекта (x, y, z) , либо в виде геоцентрической широты ϕ' и долготы λ . Соотношение между двумя видами координат определяется как

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos \phi' \cos \lambda \\ \cos \phi' \sin \lambda \\ \sin \phi' \end{bmatrix}. \quad (10-13)$$

Геоцентрической широтой точки местонахождения называется угол между экватором эталонного эллипсоида и линией от центра эллипсоида до точки местонахождения. Геоцентрическая долгота – это угол между эталонным меридианом эллипсоида и меридианом точки местонахождения.

10.5.3.2 Геодезические координаты

Геодезические координаты определяются по отношению к эталонному эллипсоиду. Они, как правило, задаются относительно геодезической широты ϕ и геодезической долготы λ . Геодезическая широта – это угол между эллипсоидным экватором и нормалью к эллипсоиду, проходящей через данный объект. Разность между геоцентрической и геодезической широтой показана на Рисунке 10-1. Геодезическая долгота – это угол между эталонным меридианом эллипсоида и меридианом данного объекта. Она совпадает с геоцентрической долготой, если эталонный эллипсоид в каждом случае имеет одинаковые оси и эталонный меридиан. Соотношение геоцентрических декартовых координат и геодезических координат может быть выражено как

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} (N_\phi + h) \cos \phi \cos \lambda \\ (N_\phi + h) \cos \phi \sin \lambda \\ [(1 - e^2) N_\phi + h] \sin \phi' \end{bmatrix}, \quad (10-14)$$

где:

h – эллипсоидная высота;

e – эксцентриситет эллипсоида, определяемый как

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = \sqrt{2f - f^2};$$

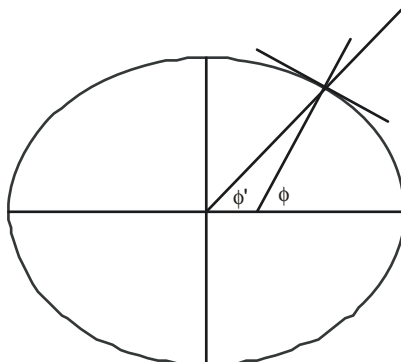
N_ϕ – эллипсоидный радиус кривизны меридиана, выраженный как

$$N_\phi = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}. \quad (10-15)$$

Высота задается эллипсоидной высотой h , которая является расстоянием от данного объекта до поверхности эталонного эллипсоида, измеренным вдоль линии, проходящей через данный объект перпендикулярно эллипсоиду.

РИСУНОК 10-1

Разность между геоцентрической широтой ϕ' и геодезической широтой ϕ



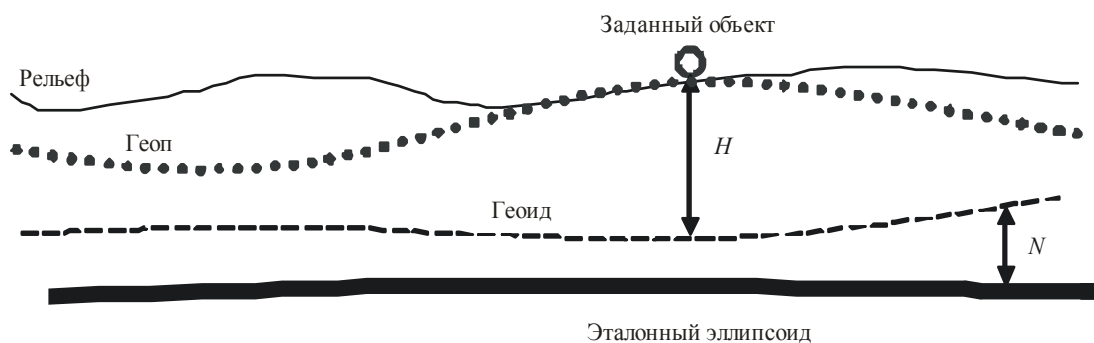
Sat_time_freq-10-01

10.5.3.3 Астрономические координаты

Измерение астрономических координат производится путем привязки к направлению локальной вертикали или отвесной линии. Локальная вертикаль перпендикулярна гравитационной эквипотенциальной поверхности на данном объекте. Эти поверхности называются геопами, а геоп, обладающий потенциалом Земли на уровне моря, называется геоидом. Таким образом, астрономическая широта – это угол между направлением вертикали и плоскостью экватора Земли. Астрономическая долгота – это угол между плоскостью, содержащей вертикаль, и плоскостью эталонного меридиана. Отклонение вертикали – это угол между эллипсоидной нормалью и вертикалью, который описывается путем задания угловых компонентов в направлении север–юг и в направлении восток–запад. Высота данного объекта над геоидом называется высотой над средним уровнем моря или ортометрической высотой H . Она измеряется вдоль направления вертикали. Высота геоида над эталонным эллипсоидом называется геоидальной высотой N и измеряется вдоль нормали к эллипсоиду.

РИСУНОК 10-2

Геодезические эталонные поверхности



Sat_time_freq-10-02

10.5.3.4 Геодезические исходные данные

Геодезические исходные данные используются для формирования общей геодезической модели Земли и в классическом варианте определяются эталонным эллипсоидом и характеристиками

начальной точки. Благодаря современной космической геодезии появилась возможность формирования системы координат, связанной непосредственно с центром Земли, без использования эталонного эллипсоида. Результаты подобных наблюдений часто используются для формирования исходных данных, состоящих из набора параметров и координат определяющего объекта, которые могут использоваться для расширения системы путем проведения дифференциальных измерений в отношении определяющих объектов. Преобразования между исходными данными могут быть выражены следующим образом:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_1 - \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} D & -R_3 & R_2 \\ R_3 & D & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_1, \quad (10-16)$$

где:

параметры преобразования (T_1, T_2, T_3), параметры вращения (R_1, R_2, R_3) и параметр масштабирования, определяемые эмпирически – путем сравнения координат заданных объектов двух различных наборов исходных данных.

10.5.3.5 Международная земная система отсчета

Международная служба вращения и систем координат Земли (IERS) в качестве международного стандарта представляет Международную земную систему координат (ITRS). Начальной точкой системы служит геоцентр массы Земли, включая океаны и атмосферу, и по определению не обладающий остаточным вращением относительно горизонтальных перемещений на поверхности Земли. В соответствии с международными рекомендациями единицей длины является метр (СИ), задающий шкалу, которая согласуется с координатой времени TCG для геоцентрической локальной системы координат.

Реализация ITRS, произведенная инженерно-технологическим центром (Product Center) ITRS службы IERS, называется Международной земной системой отсчета (ITRF). Эта система создана на основе космических геодезических наблюдений. В настоящее время материалы, касающиеся ITRF, почти ежегодно публикуются инженерно-технологическим центром ITRS в технических примечаниях IERS. Цифры (yy), следующие за наименованием "ITRF", обозначают последний год, данные за который были использованы при формировании системы отсчета. Так, например, ITRF97 обозначает систему данных о местоположениях и скоростях движения станций, созданную в 1999 году с использованием всех данных IERS, имеющихся до 1998 года.

Отчет рабочей группы ITRF по исходным данным ITRF [Ray *et al.*, 1999] содержит полезную информацию относительно истории определения исходных данных ITRF. Кроме того, в нем подробно рассматриваются методические вопросы, касающиеся некоторых параметров определения исходных данных, в частности исходной точки и шкалы.

Ссылки

- CAPITAINE N., GUINOT B. and MCCARTHY D. D. [2000] *Astronomy & Astrophysics*. p. 355-398.
- GUINOT B. [1979] *Time and the Earths Rotation*, IAU Symp. 82, ed. D. D. McCarthy & J. D. H. Pilkington, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, 7.
- MCCARTHY D.D. and PETIT, G. (editors) [2003] *IERS Conventions (2003)*, *IERS Technical Note 32*, International Earth Rotation Service.
- RAY J., BLEWITT G., BOUCHER C., EANES R., FEISSEL M., HEFLIN M., HERRING T., KOUBA J., MA C., MONTAG H., WILLIS P., ALTAMIMI Z., EUBANKS T.M., D. GAMBIS PETIT, G., RIES J., SCHERNECK H.G., SILLARD P. and P. [1999] *Report of the Working Group on ITRF Datum*.

ГЛАВА 11

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН
И ФАКТОРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

	<i>Стр.</i>
11.1 Введение.....	144
11.2 Сравнительные данные по задержке при измерении дальности в тропосфере и ионосфере.....	144
11.3 Моделирование задержки при измерении дальности в тропосфере Земли.....	145
11.3.1 Изменчивость ионосферной и тропосферной задержек при измерении дальности	146
11.4 Временная задержка в ионосфере, глобальный характер ее изменения, суточная изменчивость и изменчивость в течение солнечного цикла.....	147
11.4.1 Методы корректировки ионосферной временной задержки, среднемесячные модели, обновленные модели, использование ионосферных данных в реальном времени SBAS/WAAS/IGS, двухчастотная коррекция	149
11.4.2 Ионосферные явления высшего порядка, влияющие на временную задержку	151
11.4.3 Эффекты мерцания	151
11.5 Заключение	152
Ссылки	152

11.1 Введение

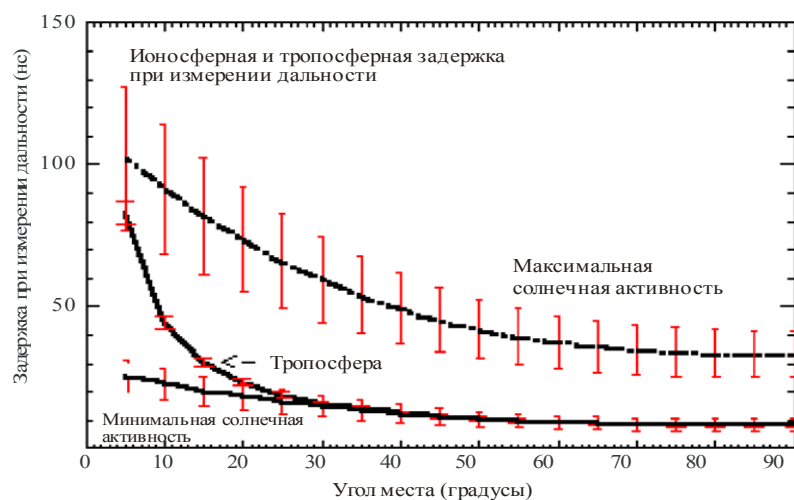
Самым значительным источником потенциальных ошибок при передаче сигналов точного времени через спутник являются задержки распространения радиоволн в нейтральной атмосфере и ионосфере Земли. В настоящей главе приведена информация о задержках при измерении дальности, а также представлены и рассмотрены различные методы их компенсации. Задержки при измерении дальности в тропосфере и в ионосфере различаются по нескольким важным аспектам. Задержка при измерении дальности в тропосфере Земли не является дисперсионной; т. е. она не является функцией частоты, по крайней мере не в стандартном диапазоне радиочастот, используемом для измерения дальности до искусственных спутников Земли. Задержка при измерении дальности в ионосфере, напротив, является дисперсионной; она изменяется обратно пропорционально частоте. Таким образом, абсолютная задержка при измерении дальности может быть рассчитана непосредственно вдоль трассы от спутника до пользователя путем определения относительной задержки при измерении дальности на двух частотах, разнесенных надлежащим образом. Задержка при измерении дальности в тропосфере Земли не может быть измерена непосредственно, но для того чтобы сделать выводы о влиянии тропосферной временной задержки на передачу сигналов времени через спутник с высокой точностью, могут использоваться некоторые модели или косвенные методы измерения.

11.2 Сравнительные данные по задержке при измерении дальности в тропосфере и ионосфере

На Рисунке 11-1 изображены типичные значения задержки при измерении дальности в зависимости от угла места для тропосферы Земли и для среднеширотной ионосферы на частоте L1 GPS при различных уровнях солнечной активности. На Рисунке 11-1 можно отметить ряд важных моментов, на которые следует обратить внимание. Во-первых, тропосферная задержка при измерении дальности для больших углов места аналогична задержке в среднеширотной ионосфере в период минимальной солнечной активности. Во-вторых, задержка при измерении дальности в функции угла места от зенита до угла величиной 5° возрастает на коэффициент, приблизительно равный 3 для ионосферы и более 10 – для тропосферы. Это, безусловно, связано с тем фактом, что тропосфера находится гораздо ближе к поверхности Земли, чем ионосфера, и при малых углах места обзор через тропосферу происходит под большим наклоном, чем в случае обзора через ионосферу, которая находится на большей высоте.

РИСУНОК 11-1

Сравнительная задержка при измерении дальности в тропосфере и среднеширотной ионосфере в зависимости от угла места



И наконец, на Рисунке 11-1 необходимо обратить внимание на полосы приблизительных погрешностей в 1σ . Погрешности средней ионосферной задержки при измерении дальности приблизительно равны $\pm 25\%$ при любом уровне солнечной активности, в то время как полосы погрешностей в 1σ тропосферы не превышают $\pm 5\%$. Кроме того, задержка при измерении дальности, связанная с тропосферой Земли, является гораздо более стабильной, изменяясь менее чем на 20% по всему земному шару. Это связано с тем фактом, что приблизительно 90% тропосферной задержки при измерении дальности обусловлены так называемым "сухим компонентом" тропосферы Земли, пропорциональным абсолютному давлению и абсолютной температуре, который к счастью для жителей Земли, как правило, не изменяется более чем на несколько процентов от номинальных значений. Поскольку большая часть тропосферы приходится на "сухой (dry) компонент", ее задержку в ней при измерении дальности проще смоделировать, чем задержку Земли.

11.3 Моделирование задержки при измерении дальности в тропосфере Земли

Существует множество моделей земной тропосферы, часть из которых была рассмотрена Спилкером [1996]. Основой большинства тропосферных моделей является функция угла места, которая связывает задержку при измерении дальности в зените с задержкой при меньших углах места. Хотя каждая функция угла места несколько отличается от других, для большинства из них просто требуется определить задержку при измерении дальности в зените, а затем умножить ее на число, которое является функцией угла места, для получения искомой эквивалентной задержки для угла места наблюдаемого спутника. Существуют климатологические методы определения вертикальной задержки при измерении дальности, а также методы определения фактической вертикальной задержки при помощи измерений, близких к реальному времени, с использованием точных двухчастотных данных, полученных с нескольких спутников GPS при различных углах места, и подбором задержки при измерении дальности для получения наиболее подходящей на данный момент времени функции угла места. При использовании этого метода подбора кривой заявленная точность коррекции задержки при измерении дальности составляет величину порядка 1–2 см.

Вертикальная задержка при измерении дальности, связанная с влиянием тропосферы, приблизительно определяется как

$$\Delta r = 10^{-6} c \int N(h) dl, \quad (11-1)$$

где:

c – скорость света (м/с);

$N(h)dl$ – суммарный индекс рефракции тропосферы, выраженный в единицах рефракции.

Ниже приведена одна из множества форм задержек при измерении дальности в зените, в которой сухой (или гидростатический) компонент и так называемый "влажный" (wet) компонент разделены и в которой могут быть учтены местная температура, давление и водяные пары:

$$\Delta r_{total} = \Delta r_{Dry} + \Delta r_{Wet}; \quad (11-2)$$

$$\Delta r_{dry} = \frac{0.62 \times P_{millibars}}{T_{Kelvin}} \quad (\text{м}), \quad (11-3)$$

где:

P – суммарное давление в миллибарах;

$$\Delta r_{wet} = \frac{8.3 \times 10^2 \times P_{WV}}{T^2} \quad (\text{м}), \quad (11-4)$$

где:

P_{WV} – парциальное давление водяного пара.

Если использовать типичные значения для давления (1013 миллибар), температуры (15° Цельсия или 288 °К) и парциального водяного давления, эквивалентного 8,5 миллибара, что соответствует относительной влажности 50%, то в этом случае суммарная вертикальная тропосферная задержка при измерении дальности составляет

$$\Delta r_{\text{total}} = 2,18 + 0,08 = 2,26 \text{ (м)}. \quad (11-5)$$

В данном типичном случае "влажный" компонент, обусловленный наличием водяного пара в атмосфере, составляет лишь $0,08/2,26 = 3,5\%$ от суммарной вертикальной тропосферной задержки при измерении дальности.

Пользователи, которым нужна лишь информация о средней тропосферной задержке при измерении дальности для различных широт, могут использовать единую международную постоянную величину, приблизительно определяемую как

$$\Delta r \frac{2,47}{\sin E + 0,0121} \text{ (м)}, \quad (11-6)$$

где:

E – угол места.

Упрощенная функция отображения имеет вид

$$m(E) = \frac{1,0121}{\sin E + 0,0121} \quad (11-7)$$

Климатологическая модель тропосферной задержки при измерении дальности, которая прошла тщательную проверку на основе последних данных радиозондирования, полученных с нескольких североамериканских станций, была разработана Коллинзом и Лэнгли [Collins and Langley, 1999]. Они описали полученные результаты с точки зрения отклонений от нормальных, или гауссовых, остаточных погрешностей. Созданная ими модель, получившая название UNB3, полностью следует гауссовому распределению для точек приблизительно от -5σ до $+4\sigma$, что является впечатляющим результатом для климатологической модели, не имеющей исходных данных в реальном времени. Описание факторов ограничений для данной модели приведено в [Collins and Langley, 1996].

11.3.1 Изменчивость ионосферной и тропосферной задержек при измерении дальности

Как было показано выше, изменчивость задержки при измерении дальности в тропосфере Земли связана, главным образом, с содержанием водяных паров в атмосфере. Однако абсолютная величина задержки при измерении дальности в зените, обусловленная наличием водяных паров, незначительна и приводит к погрешности порядка всего лишь нескольких сантиметров, и даже при малых углах места не может являться основным фактором, влияющим на суммарную погрешность измерения дальности. Абсолютная изменчивость задержки при измерении дальности в тропосфере Земли гораздо выше, однако она может быть практически полностью ликвидирована при помощи двухчастотного приемника GPS, как описывается ниже.

Тем пользователям, которым требуются поправки с наибольшей точностью как для ионосферных, так и для тропосферных задержек при измерении дальности, для ликвидации в первую очередь ионосферной задержки при измерении дальности следует использовать двухчастотную коррекцию, а затем рассмотреть возможность использования функций "подбора" для остаточных погрешностей измерения дальности в зависимости от угла места, что позволит независимо определить тропосферную задержку при измерении дальности. Если в наличии имеется лишь одночастотный приемник GPS, то остаточная ионосферная задержка при измерении дальности, даже после применения одного из различных методов ионосферной коррекции, скорее всего будет превышать остаточную задержку при измерении дальности в тропосфере. Ситуация сохранится даже при использовании климатологической модели задержки при измерении дальности, в частности модели UNB3.

11.4 Временная задержка в ионосфере, глобальный характер ее изменения, суточная изменчивость и изменчивость в течение солнечного цикла

Задержка при измерении дальности в ионосфере является дисперсионной, т. е. она изменяется обратно пропорционально частоте следующим образом:

$$\Delta t = \frac{40.3}{cf^2} \int_0^{Sat.} Ndl \quad (с), \quad (11-8)$$

где:

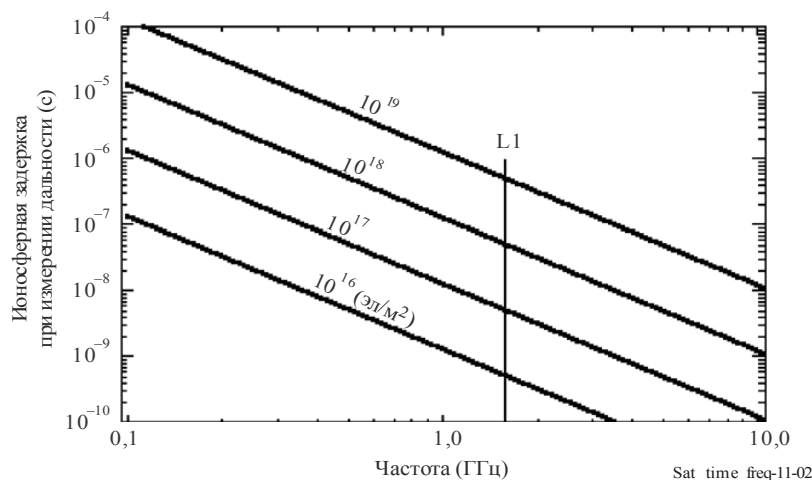
- $\int_0^{Sat.} Ndl$ – суммарное количество свободных электронов вдоль трассы распространения радиоволн от наземной точки измерения до спутника обычно обозначается термином "общее электронное содержание" (ТЕС) вдоль этой трассы;
- c – скорость света (м/с);
- f – рабочая частота системы (Гц).

Поскольку ионосферная задержка при измерении дальности является функцией частоты, наилучшим методом корректировки ее воздействия при передаче сигналов времени является ее измерение на двух частотах, которые разнесены достаточно далеко друг от друга, что означает непосредственное измерение ионосферной временной задержки. Все другие методы являются менее прямыми и обладают заведомо более низкой точностью.

Типичные значения ТЕС в ионосфере Земли меняются в диапазоне от 10^{16} до 10^{19} эл/м² столба атмосферы. Соответствующие значения однонаправленной ионосферной временной задержки в зависимости от частоты для значений ТЕС в диапазоне от 10^{16} до 10^{19} эл/м² столба атмосферы показаны на Рисунке 11-2. Частота L1 GPS, равная 1,57542 ГГц, на Рисунке 11-2 показана вертикальной линией. Значительная величина изменений ТЕС, составляющая приблизительно три порядка от абсолютной величины, связана с множеством факторов, среди которых время суток, время года, расположение станции и ультрафиолетовое ионизирующее излучение Солнца.

РИСУНОК 11-2

Однонаправленная ионосферная задержка при измерении дальности как функция частоты для различных значений ТЕС от 10^{16} до 10^{19} эл/м² столба атмосферы. Частота L1 GPS показана вертикальной линией на отметке 1,575 ГГц



На Рисунке 11-3 изображена усредненная месячная ионосферная вертикальная задержка при измерении дальности в мировом масштабе, измеряемая в метрах, на частоте L1 GPS в условиях

равноденствия при максимальной солнечной активности. Следует отметить, что максимальные задержки при измерении дальности имеют место не на географическом экваторе, а на широтах приблизительно $\pm 15^\circ$ по каждую сторону от магнитного экватора. В то время как для данной модели, представляющей средние условия при измерении дальности, максимальные значения погрешности составляют лишь 24 м на частоте L1, абсолютные значения могут быть гораздо выше, а ежедневная изменчивость, как правило, тоже высока.

На Рисунке 11-4 изображена ежедневная, сезонная и связанная с солнечным циклом изменчивость северной средней широтной ионосферы. На рисунке построен график значений задержки при измерении дальности для каждого дня четырех месяцев – января, марта, июня и сентября с 1986 по 1990 год для станции, расположенной вблизи Бостона (Массачусетс), т. е. в период повышения солнечной активности в солнечном цикле, пик которого пришелся на период 1989–1990 годов. Следует отметить значительную ежедневную изменчивость кривых суточной задержки при измерении дальности в течение любого заданного месяца, а также сезонные влияния, причем в месяцы равноденствия абсолютные значения выше, чем в месяцы солнцестояния. Самые низкие значения наблюдаются в июне. Следует обратить внимание на значительные изменения абсолютного значения задержки при измерении дальности в условиях увеличения цикла солнечной активности с 1986 по 1989 год и в 1990 году. В отношении моделей ионосферной задержки при измерении дальности, которые не обновляются путем регулярных измерений на близлежащей местности, можно надеяться лишь на воспроизведение среднемесячной задержки при измерении дальности; следовательно, остаточная среднеквадратичная ежедневная изменчивость ионосферной задержки при измерении дальности, составляющая приблизительно 25%, остается неоткорректированной.

РИСУНОК 11-3

Средняя мировая величина ионосферной задержки при измерении дальности, выраженная в метрах, на частоте L1 GPS в условиях равноденствия при максимальной солнечной активности

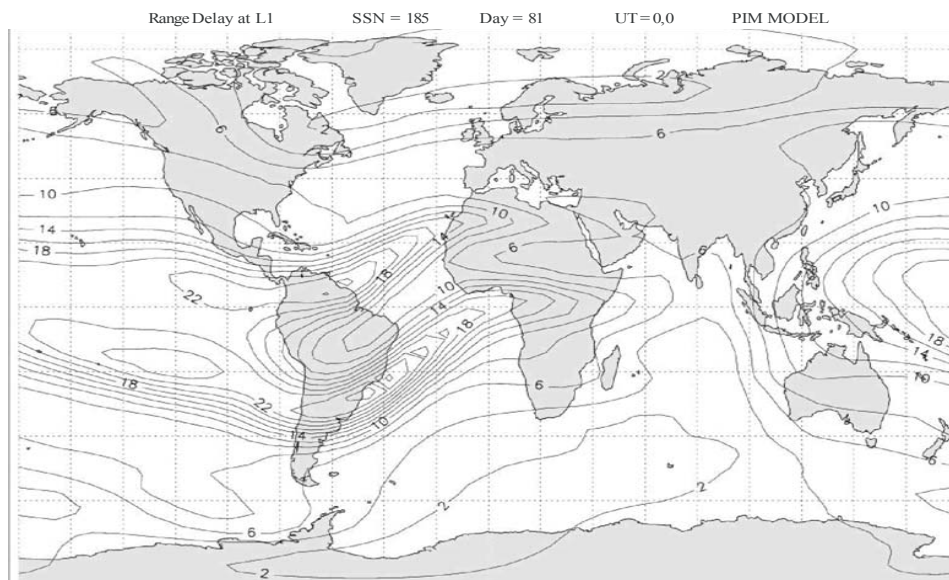
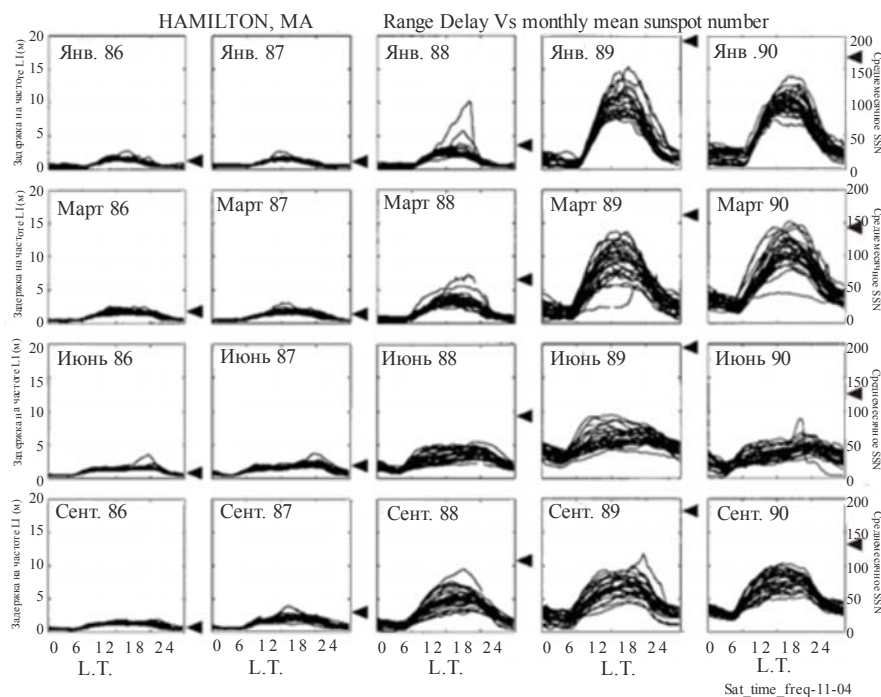


РИСУНОК 11-4

Ежемесячный сравнительный график суточных кривых эквивалентной вертикальной ионосферной задержки при измерении дальности на частоте L1 GPS для четырех месяцев на протяжении пяти лет повышения солнечной активности. Ежемесячное среднее количество солнечных пятен (SSN) изображено большими стрелками в правой части каждого ежемесячного сравнительного графика



11.4.1 Методы корректировки ионосферной временной задержки, среднемесячные модели, обновленные модели, использование ионосферных данных в реальном времени SBAS/WAAS/IGS, двухчастотная коррекция

Будучи неоткорректированными, типичные значения вертикальных погрешностей псевдодальности GPS, связанных с TEC, могут составлять порядка 10–25 м. Известно, что *вертикальная* ионосферная задержка при измерении дальности немного к югу от Юго-Восточной континентальной части Соединенных Штатов Америки во время двух последних сильных геомагнитных бурь достигала значений свыше 40 м. Обычно в этом регионе среднемесячные значения *вертикальной* задержки при измерении дальности составляют всего лишь около 10 м. К счастью, существует несколько методов корректировки влияния ионосферы на передачу сигналов времени. Эти методы приводятся ниже, начиная с простейшего варианта – отсутствия каких-либо попыток коррекции вообще – и заканчивая методом двухчастотной коррекции, который обеспечивает наилучшие результаты. Несмотря на некоторое увеличение стоимости базового оборудования, данный метод позволяет исключить ионосферу из рассмотрения, по крайней мере до уровня коррекции, составляющего несколько сантиметров.

Существует по крайней мере пять различных методов коррекции влияния ионосферной задержки при измерении дальности. Будет рассмотрен каждый из этих методов наряду с относительной сложностью при применении коррекции. Указанные методы позволяют достичь следующих приблизительных уровней коррекции.

0% – отсутствие каких-либо попыток коррекции ионосферной задержки при измерении дальности. Это простейший вариант, который включен для полноты исследования. По сравнению с этим "нулевым" вариантом даже "постоянная" поправка для каждого "сезона" и точки местонахождения, без учета суточной зависимости, дает значительно лучшие результаты.

- 50%** – использование алгоритма коррекции ионосферной задержки (ICA), разработанного в целях коррекции приблизительно половины (среднеквадратическое значение) ионосферной задержки при измерении дальности. Это стандартная коррекция, используемая практически на всех одночастотных приемниках GPS. Коэффициенты для ICA передаются в составе спутникового сообщения и обновляются Главным центром управления GPS, по крайней мере раз в десять дней либо чаще при наличии существенных изменений в пятидневном среднем солнечном потоке радиоизлучения за десятидневный период. В связи с ограниченной длиной сообщения GPS количество коэффициентов для алгоритма ICA не превышает восьми [Klobuchar, 1987].
- 75%** – использование современной ионосферной модели, требующей тысяч коэффициентов, которая тем не менее позволяет свести среднемесячные колебания ионосферной задержки при измерении дальности к остаточному смещению примерно в 10%. Основными моделями являются модель международной эталонной ионосферы (IRI) [Bilitza, 2001] и модель Бенга. Обе модели можно найти в интернете. При применении подобных моделей пользователи GPS вынуждены иметь дело с остаточной ежедневной изменчивостью, приблизительно равной 20–25%, а в дальнейшем ошибка σ с учетом погрешности среднемесячного значения составит примерно 22–27%. Следует отметить, что на данном уровне коррекции еще не используются исходные данные, близкие к реальному времени, а применяется только современная модель. Она позволяет описывать среднемесячные ионосферные колебания с большей точностью, чем алгоритм ICA, в котором используется всего 8 коэффициентов. Таким образом, при увеличении количества коэффициентов с восьми до нескольких тысяч происходит повышение среднеквадратического показателя примерно с 50% до 75%.
- 90%** – использование ионосферных поправок, передаваемых космическими системами контроля и коррекции (SBAS), в составе корректирующих сообщений SBAS. Подобные сообщения отправляются, например, системами WAAS и EGNOS (см. описание систем контроля и коррекции, приведенное в главе 2). Эта значительно усовершенствованная система поправок обеспечивает близкие к реальному времени значения ионосферной задержки при измерении дальности, полученные из сети опорных станций SBAS, используемых для формирования координатной сетки поправок ионосферной задержки при измерении дальности с ячейками размером 5° на 5° по широте и долготе в регионе покрытия. Безусловно, данный метод коррекции может использоваться только в тех регионах, где существует SBAS и где имеются в наличии соответствующие наземные опорные станции для определения ионосферных задержек при измерении дальности. Такое усовершенствование системы путем использования актуальных, близких к реальному времени ионосферных данных требует наличия одночастотного приемника GPS, способного также принимать сообщения SBAS. Оцениваемое значение поправки, равное всего 90%, при использовании, например, системы WAAS, даже с применением близких к реальному времени данных задержки при измерении дальности, обусловлено необходимостью интерполяции значений вертикальной ионосферной задержки при измерении дальности в координатной сетке с размером ячейки 5° на 5° , предоставленных системой WAAS, до эквивалентных значений задержки при измерении наклонной дальности вдоль линии видимости до каждого спутника GPS, наблюдаемого пользователем.
- 99%** – использование двухчастотного приемника согласно описаниям, приведенным в главе 1, посвященной GPS, и в главах, посвященных передаче сигналов времени, в целях практически полного устранения ионосферной задержки при измерении дальности вдоль трассы до каждого наблюдаемого спутника GPS. Данный метод позволяет напрямую измерять наклонную ионосферную задержку при измерении дальности по линии видимости вдоль трассы каждого спутника GPS и не содержит никаких теоретических расчетов, а также никакой интерполяции значений задержки при определении дальности, измеренных вдоль другой трассы. На данный момент это наилучший метод коррекции, который следует использовать и принять в качестве стандарта для всех гражданских пользователей GPS, после того как на будущих спутниках GPS и Galileo будет полностью внедрена новая частота L5. Вероятнее всего это произойдет в начале второго десятилетия XXI века.

Каждый из упомянутых выше процентных уровней коррекции обладает рядом недостатков. Недостатком нулевой коррекции, безусловно, является наибольшая величина ошибок, а коррекция на 99% значительно увеличивает стоимость в связи с необходимостью приобретения двухчастотного приемника GPS. Алгоритм ICA, используемый для коррекции приблизительно 50% (среднеквадратическое значение) ошибок, связанных с ионосферной задержкой при измерении дальности, имеет мало недостатков, так как уравнения для его реализации приведены в интерфейсном контрольном документе ICD-200, и это является стандартной процедурой, используемой в одночастотных приемниках GPS.

11.4.2 Ионосферные явления высшего порядка, влияющие на временную задержку

В уравнении 11-1, связывающем ионосферную временную задержку с ГЕС, используется форма первого порядка показателя преломления ионосферы. Полная форма показателя преломления, в которой пренебрегают теми членами, абсолютная величина которых менее 10^{-9} [Brunner and Gu, 1991], состоит из нескольких дополнительных членов, включающих в себя

$$n = 1 - (X/2) \pm (XY/2) \cos \theta - (X^2/8), \quad (11-9)$$

где:

- 1 – член свободного пространства;
- $X/2$ – член первого порядка, пропорциональный $1/f^2$;
- $XY/2 \cos \theta$ – пропорциональное $1/f^3$;
- $X^2/8$ – пропорциональное $1/f^4$.

Если эти члены называются А, В и С соответственно, то абсолютная величина членов высшего порядка на частотах GPS при наиболее благоприятных ионосферных условиях в мире равна

$$B \approx 2 \times 10^{-4}, \quad C \approx 2 \times 10^{-7}, \quad D \approx 2 \times 10^{-8}.$$

Отношения членов высшего порядка С и D к члену первого порядка В при наихудших ионосферных условиях равны

$$C/B \approx 10^{-3}, \quad D \approx 10^{-4}.$$

Таким образом, эти члены более высокого порядка составляют 0,1% и 0,01% члена первого порядка на частотах GPS, даже при экстремально высокой ионосфере, рассматриваемой здесь. Аналогичные заключения были сделаны Иоанидесом и Стрейнджвэйсом [Ioannides and Strangeways, 2002], при этом наибольший вклад в членах высшего порядка составлял всего несколько сантиметров.

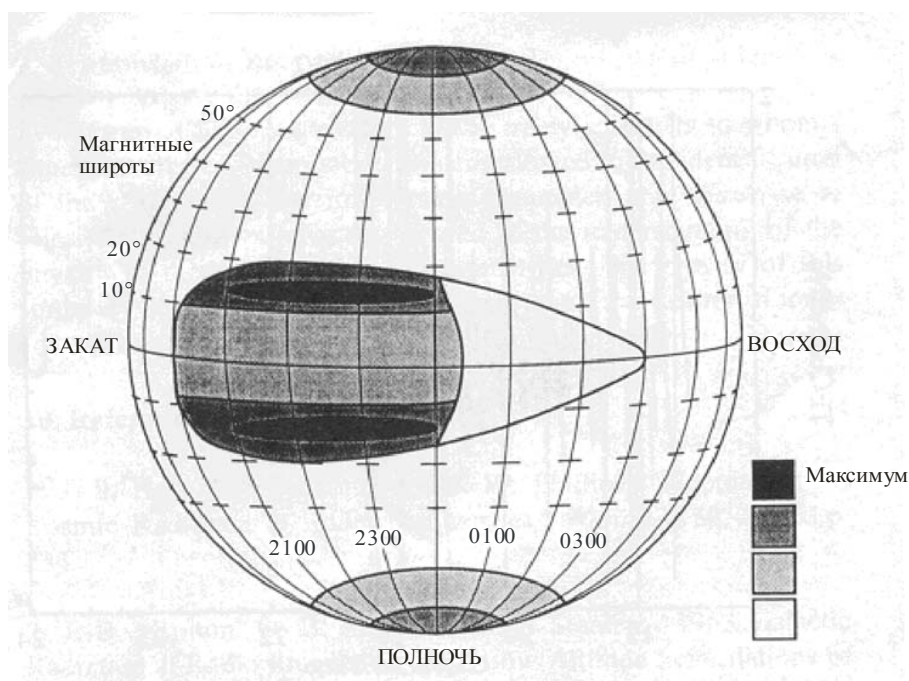
11.4.3 Эффекты мерцания

Как амплитудные, так и фазовые мерцания могут влиять на краткосрочные функциональные характеристики различных приемников GPS. Однако появление эффектов значительного замирания или фазового "дрожания" из-за мерцания в регионах средних широт отмечается крайне редко. Даже в регионах, близких к экватору, в которых используется некоторое усреднение сигнала по времени, эффекты мерцания не должны вызывать каких-либо проблем. В экваториальных регионах эффекты глубокого амплитудного замирания, как правило, наблюдаются только в послезакатные часы, до полуночи по местному времени, и то только в месяцы равноденствия, в те годы, когда солнечная активность относительно высока. Различные уровни мерцания в разное время и в разных регионах земного шара наглядно представлены на Рисунке 11-5. Был проведен ряд обзоров, посвященных эффектам мерцания, в числе которых обзор, сделанный Гудманом и Ааронсом [Goodman and Aarons, 1990], описывающий морфологию амплитудного мерцания для различных частот, которые обычно используются в спутниковой связи и передаче сигналов времени. Мерцание может ограничивать процесс передачи сигналов точного времени через спутник, однако эффекты мерцания могут быть сведены к минимуму, если в течение суток избегать интервалов времени и периодов дня, в течение которых эти эффекты обычно проявляются. Например, несмотря на то что глубокое амплитудное замирание, которое может вызывать сбои в передаче сигналов на частотах GPS на полярных

широтах, случается редко, по возможности следует избегать осуществления передачи сигналов времени в периоды магнитных возмущений. Аналогичным образом следует избегать передачи сигналов времени после заката Солнца в регионах, близких к экватору, особенно в годы высокой солнечной активности. И наконец, целесообразно постоянно контролировать отношение плотности несущая/шум C/N_0 в реальном времени для каждого спутника GPS, с тем чтобы всегда иметь надежный метод по определению наличия глубокого амплитудного мерцания, которое может повлиять на принимаемый сигнал.

РИСУНОК 11-5

Карта мира с магнитными координатами и местным временем, отображающая регионы, в которых обычно наблюдается мерцание



Sat_time_freq-11-05

11.5 Заключение

Наилучший совет, который можно дать сообществу по передаче сигналов времени, касающийся влияния ионосферных задержек на передачу сигналов времени, – бежать со всех ног в ближайшее место, где продаются двухчастотные приемники GPS, и купить по одному устройству для каждого конца спутниковой линии передачи сигналов времени. Использование двухчастотного приемника GPS – это простой и наилучший метод, гарантирующий автоматическую компенсацию свыше 99% ионосферной задержки при измерении дальности на каждой спутниковой трассе. При невозможности использования двухчастотного приемника GPS следует применять ионосферные поправки SBAS (WAAS, EGNOS) для получения значений ионосферной временной задержки, если такие поправки доступны в том регионе мира, где производится передача сигналов времени. Если нет доступных ионосферных поправок SBAS, то при помощи значений TEC, полученных с близлежащей станции IGS, можно добиться лучшей коррекции, нежели при использовании необновленных ионосферных моделей.

Ссылки

BILITZA D. [2001] The International Reference Ionosphere 2000. Radio Science, Vol. 236, p. 261-275.

- BRUNNER F.K. and GU M. [1991] An Improved Model for the Dual Frequency Ionospheric Correction of GPS Observations. *Manuscripta Geodaetica*, Vol.16, p. 205-214.
- COLLINS P. and LANGLEY R.B. [July 1999] Tropospheric Delay Prediction for the WAAS User. *GPS World*, p. 52-58.
- COLLINS P., LANGLEY R. and LAMANCE J. [19th-21 June, 1996] Limiting Factors in Tropospheric Propagation Delay Error Modelling for GPS Airborne Navigation. Presented at The Institute of Navigation 52nd Annual Meeting, Cambridge, Massachusetts, USA.
- GOODMAN J. M. and AARONS J. [1990] Ionospheric Effects on Modern Electronic Systems. *Proc. of the IEEE*, Vol. 78, p. 512-528.
- IOANNIDES R. T. and STRANGWAYS H. J. [August 2002] Improved Ionospheric Correction for Dual Frequency GPS. *Proceedings of the XXVIIth General Assembly of URSI*, Maastricht, Netherlands.
- KLOBUCHAR J. A. [May 1987] Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-23, No. 3, p. 325-331.
- SPIPKER Jr. J.J. [1996] Tropospheric Effects on GPS. Chapter 12 in *Global Positioning System: Theory and Applications*. Edited by B.W. Parkinson and J.J. Spilker Jr., publ. by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Washington, DC. Vol. 1, p. 517-546.

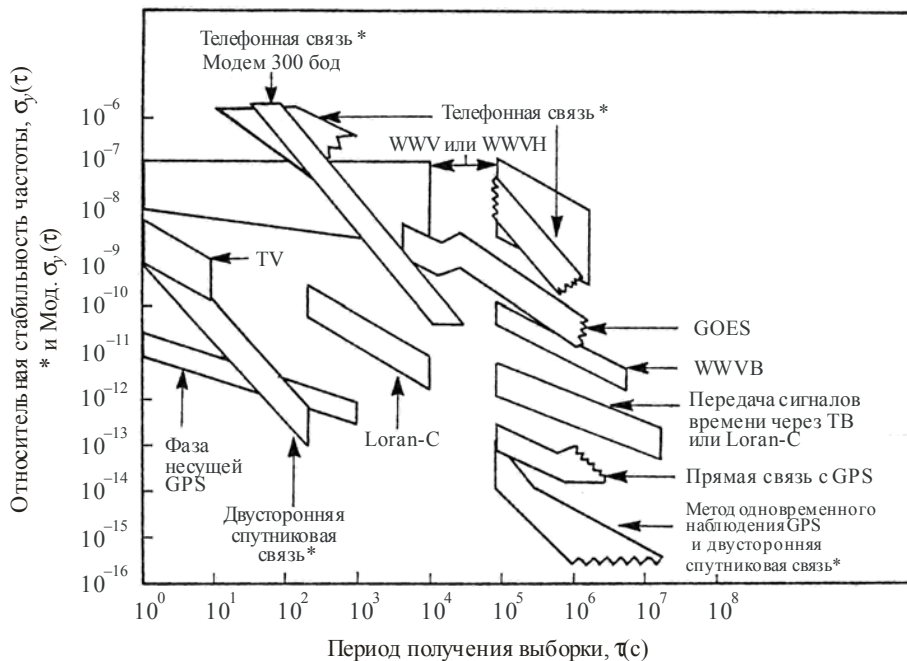
ГЛАВА 12

**ГЛОБАЛЬНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ
КАК ОСНОВНОЙ ИНСТРУМЕНТ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ**

	<i>Стр.</i>
12.1 Введение.....	156
12.2 GPS и время	157
12.2.1 Каким образом система GPS распространяет сигналы времени?.....	157
12.2.2 Каким образом система GPS осуществляет синхронизацию часов на больших расстояниях?	158
12.3 Прикладные задачи передачи сигналов времени с помощью GPS	159
12.3.1 Одноканальная передача сигналов времени при помощи кода C/A GPS методом одновременного наблюдения	161
12.3.2 Процедуры сравнения по одной станции (нулевая базовая линия)	161
12.3.3 Дифференциальная калибровка GPS.....	162
12.3.4 "Замыкание цепочки" при передаче сигналов времени вокруг Земли.....	162
12.4 GPS в сравнении с другими методами передачи сигналов времени	163
12.4.1 Сравнение с двунаправленной спутниковой передачей и распространением сигналов времени и частоты	163
12.4.2 Сравнение с лазерной передачей сигналов времени	164
12.5 Последние разработки в области передачи сигналов времени посредством GPS.....	165
12.5.1 Многоканальная передача сигналов времени по методу одновременного наблюдения GPS.....	165
12.5.2 Антенны с температурной стабилизацией.....	168
12.5.3 Использование фазы несущей GPS	169
12.6 Применение системы GLONASS.....	170
12.7 Заключение	170
Ссылки	172

РИСУНОК 12-2

**Эксплуатационные характеристики различных методов
передачи сигналов времени
(Рисунок любезно предоставлен Д. В. Алланом)**



Sat_time_freq-12-02

12.2 GPS и время

GPS представляет собой систему навигации, которая показала себя как надежный источник данных о местоположении для военных и гражданских организаций. Однако малоизвестным является тот факт, что система GPS оказалась важным и ценным средством, содействующим работе хронометрических организаций [Klerczynski *et al.*, 1996]. GPS – это универсальный инструмент глобального масштаба, который может использоваться как для распределения сигналов времени произвольному числу пользователей, так и для синхронизации часов на больших расстояниях с высокой степенью прецизионности и точности. В настоящем документе кратко рассматривается применение системы GPS хронометрическими организациями в указанных целях, а также освещаются последние достижения в данной области.

12.2.1 Каким образом система GPS распространяет сигналы времени?

В процессе работы навигационной системы компьютер, входящий в состав приемника GPS, способен определять разницу между временем на часах пользовательского приемника и временем GPS или эталонным временем для GPS, которое представляет собой время UTC (USNO), т. е. время UTC, определяемое в Военно-морской обсерватории США. Часы, установленные в приемнике GPS пользователя, как правило, построены на основе кварцевых кристаллов. Однако в ряде случаев внешние часы, такие как рубидиевый стандарт частоты или цезиевый стандарт частоты, могут служить локальным эталоном для приемника GPS. Локальный приемник может быть запрограммирован на отображение времени UTC (USNO), передаваемого GPS, либо на отображение времени GPS, так как навигационная система выдает разницу между временем на часах локального приемника и временем GPS. Следует отметить, что время UTC (USNO) привязывается ко времени UTC, как определяется в ВРМ. Время UTC (USNO), как правило, поддерживается в пределах 10 нс относительно времени UTC.

Одним из преимуществ организаций по отсчету времени перед навигационными организациями является количество спутников GPS, необходимых для работы. Навигаторам для определения их местоположения требуется четыре спутника – три для определения их местоположения и один для определения сдвига показаний их местных часов относительно времени GPS. Поскольку местонахождение хронометристов неизменно и координаты их известны, то требуется всего один спутник GPS для получения величины сдвига показаний их местных часов относительно времени GPS. Следовательно, для того чтобы воспользоваться данным преимуществом, алгоритмы работы их хронометрических приемников были изменены.

В процессе работы навигационной системы компьютер, входящий в состав приемника GPS, способен определять разницу между временем GPS или эталонным временем, используемым для GPS, которое представляет собой время UTC (USNO), и временем на часах, установленных в пользовательском приемнике. Часы, установленные в приемнике GPS пользователя, как правило, построены на основе кварцевых кристаллов. Однако в ряде случаев внешние часы, такие как рубидиевый стандарт частоты или цезиевый стандарт частоты, могут служить локальным эталоном для приемника GPS. Локальный приемник может быть запрограммирован на отображение времени UTC, поскольку навигационная система выдает разницу между временем на часах локального приемника и временем GPS.

Одним из преимуществ хронометрических организаций (организаций по отсчету времени) перед навигационными организациями является количество спутников GPS, необходимых для работы. Навигаторам для определения их местоположения требуется четыре спутника – три для определения их местоположения и один для определения сдвига показаний их местных часов относительно времени GPS. Поскольку местонахождение хронометристов неизменно и координаты их известны, то требуется всего один спутник GPS для получения величины сдвига показаний их местных часов относительно времени GPS. Следовательно, для того чтобы воспользоваться данным преимуществом, алгоритмы работы их хронометрических приемников были изменены.

12.2.2 Каким образом система GPS осуществляет синхронизацию часов на больших расстояниях?

Эта операция производится при помощи метода, который называют GPS Common View (одновременное наблюдение за спутником GPS). При использовании метода одновременного наблюдения две станции наблюдают одновременно за одним и тем же спутником GPS. Каждый из пользователей на обеих станциях фиксирует разницу показаний своих местных часов (Т) или местного эталона времени и времени GPS в один и тот же момент времени, используя тот же спутник, при помощи приемника GPS, который называется устройством передачи сигналов времени GPS (TTU). TTU GPS представляет собой специальный приемник GPS, запрограммированный для вычисления и отображения данных, представляющих интерес для организаций по отсчету времени.

$$\text{Пользователь А наблюдает: } A = T_a - \text{время GPS.} \quad (12-1a)$$

$$\text{Пользователь В наблюдает: } B = T_b - \text{время GPS.} \quad (12-1b)$$

Существенным моментом является то, что оба пользователя наблюдают за одним спутником в один и тот же момент времени. Это необходимо для минимизации ряда погрешностей [Allan and Weiss, 1980]. Вычисляя разность между двумя наборами чисел, получаем

$$A - B = (T_a - \text{время GPS}) - (T_b - \text{время GPS}) = T_a - T_b. \quad (12-2)$$

Значения разности между двумя местными часами могут быть легко рассчитаны, поскольку показания общих часов GPS выпадают из расчета. Это несложный и в то же время эффективный процесс, поскольку он не зависит от времени GPS.

За прошедшие годы удалось достичь значительного прогресса в плане повышения прецизионности и точности применительно к возможностям GPS по распространению сигналов времени и синхронизации часов. В настоящее время уровень точности при одностороннем распространении сигналов времени в случае использования приемников с легко распознаваемым кодом (C/A) составляет 10–25 нс, а уровень точности синхронизации времени составляет 2–15 нс. Для этих оценок указывается диапазон значений, чтобы показать, что согласно результатам экспериментов достижимый итоговый уровень зависит от пользователя и конкретного места установки

оборудования. Эти значения представляют собой выборку результатов, полученных к настоящему моменту пользователями в различных областях, таких как электросвязь и метрология.

12.3 Прикладные задачи передачи сигналов времени с помощью GPS

В рамках сетей электросвязи требуется синхронизация основных узлов [Butterline, 1993]. Это может быть осуществлено внутренними средствами (при помощи синхроимпульсов) либо внешними (путем синхронизации). GPS без затруднений обеспечивает функциональную возможность, позволяющую осуществить внешнюю синхронизацию часов в основных узлах сети с точностью до значений лучше 100 нс по времени и 1×10^{-13} по частоте. В терминах, принятых в отрасли электросвязи, это означает соответствие требованиям уровня страты I, подразумевающим точность 1 мс по времени и 1×10^{-11} по частоте.

В некоторых сетях *электросвязи* время и в особенности частота поддерживаются совокупностью атомных часов, таких как рубидиевые стандарты частоты, которые синхронизируются с UTC через GPS. Как правило, скорость хода отдельных рубидиевых часов в составе совокупности относительно времени UTC определяется путем усреднения результатов наблюдения GPS в течение определенного интервала времени. Выбор интервала зависит от требований конкретной рассматриваемой системы. Необходимо иметь информацию о разности между скоростью хода отдельных рубидиевых часов и временем UTC с наибольшей достижимой прецизионностью и точностью. Это позволит обеспечить, что если по какой-либо причине будет потеряна связь с системой GPS, сдвиг скорости хода рубидиевых часов относительно времени UTC может экстраполироваться с использованием последних полученных по результатам наблюдения значений до тех пор, пока связь с системой GPS не будет восстановлена. Если связь потеряна, то это может означать или не означать, что в данной системе электросвязи сразу же возникнут проблемы. Все зависит от того, сколько времени потребуется, чтобы синхронизация между узлами ухудшилась до такой степени, когда будет невозможно установить между ними согласованную связь. Это может потребовать от одного часа до нескольких недель в зависимости от конкретной исследуемой системы.

Одной из отраслей, которые в настоящее время все чаще пользуются услугами GPS, является *электроэнергетика*. Сегодня энергетические компании используют GPS для синхронизации часов на станциях контроля, задачей которых является обнаружение сбоев в снабжении электроэнергией в зонах, представляющих интерес. Они обнаруживают источник неисправности (обрыв на линии электропитания) методом триангуляции, т. е. путем определения времени ее возникновения на трех станциях, часы на которых синхронизированы. В электроэнергетике также необходимо, чтобы часы различных региональных поставщиков услуг были синхронизированы. Синхронизация имеет большое значение для обеспечения эффективной передачи электроэнергии от одной энергосети к другой. Если электроэнергия между энергосетями передается со сдвигом фазы, это приводит к снижению суммарной доступной мощности.

В метрологии при измерении времени сигналы GPS начали использоваться примерно 15 лет назад Национальным бюро стандартов (NBS, в настоящее время – Национальный институт стандартов и технологий, NIST). Была предложена система, использующая CV-наблюдения за спутниками GPS в целях передачи ими сигналов точного времени и частоты [Allan and Weiss, 1980]. Для решения этих задач в NBS, а затем в ряде коммерческих организаций были разработаны специальные приемники. Это были одноканальные одночастотные приемники, использующие код C/A и способные одновременно отслеживать только один спутник. Для работы с ними необходимо было периодически выпускать расписания CV-наблюдений. Метод CV был продуманным и перспективным; он не только снижал некоторые погрешности физического происхождения, но и служил для компенсации преднамеренного снижения точности времени GPS, введенного в 1990 году под названием селективная доступность (SA) [Lewandowski and Thomas, 1991].

Внедрение системы GPS позволило добиться существенного прогресса в плане передачи сигналов времени и частоты. При том что на начальных этапах использования GPS погрешности сравнения времени находилась в диапазоне от 10 до 20 нс, в первое время существовала возможность сравнения максимальных функциональных характеристик наилучших мировых атомных стандартов, используя периоды интеграции, равные примерно десяти дням. С того момента был внедрен ряд

усовершенствований, включая использование сверхточных координат антенн, точных эфемерид и результатов измерений параметров ионосферы [Lewandowski and Thomas, 1991]. Они привели к тому, что в начале 1990-х годов погрешность сравнения времени составила примерно 3 нс. Параллельно этому на порядок были усовершенствованы атомные стандарты и появилась возможность сравнения новых часов (например, цезиевых эталонов частоты HP5071A) с максимальными функциональными характеристиками для усредненных периодов, составляющих несколько дней.

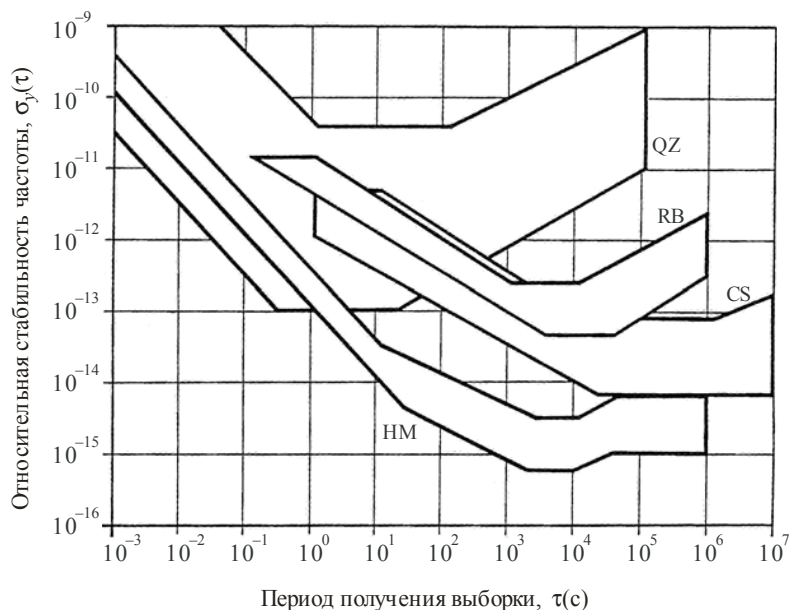
Сегодня в метрологии можно наблюдать появление ряда новых, более совершенных стандартов частоты. Эти устройства, по всей видимости, способны выдавать точность до 1×10^{-15} и обладают кратковременной нестабильностью порядка 1×10^{-16} . Эксплуатационные характеристики стандарта частоты довольно часто определяются уровнями дисперсий на основе отклонений его частоты в широком диапазоне интервалов времени – от одной секунды до нескольких месяцев. Существует множество математических разновидностей такого рода статистических формул, используемых для описания характеристик часов. На Рисунке 12-3 изображена одна из них $\sigma_y^2(\tau)$ или, как ее часто называют, дисперсия Аллана [1987], для разнообразных видов стандартов частоты, например кварцевых, рубидиевых, цезиевых, а также водородного мазера. Подобное графическое представление эксплуатационных показателей стандарта частоты отображает различные характеристики, которые являются функциями шумовых процессов, происходящих внутри стандарта частоты. На самом деле для идентификации типа шума может быть использован наклон кривой. Если наклон равен нулю или кривая параллельна оси ординат, это означает, что достигнута предельная характеристика (порог мерцания) в стабильности стандарта. Тип шума, который идентифицирован с помощью данного процесса, – это частотная модуляция мерцаний.

Поскольку новейшие устройства не могут перемещаться и не работают постоянно, важно, чтобы их сравнение происходило в приемлемое время, что позволит определять наличие систематических различий между ними. Измерение с точностью 1 нс в течение 24-часового периода соответствует точности частоты, равной 1×10^{-14} . Следовательно, при имеющихся на сегодняшний день уровнях характеристик сравнение двух подобных устройств заняло бы несколько недель. Вот почему так важно развивать и совершенствовать методы передачи сигналов времени, позволяющие осуществлять подобные сравнения в приемлемые периоды времени.

Шкалы времени TAI и UTC базируются на показаниях примерно 220 атомных часов, расположенных в 50 лабораториях отсчета времени по всему миру. Отдел ВІРМ, занимающийся измерением времени, производит расчеты этих шкал времени. Единственным действенным способом сравнения этих часов является метод CV GPS, основанный на результатах одноканальных измерений при помощи кода C/A. По этой причине организации по отсчету времени участвуют в разработке новых методов сравнения сигналов времени и частоты. В их числе методы, основанные на многоканальных измерениях GPS при помощи кода C/A, измерениях фазы несущей GPS, антеннах со стабилизированной температурой и стандартизации программного обеспечения приемников. В качестве дополнительных ресурсов в других разработках используются измерения при помощи кода C/A и P-кода системы ГЛОНАСС. Настоящий документ посвящен главным образом прогрессу, достигнутому благодаря использованию многоканальных наблюдений GPS и специальных защищенных антенн приемников. Кроме того, в работе отмечен ряд сложностей, возникающих при использовании других существующих методов. Описывается нестабильность задержки действующих приемников сигналов времени GPS, а также сравнивается передача сигналов времени при помощи кодов C/A GPS с другими методами спутниковой передачи сигналов времени.

РИСУНОК 12-3

Диапазоны стабильности различных источников частоты



Sat_time_freq-12-03

12.3.1 Одноканальная передача сигналов времени при помощи кода C/A GPS методом одновременного наблюдения

Для синхронизации часов методом CV GPS многие пользователи применяют одночастотные приемники (на основе кода C/A), отслеживающие только один спутник (один канал). В течение последних 15 лет были на порядок улучшены характеристики передачи сигналов времени методом CV при помощи кода C/A GPS. В настоящее время расчетная погрешность действующей одноканальной передачи сигналов времени при помощи кода C/A GPS составляет около 7 нс для одиночного наблюдения по методу CV и порядка 3 нс – для среднего суточного значения, которое соответствует нескольким частям $\times 10^{-14}$ в категориях передачи частот. Однако этого показателя едва ли достаточно для сравнения действующих атомных часов. Поэтому он должен быть как можно скорее улучшен в целях соответствия характеристикам часов, которые разрабатываются в настоящее время. За последние 45 лет эксплуатационные характеристики атомных часов улучшались в среднем на порядок каждые 7 лет. Стабильность TAI и UTC, которые являются международными эталонными шкалами времени, составляет около двух частей $\times 10^{-15}$ за период в несколько недель. Таким образом, разумным представляется прогноз, согласно которому к 2005 году стабильность TAI и UTC достигнет нескольких частей $\times 10^{-16}$.

12.3.2 Процедуры сравнения по одной станции (нулевая базовая линия)

Процедуры сравнения по одной станции – это операции, при которых рассчитываются значения погрешности методом CV между двумя системами GPS, принимающими сигналы времени, расположенными в одной точке и подключенными к одним и тем же часам. Антенны этих систем находятся на расстоянии не более нескольких метров друг от друга. Процедуры сравнения на небольших расстояниях позволяют устранять распространенные ошибки часов, а также ряд других ошибок. Если приемники, которые подвергаются сравнению, используют одинаковое программное обеспечение, то ошибки не должны быть вызваны передачей спутниковых эфемерид, координатами антенн или несовершенным моделированием ионосферы и тропосферы. Любая постоянная погрешность измерения возникает из-за разности задержки в двух единицах оборудования, подвергаемых сравнению, в том числе в самом приемнике, антенне, кабелях и т. д. На сегодняшний день имеется значительный объем данных, описывающих подобные процедуры сравнения [Kirchner

et al., 1993; Buisson *et al.*, 1985]. Все эти данные показывают практически одинаковый характер изменений – краткосрочная (суточная), а иногда долгосрочная (сезонная) зависимость от внешней температуры. Суточные изменения составляют, по всей вероятности, несколько наносекунд, а сезонные – около 10 нс. Следует подчеркнуть, что наблюдаемое явление – это дифференцированное воздействие, так что фактические изменения задержки, вызванные зависимостью от температуры, могут быть более значительными.

12.3.3 Дифференциальная калибровка GPS

В последние годы были внесены значительные усовершенствования в процесс дифференциальной калибровки удаленного оборудования GPS для передачи сигналов времени, основанной на описанном выше методе "одной станции". В этом случае один из двух приемников, подвергающихся сравнению, – это локальный приемник. Другой приемник – портативный, перемещаемый между станциями, на которых необходимо откалибровать оборудование. Если предположить, что значения задержки приемника в составе передвижного оборудования GPS для передачи сигналов времени (в том числе кабелей и антенн) являются постоянными, то для каждой из станций, подвергаемых сравнению, можно рассчитать дифференциальную временную поправку. В идеальных условиях заявленная погрешность такой дифференциальной калибровки составляет порядка 2 нс. Дифференциальная калибровка оборудования GPS для передачи сигналов времени позволяет выполнять точное сравнение удаленных атомных часов. Точность ограничивается погрешностями дифференциальной калибровки и шумом на линии CV (одновременного наблюдения).

В течение последних 15 лет бюро BIPM произвело несколько дифференциальных калибровок [Lewandowski, 1996]. Оборудование GPS для передачи сигналов времени, расположенное в институте NIST и Парижской обсерватории (OP), подвергалось сравнению около десяти раз; дифференциальные временные поправки, полученные в процессе этих калибровок, отличаются не более чем на несколько наносекунд. Это дает представление о воспроизводимости результатов, которая может быть достигнута в том случае, если калибровка производится в идеальных лабораторных условиях, при которых выполняется надлежащее техническое обслуживание оборудования GPS для передачи сигналов времени, включая кабели. Это также дает некоторое представление о долгосрочной стабильности оборудования GPS для передачи сигналов времени. И снова, как и в случае сравнения по методу "одной станции", следует подчеркнуть, что эти процедуры сравнения являются дифференцированными. Сезонные влияния могут взаимно компенсироваться, так как оба приемника расположены в северном полушарии. На сегодняшний день повторные калибровки между станциями, расположенными в северном и южном полушариях, не проводились.

Не для всех станций существует четкая согласованность между повторными калибровками. В ряде случаев были обнаружены расхождения порядка 10 нс. Это можно объяснить различной реакцией приемников, подвергавшихся сравнению, на сезонные изменения температуры или на неопознанные многолучевые явления. В других случаях расхождения были достаточно велики, иногда составляя десятки наносекунд; причиной, возможно, являлись неучтенные преднамеренные изменения, либо непреднамеренные изменения в аппаратной части оборудования GPS для передачи сигналов времени.

12.3.4 "Замыкание цепочки" при передаче сигналов времени вокруг Земли

Как упоминалось ранее, передача сигналов времени при помощи метода CV GPS осуществляется между парами станций. В ряде случаев при наличии определенного количества пар станций существует возможность замыкания цепочки вокруг земного шара в одном направлении. Условие замыкания цепочки предполагает нейтрализацию всех ошибок часов. В идеальном случае при отсутствии шума на линиях передачи сигналов времени ошибки равны нулю. Ранее на эту тему уже был проведен ряд экспериментов. Одно из испытаний проводилось в течение примерно одного года на основе данных, полученных из института NIST, Парижской обсерватории и Научно-исследовательской лаборатории связи (CRL). В эксперименте были использованы точные эфемериды и результаты ионосферных измерений, прошедшие постобработку. Погрешность, которая изменялась с течением времени, составила несколько наносекунд [Lewandowski, 1993]. Поскольку согласно условиям замыкания цепочки вокруг Земли аппаратные задержки также были нейтрализованы,

остаточные источники погрешностей были связаны только с прохождением сигнала GPS через космос либо с многолучевыми явлениями. По всей видимости, причиной наблюдаемых систематических ошибок могла стать ограниченная точность ионосферных измерений. Частично данная погрешность может быть связана с ошибкой определения координат антенн в одной из участвовавших лабораторий. Разброс погрешностей во времени также указывает на результаты ионосферных измерений, которые могут подвергаться воздействию за счет изменения условий при переходе от дня к ночи, так как звездные орбиты GPS "перемещаются" на 4 мин ежедневно в течение года. Тропосферная коррекция может также служить одной из причин наблюдаемого разброса задержек.

Замыкание цепочки при передаче времени вокруг земного шара представляется подходящим испытанием на точность, позволяющим вычислять задержки, связанные с атмосферной рефракцией, поскольку передача сигналов времени методом CV по столь протяженным базовым линиям осуществляется только при сверхмалых углах места.

12.4 GPS в сравнении с другими методами передачи сигналов времени

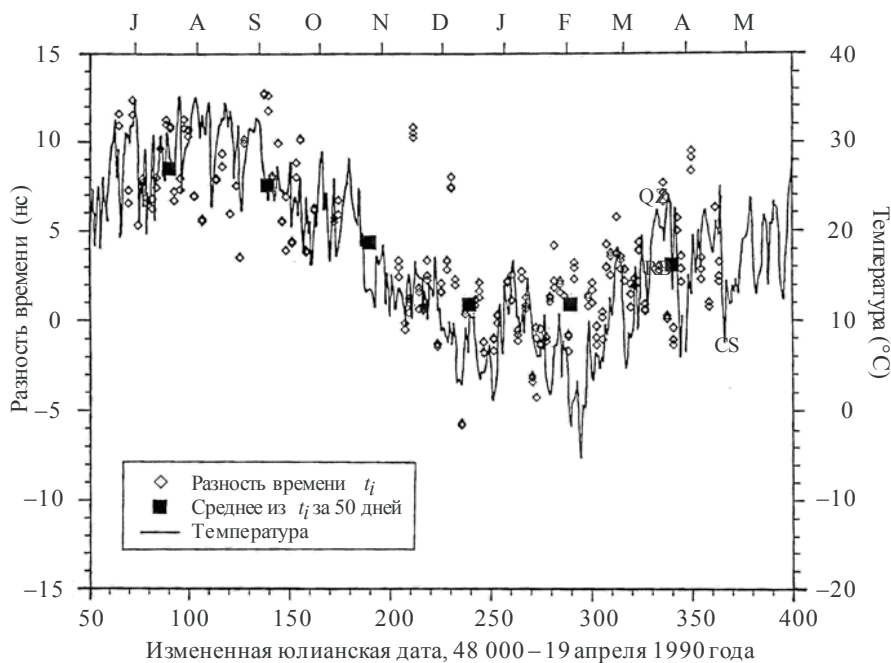
12.4.1 Сравнение с двунаправленной спутниковой передачей и распространением сигналов времени и частоты

Двунаправленная спутниковая передача сигналов времени и частоты (TWSTFT) – это метод, в котором геостационарные спутники связи используются для обеспечения передачи сигналов времени с точностью в несколько сотен пикосекунд. При использовании данного метода каждая из двух станций А и В одновременно отправляют друг другу закодированные сигналы и принимают их. Начало закодированного сигнала станции А синхронизируется с сигналом 1-Гц местных часов А. Закодированный сигнал станции В также синхронизируется с местными часами В. Принимаемый закодированный сигнал используется для остановки счетчика интервалов времени, который запускается местными часами пользователя. Перед вычислением разности в показаниях двух местных часов необходимо сопоставить показания счетчиков интервалов времени станций А и В. Получение данных, достаточных для расчета среднего значения, занимает, как правило, около 2 минут. Это связано с соответствующими шумовыми процессами. Такие двухминутные сеансы проводятся обычно три раза в неделю. В 1991 году на протяжении примерно одного года шкалы времени в обсерватории Observatoire de la Cote d'Azur (OCA) и в Техническом университете Граца (TUG), разделенные расстоянием около 800 км, подвергались сравнению при помощи методов CV I GPS и TWSTT [Kirchner *et al.*, 1993]. Заявленная погрешность линии GPS составляет 3 нс.

Данные, представленные на Рисунке 12-4, отображают разность значений [UTC (TUG) – Clock (OCA)], полученную путем измерений методами TWSTT и CV GPS. Задействованные линии подвергались независимой калибровке в конце проведения эксперимента путем измерения дифференциальных задержек приемников GPS и спутниковых земных станций при перемещении одного приемника GPS и одного спутникового оконечного устройства на другую станцию. Поскольку значения разности между результатами измерений по методам TWSTT и CV GPS демонстрируют очевидное систематическое (сезонное) отклонение, то среднее значение и среднеквадратическое отклонение значений разности (3,6 и 3,9 нс, соответственно) не являются подходящими показателями, при помощи которых можно описать согласованность этих двух методов в течение периода сравнения. Модифицированная дисперсия Аллана для значений разности демонстрирует РМ белого шума вплоть до времени усреднения, равного примерно 50 дням, поэтому расчет средних значений и соответствующих среднеквадратических отклонений оправдывается для интервалов времени вплоть до указанного срока. Если время сравнения равно 50 дням, то среднее значение составляет 3,2 нс, а среднеквадратическое отклонение – 2,6 нс. Максимальная разность между средними значениями составляет 8 нс и соответствует сезонному влиянию, которое снова, вероятно, является результатом температурно-зависимых задержек в используемом приемном оборудовании GPS (Рисунок 12-4).

РИСУНОК 12-4

Разность времени (UTC (TUG) – Часы (OCA)), полученная при помощи измерений TWSTT, разность времени (UTC (TUG) – Часы (OCA)), полученная при помощи измерений методом одновременного наблюдения за GPS, и внешняя температура в TUG



Sat_time_freq-12-04

Метод TWSTT, имеющий предэксплуатационный статус, внедряется в восьми европейских лабораториях по отсчету времени и в двух лабораториях Соединенных Штатов Америки. Результаты эксперимента 1997 года показывают такую же температурную зависимость значений разности между результатами измерений по методам TWSTT и CV GPS, что и результаты 1991 года.

12.4.2 Сравнение с лазерной передачей сигналов времени

Лазерная синхронизация со стационарной орбиты (LASSO) представляет собой метод, который позволяет осуществлять сравнение удаленных атомных часов с погрешностью около 100 пс. Во время эксперимента, проводившегося в период с 8 декабря 1992 года по 28 января 1993 года, двое удаленных атомных часов в обсерватории Макдональда в Техасе и в обсерватории OCA во Франции (разделенные расстоянием 8000 км) подвергались сравнению при помощи методов LASSO и CV GPS [Friedelance, 1994; Baumont *et al.*, 1993]. В связи с плохими погодными условиями было проведено только пять сеансов LASSO. Линия CV GPS рассчитывалась без применения точных эфемерид или ионосферных двухчастотных измерений, поэтому считается, что ее погрешность составляет порядка 10 нс.

Линия GPS была откалибрована при помощи переносного приемника: предполагается, что расчетная погрешность линии LASSO составит менее 100 пс, но эта линия калибровке не подвергалась. Сравнение методов передачи сигналов времени CV GPS и LASSO демонстрирует согласованность в рамках соответствующих погрешностей и отклонение около 192 нс. При измерении значений разности между двумя методами расхождение достигает двойной амплитуды порядка 15 нс. Среднеквадратическая ошибка (r.m.s) значений разности по отношению к среднему значению составляет 6 нс.

В последние годы появились новые перспективные методы передачи сигналов времени при помощи лазеров, например T2L2 (передача сигналов времени по лазерной линии, расчетная погрешность которой составит 30 пс) или LTT (лазерная передача сигналов времени). Эти два эксперимента проводятся на борту спутников "Jason 2" и "Compass" соответственно начиная с 2008 года. Европейский отсчет времени с помощью лазера (ELT) также планируется осуществлять на борту ISS в рамках полетной программы ACES ESA.

Хотя эти системы, по сути, непригодны для повседневной эксплуатации из-за своей чувствительности к погодным условиям, они, безусловно, являются отличными инструментами для оценки точности передачи сигналов времени при помощи систем ГНСС и TWSTT. Кроме того, выполняя сверхточную передачу сигналов времени между современными наземными часами, они могли бы также использоваться для проведения экспериментов в области фундаментальной физики.

12.5 Последние разработки в области передачи сигналов времени посредством GPS

12.5.1 Многоканальная передача сигналов времени по методу одновременного наблюдения GPS

Недавно была возобновлена передача сигналов времени при помощи GPS. Это связано с разработкой и выпуском многоканальных приемников сигналов времени после завершения вывода на орбиту группировки спутников GPS, снижения цен на приемники и запросов, поступающих от организаций по отсчету времени. В предшествующие 15 лет международная передача сигналов времени проводилась с использованием одноканальных приемников GPS, использующих код C/A, и международного графика стандартных 13-минутных записей, полученных методом CV [Allan and Weiss, 1980].

Поскольку приемники старого образца обладают ограниченной памятью, можно запрограммировать не более 48 записей в день; однако на практике реальное количество еще меньше. Выбор наблюдения за единственным спутником в течение периода интеграции, равного 13 мин, обусловлен скоростью передачи навигационного сообщения GPS. Передача полного сообщения может занять вплоть до 12,5 мин (25 переданных страниц). Интеграция в течение 13 мин обеспечивает, что все результаты измерений по методу CV содержат одинаковые данные. На заре развития GPS наблюдались значительные разрывы между последовательными навигационными сообщениями. С тех пор ситуация изменилась, поэтому периоды интеграции, вероятно, могут быть сокращены.

Многоканальные приемники, использующие код C/A, которые рассматриваются в настоящем документе, наблюдают за всеми спутниками GPS, находящимися в поле видимости, и используют стандартные 13-минутные записи каждые 16 мин в стандартные часы. Многоканальные выходные данные хранятся в отдельном файле, имеющем стандартный формат [Allan and Thomas, 1994; Lewandowski, *et al.*, 1996]. Каждый день стандартные часы смещаются на 4 мин, чтобы обеспечить соответствие звездным орбитам GPS.

Стандартные часы привязаны к 1 октября 1997 года – эталонной дате, утвержденной в соответствии с соглашением [Report on GPS and GLONASS standardization, 1997]. Такие же стандартные часы используются в международном графике BIPM одноканального отслеживания по методу CV, который публикуется каждые шесть месяцев. Приборы, использующие процедуру all-in-view (все в зоне видимости), также соблюдают международный график одноканальных наблюдений. Это значительно упрощает их параллельное внедрение в действующую систему одноканальных наблюдений. Представляется вероятным, что одноканальные наблюдения вскоре прекратятся, и отпадет необходимость в периодическом графике BIPM.

Хотя теоретически можно наблюдать до 12 спутников GPS одновременно, лишь около пяти спутников наблюдаются под углом свыше 15° (и следовательно представляют интерес для передачи сигналов времени) на усредненной станции в городских условиях. Поскольку в наличии имеются 89 представляющих интерес 16-минутных периодов в сутки, на каждом канале можно наблюдать 89 записей. Таким образом, используя все доступные результаты наблюдений под углом выше 15° (порядка 5 за 16-минутный период), можно наблюдать 445 записей в день. Все эти записи могут использоваться для региональных линий наблюдения по методу CV. Для сверхдлинных базовых

линий, связывающих континенты, могут быть доступны около 100 записей CV, если используется многоканальный метод.

Увеличение количества наблюдений по методу CV в многоканальном режиме GPS в десять раз по сравнению с одноканальным режимом должно обеспечить дальнейшее улучшение качества передачи сигналов времени и частоты. Для значений времени усреднения, при которых белый фазовый шум является преобладающим, расчетное теоретическое увеличение стабильности ожидается равным $(10)^{1/2} = 3,2$ [Lewandowski *et al.*, 1997].

Однако результаты многоканальных наблюдений могут быть подвержены систематическим отклонениям, вызванным в основном влиянием окружающей среды на антенны. Это должно повлиять на все каналы таким же образом, как это было описано выше для одноканальных приемников, за исключением многолучевых явлений. Прирост, полученный по результатам многоканальных наблюдений, а также систематические воздействия проиллюстрированы при помощи экспериментального сравнения, описанного ниже.

Линия передачи сигналов времени между ВРМ и лабораторией NMi Van-Swinden Laboratorium (VSL) в городе Делфт (Нидерланды) была выбрана для проведения пробного сравнения, поскольку ее базовая линия составляет примерно 400 км [Lewandowski *et al.*, 1997]. Обе лаборатории оборудованы многоканальными приемниками GPS, а координаты их наземных антенн выражены в системе отсчета ITRF с погрешностью в 0,3 м.

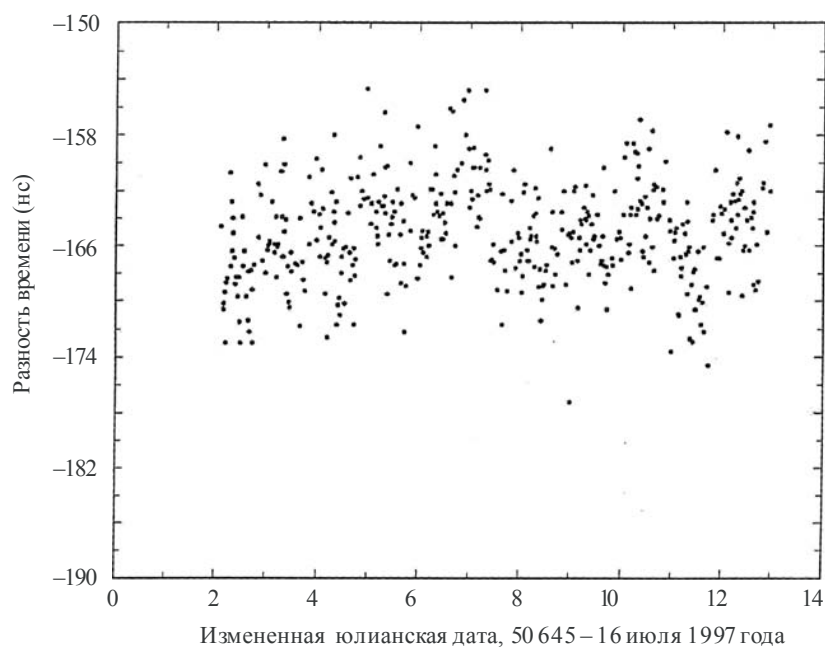
В обеих лабораториях приемники были подключены к часам HP5071A. Оба приемника были откалиброваны с использованием переносного приемника. Одни и те же приемники использовались (для одного и того же периода в 10 дней) при передаче сигналов времени в одноканальном и многоканальном режимах. Получено порядка 38 полезных результатов наблюдений в день для одноканального режима и около 350 – для многоканального режима (Рисунки 12-5 и 12-6). Для обеих линий уровень шума был практически одинаков и составлял около 3 нс.

Теперь рассмотрим преимущества, предоставляемые увеличением количества ежедневных наблюдений методом CV с 38 до 350. Теоретическое увеличение стабильности составляет $(350/38)^{1/2} = 3,0$. Это можно увидеть на кривых стабильности для значений времени усреднения, составляющих менее 10^4 с при передаче сигналов времени на расстояния свыше 400 км, а также при сравнении методом "одной станции" в ВРМ. Кривые стабильности для сравнения методом "одной станции" изображены на Рисунке 12-7. На результаты многоканального сравнения влияет систематическое воздействие, которое проявляется примерно в момент 3×10^4 с (кривая 2).

Это воздействие снижается при задействовании антенн с температурной стабилизацией (кривая 3) (п. 12.5.2). Систематические воздействия незаметны при одноканальном сравнении (кривая 1), так как они безусловно перекрываются более высоким уровнем шума. Таким образом, преимущество, предоставленное многоканальными наблюдениями, строго ограничивается нестабильностью уровней задержки приемников и едва ли позволяет проводить сравнение усредненных устройств HP5071A на максимальном уровне их характеристик для средних периодов времени, равных пяти дням, что составляет стандартный интервал для вычислений ТАИ.

РИСУНОК 12-5

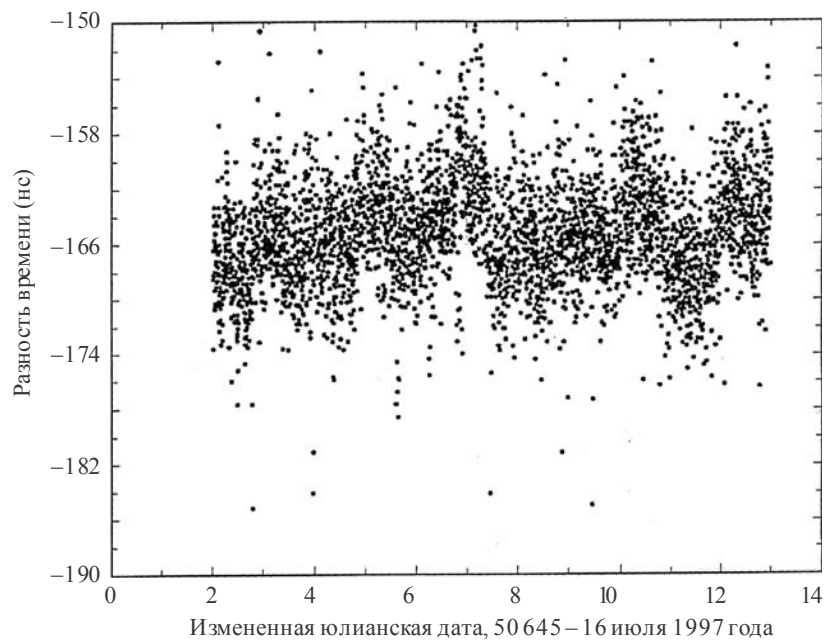
Разность времени (часы ВРМ – часы VSL), полученная одноканальным методом одновременного наблюдения GPS



Sat_time_freq-12-05

РИСУНОК 12-6

Разность времени (часы ВРМ – часы VSL), полученная многоканальным методом одновременного наблюдения GPS



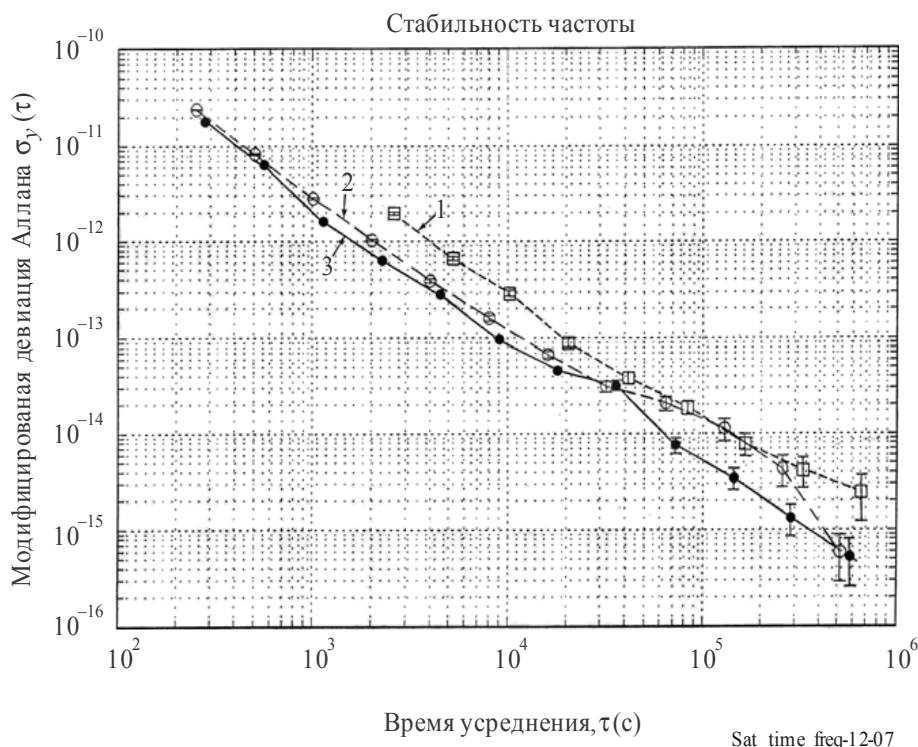
Sat_time_freq-12-06

РИСУНОК 12-7

Сравнение методом "одной станции" двух приемников сигналов времени GPS в ВРМ (две отдельные антенны на одной станции).

Модифицированная девиация Аллана для:

- а) одноканального сравнения без температурной стабилизации антенн;
- б) многоканального сравнения без температурной стабилизации антенн;
- с) многоканального сравнения с температурной стабилизацией антенн



12.5.2 Антенны с температурной стабилизацией

В настоящее время документально подтверждено и общепризнано, что оборудование GPS, принимающее сигналы времени (а конкретнее — его антенны), чувствительно к условиям окружающей среды [Lewandowski and Tourde, 1990]. В стандартных системах приема сигналов времени GPS эта чувствительность может быть выражена коэффициентом, который приблизительно равен $0,2 \text{ нс}/^\circ\text{C}$ и может достигать $2 \text{ нс}/^\circ\text{C}$. Это являлось одним из основных препятствий для достижения точности передачи сигналов времени при помощи GPS, равной 1 нс , о которой было заявлено ранее. Сравнение метода CV GPS с двунаправленной спутниковой передачей сигналов времени в течение примерно одного года выявило сезонное воздействие с двойной амплитудой 8 нс (см. Рисунок 12-4), которое объясняется нестабильностью оборудования GPS для передачи сигналов времени. Решение данной проблемы сразу найти не удалось, и даже в настоящее время практически все оборудование GPS для передачи сигналов времени, используемое в метрологических лабораториях по отсчету времени, подвержено данному воздействию. Более важным является тот факт, что преимущество, полученное в результате недавнего внедрения метода многоканальных наблюдений "все в зоне наблюдения", строго ограничиваются нестабильностью значений задержки приемника.

Поскольку для решения данной проблемы при помощи электронных средств не удалось найти приемлемого практического способа, был предложен принципиально другой подход [Lewandowski *et al.*, 1997] – антенну должен защитить термостат со стабилизированной температурой. Основной целью процесса стабилизации температуры антенны является поддержание постоянной температуры критически важных компонентов.

Первые образцы термостатов были созданы в ВІРМ. Затем очень скоро был налажен серийный выпуск коммерческой версии прибора, получившего название "антенна с температурной стабилизацией" (TSA). Предварительное сравнение методом "одной станции" двух многоканальных приемников GPS, оборудованных антеннами TSA, проведенное в ВІРМ, продемонстрировало устранение систематической ошибки и относительную стабильность частоты в пределах нескольких единиц $\times 10^{-15}$ для значения времени усреднения, составляющих примерно одни сутки (см. Рисунок 12-7). Благодаря данному усовершенствованию появилась возможность полноценного использования преимуществ многоканальной передачи сигналов времени и достижения ожидаемого уровня эксплуатационных характеристик при использовании фазы несущей GPS.

12.5.3 Использование фазы несущей GPS

Международная служба GPS (IGS), созданная для содействия применениям GPS в геодезии, сыграла важную роль в последних достижениях в области передачи сигналов времени при помощи GPS. Существующие приемники, работающие в системах передачи сигналов времени, как правило, отбрасывают фазу несущей и данные псевдодальности после выполнения алгоритма передачи сигналов времени. Если сохранить эти данные, то постобработка при помощи более сложных алгоритмов может обеспечить более точную передачу сигналов времени и частоты. Эти данные уже используются в геодезии для дифференциального определения местоположения. Фиксация фазы несущей позволяет уменьшить многолучевые явления. При помощи существующих сегодня многоканальных приемников и CV-методов двойного вычисления разностей, обычно применяемых в геодезии, две станции могут поддерживать фазу общей несущей. Если результаты измерения ионосферных задержек используются в сочетании с номинально компенсированными тропосферными поправками, то при значениях времени интеграции, составляющих примерно одни сутки, может быть достигнута стабильность частоты, равная одной единице $\times 10^{-15}$ [Schildknecht *et al.*, 1990; Overney *et al.*, 1998]. Данный показатель близок к тому, который требуется для сравнения действующих первичных стандартов частоты. Для того чтобы достичь подобного показателя, необходимы непрерывные измерения, т. е. измерений, проводимых раз в день, недостаточно.

Уже ряд проведенных исследований показал преимущества использования результатов измерения фазы несущей для процедур сравнения частоты [Overney *et al.*, 1998; Petit *et al.*, 1996]. Формат обмена данными, не зависящий от приемника (RINEX) [Gurtner, 1994], удобен для записи фазы несущей и данных псевдодальности GPS и ГЛОНАСС. Если приемник сигналов времени обладает соответствующими возможностями, то файл, содержащий данные о фазе несущей и данные псевдодальности в формате RINEX, предлагается формировать с 15-секундными интервалами для всех спутников, находящихся в зоне видимости. Затем этот файл может использоваться для постобработки данных точного времени и частоты.

Метрологи, занимающиеся отсчетом времени, и геодезисты, которые достигли более высокого уровня понимания в использовании сигналов фазы несущей GPS, недавно объединили усилия и разработали важную инициативу под названием "Пилотный проект IGS/ ВІРМ" (IGS/ВІРМ Pilot Project). В этом проекте изучаются процедуры сравнения сигналов точного времени и частоты при помощи фазовых и кодовых измерений GPS. Важным вопросом является разрешение фазовых неопределенностей для прикладных задач по отсчету времени. Эта проблема ограничивает точность метода.

Необходимо отметить, что фаза несущей зависит также от нестабильности задержки из-за влияния оборудования. Здесь для того чтобы в полной мере воспользоваться преимуществами этой перспективной технологии, необходимо стабилизировать и измерить задержки в различных компонентах приемного оборудования.

12.6 Применение системы GLONASS

По большинству применяемых методов система ГЛОНАСС [Gouzhva *et al.*, 1992] схожа с GPS, но до недавнего времени международные метрологические организации, занимающиеся отсчетом времени, пользовались данной системой редко. Причина этого заключалась в отсутствии на рынке серийных приемников. В настоящее время ситуация меняется, и созданы первые международные постоянно действующие линии передачи сигналов времени. Сегодня приемники сигналов времени системы ГЛОНАСС вполне доступны и соответствуют тем же стандартам, что и приемники сигналов времени GPS. Было проведено несколько исследований для сравнения показателей одноканальных измерений с использованием кода C/A системами GPS и ГЛОНАСС [Lewandowski *et al.*, 1993]. Все эксперименты показали, что для региональных линий эти две системы имеют схожие показатели. Антенны приемников ГЛОНАСС также обнаруживают зависимость от температуры, как и антенны GPS. Для межконтинентальных линий необходимо использовать точные эфемериды ГЛОНАСС, прошедшие постобработку.

Ряд недавних исследований свидетельствуют о возможности реализации многоканальной передачи сигналов времени с использованием кода C/A системами GPS + ГЛОНАСС [Lewandowski *et al.*, 1997]. Двухсистемные многоканальные и многокодовые приемники работают бесперебойно и не имеют проблем с программным обеспечением. В них используются стандартные программное обеспечение и формат [Lewandowski *et al.*, 1996]. Испытание их метрологических показателей было проведено путем сравнения с другими приемниками сигналов времени GPS. Совместное использование систем GPS и ГЛОНАСС в многоканальном режиме практически удваивает количество результатов наблюдений (группировка спутников ГЛОНАСС еще неполная). Прирост стабильности многоканальной передачи сигналов времени системами GPS + ГЛОНАСС по сравнению с одноканальными измерениями GPS равен примерно четырем единицам. Многоканальный приемник GPS в отдельности обеспечивает прирост стабильности, примерно равный трем единицам.

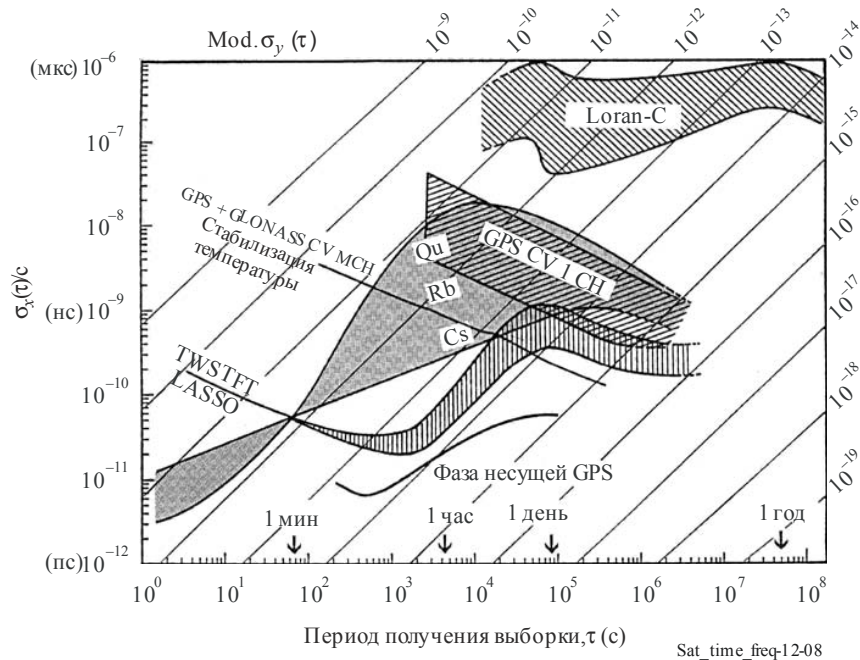
Очевидное преимущество представляет использование P-кода ГЛОНАСС. Оно заключается в более низком уровне шума измерения основного кода, известного как измерение псевдодалности. Точность измерения псевдодалности составляет порядка 1/100 длины волны рассматриваемого кода. Это означает, что точность измерения псевдодалности, выполняемого на основе P-кода ГЛОНАСС, составляет 1 нс (длина волны P-кода ГЛОНАСС равна 30 дюймам или около 100 нс), в то время как код C/A ГЛОНАСС обеспечивает точность измерения псевдодалности всего лишь 10 нс (длина волны кода C/A ГЛОНАСС равна 300 дюймам или примерно 1000 нс). Недавно был проведен ряд испытаний с использованием новейших серийных приемников сигналов времени ГЛОНАСС, использующих P-код. Несмотря на трудности, связанные с отличием частот в системе ГЛОНАСС, что привело к различным задержкам из-за аппаратных средств, первые результаты были весьма перспективными [Azoubib *et al.*, 1998].

12.7 Заключение

Система GPS стала "рабочей лошадкой" для хронометрических организаций. Она представляет собой источник сигналов времени и может быть использована для сравнения часов. В настоящее время система GPS близка к тому, чтобы стать системой по передаче сигналов времени с точностью, составляющей несколько наносекунд в сутки. На Рисунке 12-8 приведено сравнение передовых методов GPS со стандартным методом CV GPS, используемым в настоящее время, а также с некоторыми другими методами. Тем не менее имеют место разработки, в результате которых этот показатель точности должен быть существенно улучшен.

РИСУНОК 12-8

Сравнение ряда новейших методов передачи сигналов времени с классическим одноканальным методом передачи сигналов времени GPS в режиме одновременного наблюдения (данные часов и данные Loran-C, TWSTFT, а также фазы несущей GPS любезно предоставлены Д. В. Алланом)



Передача сигналов времени с использованием кода C/A GPS согласно действующей практике ограничена главным образом нестабильностью оборудования, а на дальних расстояниях — погрешностью определения ионосферных задержек. Погрешность одноканальных процедур сравнения составляет 3–4 нс для значений времени усреднения, равных одним суткам, а в ряде случаев и больше. Этого едва ли достаточно для сравнения средних серийных часов HP5071A. Очевидно, что данный метод является недостаточным для сравнения высококачественных лабораторных эталонов частоты. Метод с использованием фазы несущей GPS предлагает наибольшие возможности для сравнения частоты, так как он обладает большей точностью. После введения в эксплуатацию этот метод будет использоваться для сравнения высококачественных лабораторных стандартов частоты и может служить для оценки других методов передачи сигналов времени и частоты. Стабильность, достижимая при использовании этого метода, должна составить примерно 100 пс/сутки и выше. В том случае если будет разрешена проблема с неопределенностями фазы несущей GP, этот метод может использоваться не только для передачи сигналов частоты, но также для передачи сигналов времени.

Кроме того, сама система GPS также развивается. Программа "Модернизация GPS" будет использовать второй и третий гражданские кодированные сигналы. Это приведет к значительному прогрессу, поскольку увеличение количества гражданских частот позволит осуществлять более точные измерения ионосферы и сделает возможным более эффективное решение проблемы неопределенностей фазы несущей GPS. Кроме того, будущая группировка GPS может содержать большее количество спутников, а спутниковый сигнал может иметь большую мощность. В соответствии с президентской директивой от марта 1996 года значение SA было задано равным нулю. Это привело к значительному улучшению характеристик прямого распространения сигналов времени при помощи GPS.

Одним из наиболее важных шагов для повышения точности приемника является разработка встроенной системы калибровки для приемников сигналов времени. Это наилучшее решение для устранения существующих трудностей, связанных с нестабильностями задержки из-за оборудования

для передачи сигналов времени посредством GPS. До тех пор пока системы встроенной калибровки не станут общедоступными, электронные устройства антенн и любая аппаратура, устанавливаемая вне помещений, подключенные усилители, а также, вероятно, антенные кабели должны иметь стабильную температуру. Использование корпусов со стабильной температурой должно привести к улучшению не только характеристик передачи и распространения сигналов времени методом CV с использованием кода C/A, но также процедур сравнения частоты, выполняемых путем измерения фазы несущей.

Комбинирование измерений кода GPS и ГЛОНАСС в рамках приемников сигналов времени определенно представляет дополнительную ценность для международного сравнения сигналов времени. Что касается ГЛОНАСС, возможность доступа к точному коду на двух частотах предоставляет средство для измерения ионосферных задержек. Кроме того, сигналы ГЛОНАСС передаются в широкополосном режиме на 48 частотах (в будущем на 24 частотах) в отличие от системы GPS, сигналы которой передаются в вещательном режиме на двух частотах. Это обеспечивает надежность радиовещательной системы и более высокую помехоустойчивость. Однако система ГЛОНАСС нуждается в повышении надежности и обеспечении непрерывности функционирования.

Каковы дальнейшие перспективы? За последние 45 лет эксплуатационные характеристики атомных стандартов частоты улучшались на порядок в среднем каждые семь лет. Необходимость их сравнения в будущем на дальних расстояниях потребует соответствующего развития технологий передачи сигналов времени и частоты. Согласно информации, изложенной в настоящем документе, эта задача будет решена за счет передовых методов передачи сигналов времени с использованием GPS.

Ссылки

- ALLAN D.W. [November, 1987] Time and frequency (time-domain) characterization, estimation and prediction of precision clocks and oscillators. *IEEE Trans. Ultrasonics., Ferroelectrics., Fre. Contr.*, UFFC-34, p. 647-654.
- ALLAN D.W. and LEPEK, A. [1993] Trends in international timing. *Proc. 7th European Frequency and Time Forum*, p. 221-227.
- ALLAN D.W. and THOMAS, C. [1994] Technical directives for standardization of GPS time receiver software. *Metrologia*, Vol. 31, 1, p. 69-79.
- ALLAN D.W. and WEISS M.M. [1980] Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite. *Proc. 1980 Frequency Control Symp.*, p. 334-336.
- AZOUBIB J., LEWANDOWSKI W. and DE JONG G. [1998] A new approach to international time transfer: multi-channel multi-code GPS+GLONASS common-view observations. *Proc. 12th European Frequency and Time Forum*, 1998, p. 87-93.
- BAERISWYL P., SCHILDKNECHT T., UTZINGER J. and BEUTLER G. [1995] Frequency and time transfer with geodetic GPS receivers: First results. *Proc. 9th European Frequency and Time Forum*, p. 46-51.
- BAUMONT F., FRIEDELANCE P., GRUDLER P., VEILLET C., WIANT L., LEWANDOWSKI W. and PETIT G. [1993] Preliminary report on the comparison of LASSO and GPS time transfers. *Proc. 7th European Frequency and Time Forum*, p. 641-643.
- BIPM [1997] Report of the open forum on GPS and GLONASS standardization. Presented at 6th CGGTTS Meeting, 1997 (available, on request from).
- BUISSON J.A., OAKS O.J. and LISTER M.J. [1985] Remote calibration and time synchronization (R-CATS) between major European time observatories and the US Naval Observatory using GPS. *Proc. 17th Annual. P7TI Meeting*, p. 201-222.
- BUTTERLINE E. [January, 1993] Reach out and time someone. *GPS World*, p. 32-40.
- FRIEDELANCE P. [1994] L'expérience LASSO. Ph. D. dissertation, Université de Paris 6, Paris, France.

- GOUZHVA J. *et al.* [July/August, 1992] High-precision time and frequency dissemination with GLONASS. *GPS World*, p. 40-49.
- GURTNER W. [1994] RINEX: The receiver independent exchange format version 2. Astronomical Institute, University of Berne, Berne, Switzerland.
- KIRCHNER D., RESSLER H., GRUDLER P., BAUMONT F., VEILLET C., LEWANDOWSKI W., HANSON W., KLEPCZYNSKI W. and UHRICH P. [September, 1993] Comparison of GPS common-view and two-way satellite time transfer over a baseline of 800 km. *Metrologia*, Vol. 30, 3, p. 183-192.
- KLEPCZYNSKI W. J. [1996] GPS for precise time and time interval measurement. *Global Positioning System: Theory and Applications*, Vol.11. B. W. Parkinson and J. J. Spilker, Jr., Eds. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, chapter 17, p. 483-500.
- LEWANDOWSKI W. [1996] Determination of the differential time correction between GPS time equipment located at the Observatoire de Paris, Paris, France, and the United States Naval Observatory, Washington, DC, USA. BIPM, Rep. BIPM-96/10.
- LEWANDOWSKI W., AZOUBIB J., DE JONG G., NAWROCKI J. and DANAHER J. [...] A new approach to international time and frequency comparisons: "All-in-view" multi-channel GPS+GLONASS observations. *Proc. ION GPS97*, p. 1085-1091.
- LEWANDOWSKI W., AZOUBIB J., GEVORKYAN A.G., BOGDANOV P.P., KLEPCZYNSKI W.J., MIRANIAN M., DANAHER J., KOSHELYAEVSKY N. B. and ALLAN D.W. [1996] A contribution to the standardization of GPS and GLONASS time transfers. *Proc. 27th P7TI Meeting*, p. 367-383.
- LEWANDOWSKI W., MOUSSAY P., CHERENKOV G T., KOSHELYAEVSKY N.B. and PUSHKIN S.B. [1993] GLONASS common- view time transfer. *Proc. 7th European Frequency and Time Forum*, p. 147-151.
- LEWANDOWSKI W., MOUSSAY P., DANAHER J., GERLACH R. and LEVASSEUR, E. [1997] Temperature-protected antennas for satellite time transfer receivers. *Proc. 11th European Frequency and Time Forum*, p. 498-503.
- LEWANDOWSKI W., PETIT G. and THOMAS C. [April 1993] Precision and accuracy of GPS time transfer. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 42, p. 474-478.
- LEWANDOWSKI W. and THOMAS C. [July 1991] GPS time transfer. *Proc. IEEE*, Vol. 79, 7, p. 991-1000.
- LEWANDOWSKI W. and TOURDE R. [1990] Sensitivity to the external temperature of some GPS timing receivers. *Proc. 22nd P7TI Meeting*, p. 307-316.
- OVERNEY F. PROST L., DUDLE D., SCHILDKNECHT T., BEUTLER G., DAVIS J A., FURLONG J.M. and HETZEL P. [1998] GPS time transfer using geodetic receivers (GeTT): Results on European baselines. *Proc. 12th European Frequency and Time Forum*.
- PETIT G., MOUSSAY P. and THOMAS C. [1996] GPS time transfer using carrier-phase and P-code measurements. *Proc. 10th European Frequency and Time Forum*, p. 279-285.
- SCHILDKNECHT T., BEUTLER G., GURTNER W. and ROTHACHER M.M. [1990] Toward sub-nanosecond GPS time transfer with geodetic GPS receivers: First results. *Proc. 4th European Frequency and Time Forum*, p. 335-346.

ГЛАВА 13

**ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
ФАЗОВЫХ И КОДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ GPS**

	<i>Стр.</i>
13.1 Введение.....	176
13.2 Соображения, связанные с приборами и аппаратным обеспечением	177
13.2.1 Компоненты спутников GPS.....	177
13.2.2 Установка антенн слежения GPS.....	179
13.2.3 Антенные кабели и соединения	181
13.2.4 Приемники GPS.....	181
13.2.5 Оценка влияния многолучевого распространения и тестирование системы	182
13.2.6 Калибровка задержек на станциях слежения	183
13.3 Стратегии анализа данных	184
13.3.1 Уравнение результатов наблюдения GPS.....	184
13.3.2 Методы для глобальных решений	186
13.3.3 Системы отсчета и модели для поправочных членов.....	187
13.3.4 Метод точного определения местоположения	188
13.3.5 Влияние ошибок на показания часов	189
13.4 Продукты IGS, связанные с показаниями часов, и временные шкалы	190
13.4.1 Имеющиеся в наличии наборы продуктов	190
13.4.2 Шкалы времени IGS.....	192
13.5 Оценка характеристик путем анализа разрывов на границах суток	195
13.6 Результаты сравнения с независимыми системами двусторонней передачи сигналов времени	200
13.7 Оценка параметров передачи сигналов времени	201
13.8 Будущие тенденции	203
Ссылки	203

13.1 Введение

На протяжении более чем двух десятилетий методы с использованием системы GPS являются основой для большинства передач сигналов времени и частоты, обладающих высокой точностью. Стандартный метод поддержки всемирного координированного времени (UTC) базируется главным образом на анализе одночастотных данных измерения псевдодальности (код C/A) и упрощенных данных, полученных методом одновременного наблюдения (CV). Такой анализ подразумевает взаимную компенсацию большинства систематических ошибок [Allan and Weiss, 1980]. Используя более точные данные, полученные благодаря широкомасштабной замене ранее выпускаемых одноканальных приемников многоканальными устройствами, в результате проведения межконтинентальных процедур сравнения методом CV удалось добиться погрешностей в несколько наносекунд, усредненных по пятидневным интервалам [Lewandowski *et al.*, 1997]. Вместе с тем параллельное развитие высокоточных геодезических методов, использующих результаты двухчастотных наблюдений на основе фазы несущей GPS, продемонстрировало повторяемость результатов определения местоположения с сантиметровой точностью для однодневных интеграций [Zumberge *et al.*, 1997]. Если предположить, что подобные результаты определения местоположения могут также рассматриваться как эквивалентные значения времени прохождения света (~33 пс), то становится очевидным, что потенциальные возможности геодезических методов на основе фазы несущей GPS позволяют проводить процедуры сравнения времени с точностью не менее долей наносекунды в глобальном масштабе. Этот факт получил широкое признание к 1990-м годам. На самом деле точность данного метода достигает ~100 пс в каждой эпохе при благоприятных условиях для односуточных дуг анализа [Ray and Senior, 2003]. Однако в связи с инструментальными погрешностями калибровки способность передачи сигналов абсолютного времени ограничена величиной > 1 нс [Petit *et al.*, 2001]. Обладая высокой точностью (эквивалентной стабильности частоты), геодезический метод может использоваться для глобального распространения сигналов времени и частоты. Это соответствует основному функциональному назначению GPS (несмотря на замену широкоэмиттерного сообщения GPS более точной информацией) в отличие от метода CV, работающего по принципу связи пункта с пунктом, характеристики которого ко всему прочему ухудшаются при увеличении базовых расстояний.

Важными составляющими геодезического метода является доступность двухчастотных наблюдений GPS для измерений как псевдодальности (как правило, "бескодового" P-кода), так и фазы несущей, которая обычно записывается каждые 30 секунд, в совокупности с комплексным аналитическим моделированием недифференцированного одностороннего распространения сигнала с миллиметровой точностью. Стандартные ошибки фазовых и кодовых измерений составляют около 1 см и 1 м соответственно на каждой частоте. Считается, что для обеих измеряемых величин погрешности вследствие многолучевого распространения преобладают над тепловым шумом [Langley *et al.*, 1996]. Благодаря высокой точности фазовые данные являются крайне важными для современных геодезических применений; таким образом, для надежного обеспечения непрерывности фазы во время прохождения спутника требуется непрерывная выборка. В системах относительного определения местоположения для устранения воздействий на часы спутников и приемников слежения в большинстве случаев применяются алгоритмы двойной разности, а кодовые данные обычно не используются из-за своего крайне малого весового коэффициента. Однако для выполнения анализа недифференцированных данных и получения оценочных показаний часов необходимо вводить кодовые данные. Это позволяет разделять параметры, которые в противном случае неразличимы, а именно сдвиг показаний часов и неопределенность фазового цикла. Совмещенные подобным образом данные наблюдений позволяют эффективно сглаживать кодовые данные, содержащие шум, и использовать гораздо более точные фазы. Для каждой пары приемник-спутник можно добиться наивысшего качества оценочных показаний часов, обеспечив максимально возможную длину диапазонов данных непрерывной фазы без срывов слежения, сводя таким образом к минимуму количество неопределенных параметров. Современные геодезические приемники способны отслеживать 12 и более спутников одновременно. Время прохождения каждого из этих спутников достигает 4 часов. Если не считать препятствий, ограничивающих видимость, наибольшие проблемы с отслеживанием возникают при самых малых углах места. В этом случае мощность сигнала минимальна, и в наибольшей степени проявляются разнообразные атмосферные задержки на трассе и эффекты многолучевого распространения.

В данной главе рассматриваются геодезический метод передачи сигналов времени при помощи GPS и состояние дел, касающихся последних разработок в этой области. В принципе аналогичные методы могут использоваться совместно с другими глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС). Поскольку действующая группировка спутников ГЛОНАСС пока не нашла широкого применения для решения подобных задач в общем, имеются ожидания, что использование европейской системы GALILEO позволит существенно расширить возможности существующих методов в этой области.

13.2 Соображения, связанные с приборами и аппаратным обеспечением

Любой из компонентов, находящихся на трассе распространения сигнала GPS (иногда и вблизи нее), вероятно, может влиять на характеристики передачи сигналов времени и частоты. Что касается передачи сигналов времени, то соображения, связанные с оборудованием, работающим в геодезических системах, по своей сути подчиняются общим правилам, основанным на здравом смысле, которые могут быть применимы к любым другим системам измерения времени. Общая конфигурация приемного оборудования должна быть по возможности простой, при этом необходимо обращать самое пристальное внимание на стабильность компонентов системы и условия, в которых они функционируют. Перед запуском в эксплуатацию новые компоненты должны проходить основательную проверку в той степени, в какой это целесообразно. Если требуются изменения в конфигурации, то за один раз рекомендуется менять не более одного компонента, что позволит более адекватно оценить последствия изменений.

13.2.1 Компоненты спутников GPS

Основная необходимая информация по использованию GPS приведена в интерфейсном контрольном документе ICD-GPS-200 или в более свежей спецификации интерфейса IS-GPS-200. Данные о позициях спутников передаются в широкополосном режиме для эффективных фазовых центров антенных решеток передатчиков. В то же время система GPS производит внутренние расчеты динамических орбит для точки центра масс каждого спутника и преобразует результаты в фазовые центры. Используемые в этом случае значения смещения вектора официально не предоставляются, поскольку они не являются необходимыми для пользователей ICD.

Тем не менее значения смещений публикуются на сайте Национального агентства геопространственной разведки (NGA) (earth-info.nga.mil/GandG/sathtml/).

Пользователи, которые рассчитывают свои собственные спутниковые эфемериды и показания часов, должны также задавать значения из некоторого набора смещений фазового центра антенны. При сравнении показаний спутниковых часов, полученных из различных источников, необходимо учитывать любые имеющиеся расхождения в радиальных составляющих предполагаемых смещений фазовых центров, поскольку они будут проявляться в виде погрешностей спутниковых часов. Ситуация осложняется тем, что точное измерение фактических значений смещения антенны затруднительно [Mader and Czopek, 2002], в результате чего используются различные наборы значений.

В отличие от широкополосного сообщения GPS точные орбиты Международной службы GPS (IGS) привязаны к центрам масс спутников. Когда в 1997 году был запущен первый спутник серии Block IIR, стало очевидным, что его смещение по направлению к Земле отличается от космических аппаратов, запущенных ранее. Для обеспечения возможности согласованного сравнения и совмещения показаний спутниковых часов, полученных из различных аналитических центров IGS, служба IGS приняла общий набор значений векторов смещения фазовых центров антенн, введенных в эксплуатацию с 29 ноября 1998 года:

Blocks II & IIA	$dx = 0,279$ м	$dy = 0,000$ м	$dz = 1,023$ м	[IGS];
Block IIR	$dx = 0,000$ м	$dy = 0,000$ м	$dz = 0,000$ м	[IGS].

Обычная связанная со спутником система координат может применяться в том случае, если ось z направлена из центра массы спутника в центр Земли, ось y находится в плоскости солнечных батарей, а ось x ортогональная. Мадер и Чопек [Mader and Czopek, 2002] определили, что смещение dz для

неиспользуемой на Земле антенной решетки серии Block II равно 1,66 м. Значения смещения, используемые в системе эксплуатации GPS, аналогичны значениям, используемым IGS для серий Block II и Block IIА:

$$\text{Blocks II \& IIА} \quad dx = 0,2794 \text{ м} \quad dy = 0,0000 \text{ м} \quad dz = 0,9519 \text{ м} \quad [\text{GPS}],$$

однако для каждого аппарата серии Block IIR эти значения существенно отличаются, в основном составляя около 1,5–1,6 м (значение dz). Если пользователь пожелает сравнить показания спутниковых часов IGS с другими результатами измерений, используя различные значения смещения антенны, то нужно внести поправки согласно формуле

$$C_i(\text{user}) = C_i(\text{IGS}) - \{ [dz_i(\text{user}) - dz_i(\text{IGS})] / c \}, \quad (13-1)$$

где:

$dz_i(\text{IGS})$ – значение dz, данное IGS для PRNi спутника;

$dz_i(\text{user})$ – значение dz, данное пользователем для PRNi спутника;

$C_i(\text{IGS})$ – показания часов IGS для PRNi;

$C_i(\text{user})$ – показания пользовательских часов для PRNi;

c – скорость света (299 792 458 м/с).

Широковещательная передача сигналов GPS в настоящее время ведется в двух диапазонах L_1 , номинальные центральные частоты которых равны:

$$L_1 = 154 \cdot 10,23 = 1575,42 \text{ МГц}, \quad \text{а } L_2 = 120 \cdot 10,23 = 1227,60 \text{ МГц}.$$

Диапазон L_1 содержит модуляцию кодом C/A 1,023 МГц, а также зашифрованный код P1(Y) (10,23 МГц) и код сообщения 50 бит/с.

В диапазоне L_2 на данный момент модулируется только точный код P2(Y) 10,23 МГц, но в ближайшее время к нему планируется добавить второй гражданский код.

Различные модуляции GPS номинально синфазны, однако неизбежно обладают существенными, не равными нулю погрешностями относительно друг друга. Наиболее значительной из них является погрешность измерения псевдодальности между модуляциями P1 и P2. Размах отклонения погрешностей P1–P2 составляет более 10 нс. Поскольку передаваемые в широковещательном режиме показания часов определяются для линейной комбинации P1/P2 без учета ионосферных воздействий (более подробно см. ниже), пользователи, имеющие одночастотное оборудование, должны компенсировать погрешности P1–P2 путем использования значений T_{GD} , указанных в навигационном сообщении (см. ICD-GPS-200). Формируя свои карты ионосферы, служба IGS передает также собственные, полученные по результатам наблюдений значения погрешностей P1–P2, известных под названием дифференциальные кодовые погрешности (DCB). Для справки: номинальная величина отношения между передаваемыми в вещательном режиме значениями T_{GD} и погрешностями DCB IGS определяется выражением

$$\text{DCB} = [1 - (77/60)^2] * T_{GD} \quad (+ \text{ смещение шкалы}) \quad (13-2)$$

для каждого спутника в отдельности, если не считать, что две шкалы отличаются на величину переменного во времени смещения, поскольку среднее значение для погрешностей DCB по согласованию с IGS задается равным нулю, при этом передаваемые в вещательном режиме значения T_{GD} привязаны к абсолютной эмпирической инструментальной погрешности. Разница в шкалах, выраженная в единицах T_{GD} , постепенно сокращается начиная приблизительно с –4,3 нс в начале 2000 года до –7,1 нс в середине 2004 года. Передаваемые в вещательном режиме значения T_{GD} пересматриваются и обновляются ежеквартально, тогда как служба IGS осуществляет контроль и передает значения DCB непрерывно, с ежедневными интервалами.

Процедура коррекции T_{GD} предполагает, что погрешность P1–P2 подходит для пользователей одночастотного оборудования, применяющих код C/A, так же как для P1. На самом деле это не совсем верно из-за погрешностей P1–C/A. Размах амплитуды этих величин составляет примерно 5 нс. Служба IGS принимает в расчет подобные погрешности с 1999 года, однако в ICD-GPS-200 они

в настоящее время не упоминаются. Учет этих погрешностей необходим, так как некоторые геодезические приемники вместо кода P1 отслеживают код C/A, а другие передают $[C/A + (P2-P1)]$ вместо истинного кода P2, а все эти коды имеют различные погрешности [Ray *et al.*, 2000]. Во избежание смешивания данных с различными спутниковыми погрешностями, которые снижают точность показаний спутниковых часов IGS (а также точность данных определения местоположения, получаемых с их помощью), службой IGS были введены в действие процедуры обработки и анализа различных наборов данных GPS, позволяющие поддерживать согласованность. По мере добавления в будущем новых модуляций сигналов GPS предполагается, что калибровочные значения для дополнительных межсигнальных погрешностей будут включаться в передаваемое в вещательном режиме навигационное сообщение и будут контролироваться службой IGS.

Еще одна сложность, связанная с передачей спутниковых сигналов, – это фазовая форма луча. Эта форма обычно считается идеально полусферической, однако существуют убедительные доказательства, что это не так [Schmid and Rothacher, 2003]. Пренебрежение неидеальностью фазовых форм для спутников или антенн слежения (подробнее см. ниже) приводит чаще всего к ошибкам в шкале координат GPS (т. е. в радиальном направлении) на уровне примерно 10–15 частей на миллиард (ppb). Этот эффект имеет большое значение для многих прикладных задач геодезии, однако в большинстве случаев для сравнения времени он, вероятно, не столь важен, по крайней мере до тех пор, пока точность инструментальной калибровки не достигнет уровня, не превышающего долей наносекунды.

Последнее, о чем следует упомянуть в отношении спутниковых часов GPS, – это тот факт, что преднамеренное снижение точности сигналов часов GPS путем избирательной доступности (SA) было прекращено 2 мая 2000 года в 04:00 UTC. До этого момента суточные среднеквадратические отклонения показаний часов были на уровне приблизительно 80 нс. С того времени стабильность показаний часов, которая является неотъемлемой характеристикой любой спутниковой системы отсчета времени, повысилась на порядок. Кроме того, что был открыт доступ гражданских пользователей к значительно улучшенным результатам определения местоположения и отсчета времени при помощи GPS, все пользователи, особенно те, кто использует преимущества более точных продуктов IGS, могут сегодня производить интерполяцию табличных значений показаний часов GPS с гораздо меньшими ошибками, нежели ранее.

13.2.2 Установка антенн слежения GPS

Геодезическая система, как правило, устанавливается на сверхпрочном монолите, что позволяет обеспечить физическую основу для долгосрочных измерений с высокой точностью. Заглубленные бетонные опоры, поперечные растяжки из металлической арматуры и стальные мачты – элементы наиболее распространенных конструкций оснований для прикладных задач по отсчету времени, хотя используются также здания.

Информация по различным типам оснований доступна по адресу igscb.jpl.nasa.gov/network/monumentation.html.

В основание надежно вмонтирован постоянный геодезический маркер с нанесенной на него отметкой, к которой привязываются координаты станции. Оптимальным решением является создание высокоточной локальной геодезической контрольной сети, целью которой является отслеживание относительных перемещений главной станции GPS.

Для того чтобы отличить незначительные перемещения основания от более крупномасштабных воздействий, контрольная сеть должна включать постоянные маркеры, охватывающие расстояния от ~10–100 м до примерно 10 км. Локальная сеть должна регулярно проходить техническую проверку, чтобы быть пригодной к эксплуатации, и может быть частично сформирована на базе других постоянно действующих станций GPS. Антенна GPS должна быть надежно закреплена непосредственно над геодезическим маркером таким образом, чтобы ее положение оставалось неизменным, а эксцентриситет опорной точки антенны (ARP) относительно опорной точки маркера может быть измерен с точностью < 1 мм.

Стандартное значение ARP присваивается службой IGS каждой модели антенны. В отличие от электрических фазовых центров L1 и L2, эта точка должна быть физически доступна, что

позволяет проводить локальные маркшейдерские измерения. Для большинства антенн с дроссельным кольцом ARP – это точка в основании предусилителя на нижней стороне устройства. Физические размеры, относящиеся к ARP и фазовым центрам сигнала, а также измеренные фазовые формы фронта волны, приведены в файлах, предоставляемых службой IGS. Информация по эксцентриситету маркера и размерам антенны необходима для анализа данных по результатам наблюдений и преобразования результатов в координаты опорной станции.

В тех случаях, когда не требуются геодезические показатели самого высокого качества, в частности при установке большого количества оборудования для отсчета времени, геодезическое основание и маркер можно не использовать. В этой ситуации координаты станции привязываются непосредственно к точке ARP (а иногда к фазовому центру). Такое решение представляется целесообразным, однако в большинстве случаев приводит к изменению координат станции при замене антенны на другую модель. По возможности желательно придерживаться стандартных геодезических инструкций.

Для геодезических прикладных задач, в том числе для передачи сигналов времени с высокой точностью, необходимы высококачественные двухчастотные антенны. Наиболее распространенным техническим решением является набор концентрических дроссельных колец, которые можно приобрести у нескольких поставщиков. Они слегка отличаются внутренними размерами. Данная конструкция предназначена для двухчастотного приема, при этом она сильно ослабляет сигналы вблизи горизонта и ниже, где многолучевые отражения, как правило, самые сильные [Schupler and Clark, 2001]. При решении прикладных задач передачи сигналов времени в частности критичным является расположение антенны таким образом, чтобы минимизировать многолучевые сигналы, в особенности кодовую многолучевость. Как правило, это означает, что необходимо обеспечить чистый горизонт во всех направлениях и избегать размещения отражающих объектов вблизи антенны. Сигнал L2 особенно чувствителен к обратным отражениям от задней части антенны [Wyun *et al.*, 2002], поэтому если антенна не может быть размещена непосредственно напротив неотражающей поверхности, то обычно целесообразнее всего поднять ее выше любых предметов на заднем плане, исходя из практических соображений (не забывая при этом об устойчивости и потребностях в доступе). В любом случае пространство между фазовым центром антенны и ее задней поверхностью строго не должно быть кратным половине длины волны диапазона L, особенно в ближнем поле антенны [Elosegui *et al.*, 1995]. Для того чтобы обеспечить надежное геодезическое определение местоположения антенны, необходима хорошая видимость неба вплоть до угла места по крайней мере 10° , предпочтительно – до 5° .

Высказывались малообоснованные претензии, касающиеся больших отклонений геодезических оценочных показаний часов в зависимости от изменений температуры для некоторых антенн GPS. Вместе с тем даны рекомендации об использовании устройств с температурной стабилизацией. Подобные претензии могут быть справедливы для некоторых недорогих одночастотных устройств, в то же время прямые испытания стандартной антенны с дроссельными кольцами "AOA Dorne Margolin" не показали какой-либо зависимости оценочных показаний часов от температурных колебаний антенны. Рэй и Сеньор [2001] установили верхний предел краткосрочной (суточной) температурной чувствительности равным $2 \text{ пс}/^\circ\text{C}$, а позднее увеличили его до $< 10,1 \text{ пс}/^\circ\text{C}$ для любых возможных компонентов долгосрочного действия [Ray and Senior, 2003]. Для модели с дроссельными кольцами Ashtech были получены и меньшие значения чувствительности $0,17 \text{ пс}/^\circ\text{C}$ и менее [Rieck *et al.*, 2003].

Аналогично антеннам спутниковых передатчиков, еще раньше было замечено, что формы луча антенн слежения GPS отклоняются от идеальной полусферы [Schupler *et al.*, 1994]. Фактически это означает, что фазовый центр антенны и, следовательно, геодезическая эталонная точка будут зависеть от направления сигнала, принимаемого от конкретного спутника. Отклонениями азимута, как правило, пренебрегают, в расчет берется только зависимость от угла места, хотя в будущем ситуация скорее всего изменится. Службой IGS разработаны наборы фазовых поправок, которые применяются при анализе данных для каждой конкретной модели антенн. Пренебрежение этими аспектами может привести к систематическим ошибкам определения высоты станции вплоть до ~ 10 см. Современный подход IGS предусматривает использование дифференциальных фазовых поправок, относящихся к антенне с дроссельными кольцами марки "AOA Dorne Margolin T",

принятой в качестве эталона, а большинство измеренных значений получены по методике Мадера [1998], описанной на веб-сайте (www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/).

Фазовые формы спутниковых передатчиков в расчет не принимаются. Служба IGS перешла к использованию абсолютных диаграмм направленности антенн для спутников и станций слежения [Schmid and Rothacher, 2003].

Многие постоянные антенны GPS были снабжены обтекателями, для того чтобы элементы дроссельных колец не забивались снегом и разнообразным мусором. Эти защитные элементы неизбежно влияют на характеристики системы GPS, что проявляется главным образом в искажении фаз волнового фронта, которое может привести к заметным изменениям положения станции, особенно высоты. Разница в положении с обтекателем и без него может достигать уровня в несколько сантиметров. Испытания показывают, что конические обтекатели создают, как правило, наибольшие проблемы; некоторые типы полусферических обтекателей, по-видимому, оказывают минимальное влияние. В настоящее время служба IGS не учитывает наличие обтекателей в опубликованных ею таблицах фазовых центров антенн – все антенны рассматриваются как не имеющие обтекателя даже в тех случаях, когда поправки фазовых центров были измерены для обтекателей. В общем случае при отсутствии крайней необходимости рекомендуется избегать использования обтекателей. Если без них не обойтись, то следует отдать предпочтение обтекателю полусферической формы, влияние которого согласно результатам измерений является минимальным.

13.2.3 Антенные кабели и соединения

Кабель, соединяющий антенну GPS и приемник, должен быть по возможности коротким и состоять из одного цельного сегмента. В целях обеспечения максимально возможной мощности и согласования сопротивлений в кабель не должны вставляться разветвители сигнала и какие-либо другие компоненты. Специальные испытания воздействия разветвителей или подобных им элементов на эксплуатационные характеристики часов регулярно не проводились, однако в отдельных случаях при добавлении подобных элементов было выявлено ухудшение показателей. В работе [Rieck *et al.*, 2003] содержится отчет о результатах измерения температурной чувствительности, однако изучение многолучевости и прочих эффектов не проводилось. Разъемы должны быть надлежащим образом защищены от влаги и других внешних воздействий. Тип кабеля следует выбирать исходя из характеристик фазовой стабильности, низкой температурной чувствительности ($< 0,1$ пс/°С/м) и низкого уровня потерь. Следует избегать открытой прокладки кабеля, отдавая предпочтение укладке в траншее. В целом целесообразными являются любые меры по снижению воздействия на кабель условий окружающей среды.

13.2.4 Приемники GPS

Геодезические приемники GPS должны регистрировать результаты наблюдений псевдодальности и фазы несущей на частотах L1 и L2. При проведении процедур сравнения времени приемник должен также обладать способностью приема эталонной частоты и входных сигналов 1 PPS от внешнего стандарта, а затем использовать их надлежащим образом для выполнения своих внутренних функций отсчета времени. Подобные функции часто предлагаются в качестве опции при приобретении геодезического оборудования в базовой комплектации. На частоте L1 большинство приемников, входящих в состав сети IGS, отслеживают код P1 поверх более узкополосного кода C/A, поэтому опыт работы с моделями, поддерживающими только код C/A, ограничен. Непосредственные сравнения эксплуатационных характеристик часов для различных видов слежения за кодом не зарегистрированы. С другой стороны, не наблюдалось заметных различий для нескольких распространенных моделей [Ray and Senior, 2003]. Одним из важнейших требований является низкая восприимчивость кодового сигнала к многолучевости.

В ходе ряда исследований было выявлено отрицательное воздействие колебаний температуры на стабильность частоты приемников GPS [Rieck *et al.*, 2003; [Overney *et al.*, 1997; Petit *et al.*, 1998; Bruyninx and Defraigne, 1999; Schildknecht and Dudle, 2000]. Типичные значения чувствительности составляют порядка ± 100 пс/°С с большими отклонениями даже для одной модели, зависящими от конкретного устройства. Таким образом, для прикладных задач измерения времени и частоты, требующих высокой точности, важно, чтобы приемное оборудование GPS эксплуатировалось

в местах с контролируемыми условиями окружающей среды, при этом желательно, чтобы колебания температуры не превышали $\sim 0,1$ °C.

Во многих приемниках предусмотрена пользовательская настройка различных функций, например включение встроенного сглаживания кода или привязка внутренних часов приемника к времени GPS. Для корректного выполнения сравнений времени последняя настройка должна быть отключена. Рекомендуется также отключать сглаживание кода, так как эта процедура должна производиться при последующем анализе данных.

Как и в любой системе распространения сигналов времени и частоты важно, чтобы эталонная частота входного сигнала и сигналы 1 PPS были согласованы друг с другом и надежно изолированы от источников помех. Особенно следует обратить внимание на формирование запасных входных частот, если это необходимо. Кроме того, для нормального функционирования приемника необходимо, чтобы импульсы 1 PPS находились в пределах небольшой допустимой погрешности времени GPS, например < 30 мс.

Данные наблюдений системы ГНСС повсеместно передаются в формате RINEX (независимый обмен данными между приемниками). Описание формата приведено по адресу (<ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/data/format/rinex210.txt>). В этом документе содержатся также спецификации формата для навигационных сообщений, метеорологических данных и сопутствующая информация. Как правило, помимо файлов RINEX желательно архивировать файлы, содержащие внутренние данные и исходную информацию, полученную от приемника. Это может оказаться полезным в том случае, если возникнет проблема с преобразованием. Пользователи услуг измерения и передачи сигналов времени могут получить информацию о типах файлов, используемых для метода CV ("формат CGGTTS") из файлов RINEX, используя инструмент, разработанный в Королевской обсерватории Бельгии [Defraigne *et al.*, 2001].

13.2.5 Оценка влияния многолучевого распространения и тестирование системы

После того как установлена геодезическая станция, до ее ввода в эксплуатацию необходимо провести тщательную оценку качества данных. При обнаружении проблем необходимо принять меры по повышению качества данных. Консорциум университета Navstar (UNAVCO) создал весьма познавательный веб-сайт (www.unavco.org/facility/facility.html), который содержит полезные советы и отчеты по испытаниям оборудования для постоянно действующих станций GPS. Кроме того, поддерживается широкий спектр программных инструментов. В частности, набор инструментов "teqc" незаменим для обработки и анализа исходных данных GPS, включая преобразование файла RINEX, редактирование данных и проверку качества [Estey and Meertens, 1999]. По результатам работы "teqc" может быть выявлено большинство основных проблем, касающихся качества данных, таких как чрезмерное количество срывов слежения, неполный прием данных, препятствия, мешающие обзору неба и так далее. Средства диагностики "teqc" MP1 и MP2 позволяют измерять среднеквадратические отклонения многолучевости кодового сигнала на частотах L1 и L2 соответственно, если пренебречь эффектами многолучевости фазового сигнала. Неизвестные погрешности для каждого прохождения спутника обнуляются, следовательно, эти показатели многолучевости нечувствительны к сигналам с длительным периодом, которые могут иметь значение для отсчета времени. Кроме того, из-за принципиальных различий в режимах измерений, зависящих от типа приемника, результаты измерений MP1, как правило, не содержат абсолютных значений и практически не могут использоваться для сравнения между станциями. Однако неожиданно высокие отклонения многолучевости в зависимости от угла места и времени могут свидетельствовать о наличии проблем, связанных с конфигурацией или самой станцией. По крайней мере в одном случае была обнаружена значительная корреляция отклонений MP2 с изменениями эксплуатационных характеристик геодезических часов [Ray and Senior, 2003].

Если для режима работы часов приемника могут быть сформированы решения по точному определению местоположения (см. ниже) с использованием точных орбит и показаний спутниковых часов, содержащихся в продуктах IGS, то технологии, основанные только на коде, по сравнению с технологиями "код + фаза" могут выявить неожиданные проблемы, относящиеся к данным псевдодалности. Еще одно полезное средство диагностики измеряет уровень разрыва непрерывности в оценочных показаниях часов между последовательными однодневными дугами

анализа [Ray and Senior, 2003], отражающий главным образом колебания многолучевого шума псевдодалности (см. ниже). Прочие методы исследования погрешностей, связанных с многолучевым распространением, такие как распределение остаточных погрешностей геодезического измерения по небесным координатам или высокочастотные колебания отношений сигнал/шум GPS как правило, посвящены фазовым эффектам, а не псевдодалности. Классическое испытание тем не менее представляет собой ежедневный повтор определенной карты ошибок за номинальный период, составляющий одни звездные сутки – 23 ч 56 мин 4 с, приблизительно соответствующий циклу повторения наземно-спутниковой геометрической структуры.

13.2.6 Калибровка задержек на станциях слежения

Для сравнения показаний часов на одной станции с показаниями на другой станции при использовании какой-либо промежуточной системы необходимо, чтобы были точно известны показатели внутренних задержек сигналов в измерительном оборудовании. Такой процесс называется калибровкой. Как правило, можно рассматривать два класса методов калибровки: абсолютные определения, подразумевающие проведение измерений с непрерывным набором погрешностей с использованием имитатора сигнала GPS, который сам по себе должен быть откалиброван с надлежащей точностью; и дифференциальные определения, при которых проводится непосредственное сравнение с другой аналогичной системой, заданной в качестве эталонного стандарта. На практике используются оба метода. Небольшое количество геодезических приемников было откалибровано в абсолютном режиме. Они затем применяются в качестве транспортируемых эталонов для дифференциальной калибровки гораздо большего количества приемников, вводимых в эксплуатацию [Petit *et al.*, 2001].

Одна из моделей геодезических приемников, Ashtech Z-XII3T, прошла абсолютную калибровку при помощи средств имитации сигналов в Военно-морской исследовательской лаборатории США [White *et al.*, 2001; Petit *et al.*, 2001; Plumb *et al.*, 2005]. Абсолютные результаты согласуются в пределах заявленных погрешностей, составляющих около 3,5 нс, с результатами дифференциальных измерений относительно ранее откалиброванного классического приемника сигналов времени в режиме CV [Petit *et al.*, 2000]. Считается, что главным источником ошибок в процедуре абсолютной калибровки является сам имитатор GPS [Plumb and Larson, 2005]. Последующие дифференциальные калибровки относительно абсолютного стандарта могут выполняться с меньшими погрешностями – порядка 1,6 нс [G. Petit, частное сообщение].

Для удобства пользователей данные GPS, полученные от калиброванного приемника, могут корректироваться в целях устранения инструментальной погрешности в процессе формирования обменных файлов RINEX. Это выполняется определенным способом, который включает запись поправки смещения показаний часов dT в поле, которое резервируется в каждую эпоху наблюдения, и преобразование зарегистрированных результатов наблюдений согласно следующим отношениям в целях поддержания их строгого единообразия:

$$\text{Time (скорректировано)} = \text{Time} - Dt; \quad (13-3)$$

$$\text{PR (скорректировано)} = \text{PR} - (dT * c); \quad (13-4)$$

$$\text{phase (скорректировано)} = \text{phase} - (dT * \text{freq}), \quad (13-5)$$

где:

Time – эпоха наблюдения;

PR – псевдодалность;

phase – фаза несущей для частоты freq.

Предоставление значений поправки к смещениям показаний часов для каждой эпохи наблюдения позволяет при необходимости восстановить исходные результаты наблюдений. Однако данная функция RINEX ограничивается спецификацией формата до величин смещения показаний часов, усеченных до ближайшей наносекунды. Если коррекция калибровки часов на уровнях менее наносекунды применяется без использования поля смещения показаний часов RINEX, то величина поправки показаний часов должна быть документально оформлена в виде комментария в заголовке файла RINEX.

13.3 Стратегии анализа данных

Признание того факта, что система GPS может использоваться для достижения точности геодезических измерений, на несколько порядков выше, чем предполагалось изначально, обычно приписывается Каунселмену и Шапиро [Counselman and Shapiro, 1979]. Применяя астрономические методы, разработанные для интерферометрии со сверхдлинной базой (VLBI), они предложили использовать фазу несущей вместо псевдодальности в качестве основного наблюдаемого параметра GPS. Путем сверхточного отслеживания изменений фазы сигнала GPS было продемонстрировано, каким образом точность измерения относительного местоположения может быть доведена до уровня нескольких сантиметров, а не десятков метров. Вскоре после этого Босслер совместно с другими авторами [Bossler *et al.*, 1980] описали методы разрешения целочисленных фазовых неопределенностей сигнала несущей. За этим вскоре последовали разработки, которые в значительной степени опирались на традиции методов и моделей VLBI, большинство из которых могут непосредственно применяться и к GPS. Основные различия в методике анализа – это дополнительные орбитальные параметры GPS и относительные взвешенные значения наблюдаемых величин групповой задержки (которые являются важными для VLBI, но не для GPS, за исключением технологий часов) и результатов наблюдений за фазой (имеющих большое значение для GPS, обычно включаемых в VLBI лишь в виде производных по времени с малым весовым коэффициентом).

13.3.1 Уравнение результатов наблюдения GPS

Основные этапы сокращения результатов наблюдений GPS приведены в ICD-GPS-200 и многих последующих публикациях. Для заданной пары спутник и станция слежения уравнение результатов наблюдения псевдодальности для каждой частоты наблюдения i может быть выражено как

$$P_i = R + c(C_r - C_s) + I_i + T + e_i \quad (i=1,2), \quad (13-6)$$

где:

- $i = 1, 2$ соответствует двум частотам L_1 и L_2 ;
- R – расстояние между фазовыми центрами спутника и приемника;
- c – скорость света в вакууме;
- C_r – ошибка синхронизации часов станции слежения в момент приема сигнала (включая все внутренние компоненты задержки);
- C_s – ошибка часов передающего спутника во время излучения;
- I_i – ионосферная задержка;
- T – задержка в нейтральной атмосфере (главным образом в тропосфере);
- e_i – ошибка измерения (включая как тепловой шум, так и другие источники, например многолучевое распространение).

Тепловой шум в антенне и приемнике устанавливает теоретический нижний предел величины ошибок измерения, который в определенной степени зависит от конкретной технологии слежения, используемой приемником. Эксперименты на нулевой базовой линии, при которых большинство внешних воздействий, таких как многолучевое распространение, могут быть устранены, показывают, что для пары приемников Ashtech Z-12 среднее квадратическое значение псевдодальности C/A и значения шума измерения фазы несущей L_1 равны 4 см и 0,2 мм соответственно [Langley, 1996]. Однако локальные воздействия окружающей среды всегда преобладают над фактическим шумом измерения. Стандартные заранее заданные значения для обработки геодезических данных составляют около 1 м и 1 см для ошибок псевдодальности и фазы несущей соответственно на основе наблюдаемых остаточных погрешностей [Lichten and Border, 1987; Zumberge *et al.*, 1997].

Ионосферная задержка является дисперсионной (задержка приблизительно пропорциональна обратному значению квадрата частоты) и противоположна по знаку псевдодальности и фазе. Линейная комбинация двух частот

$$P3 = 2,5457*P1 - 1,5457*P2 \quad (13-7)$$

не содержит ионосферных воздействий первого порядка (однако в источнике [Kedar *et al.*, 2003] описаны исследования воздействий второго порядка). Таким образом,

$$P3 = R + c(C_r - C_s) + T + e, \quad (13-8)$$

где:

e – суммарные ошибки $P1$ и $P2$.

Уравнение результатов наблюдений для фазовых значений выглядит так же (в единицах расстояния) с добавлением члена неопределенности ($N_i \lambda_i$) для неизвестного количества фазовых циклов на каждой несущей частоте. Дальность R задается относительно геоцентрических координат фазовых центров спутника (X, Y, Z) и приемника (x, y, z) как

$$R = \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2}. \quad (13-9)$$

При использовании координат центра массы спутника или геодезического маркера приемника вместо фазовых центров необходимо учитывать соответствующие эксцентриситеты осей на основе внешних измерений. В передаваемом в вещательном режиме сообщении GPS представлены значения для каждой позиции спутника (фазовый центр) и показания часов как функция времени, с точностью до нескольких метров. При одновременных наблюдениях по меньшей мере четырех различных спутников и наличии грубой модели тропосферной задержки местоположение и показания часов пользовательского приемника могут быть определены с точностью до 10 м в каждую эпоху. Если местоположение пользователя известно заранее, а неизвестны лишь показания часов, то достаточно наблюдать всего один спутник.

Сравнения показаний часов методом одновременного наблюдения производятся путем вычисления разности между данными, полученными одновременно от двух приемников, координаты которых известны. Затем устраняется ошибка в показаниях спутниковых часов вместе с большей частью ошибки в положении спутника и тропосферной задержкой. Для стандартных измерений методом CV, использующих только одночастотные значения псевдодальности C/A, точность определения разностей показаний удаленных часов, как правило, ограничивается ионосферными ошибками моделирования. Этот показатель может быть значительно улучшен при помощи линейной комбинации результатов наблюдений бескодовых P1 и P2 аналогично методу CV P3 [Defraigne *et al.*, 2001]. Как правило, точность сравнений часов методом CV снижается при увеличении расстояния между приемниками, поскольку синфазная взаимная компенсация отброшенных членов оказывается все менее эффективной. В целях ослабления этих воздействий в метод CV для UTC недавно были внесены изменения. В настоящее время для расчета поправок, связанных с указанными воздействиями, используются высокоточные орбиты IGS и ионосферные карты (igsb.jpl.nasa.gov) [G. Petit, частное сообщение]. Целесообразно выполнить ряд доработок, в частности усовершенствовать тропосферное моделирование и учесть геофизические движения (например, приливные смещения). Однако при проведении подобных дополнительных модификаций невозможно воспользоваться точностью, присущей наблюдениям за фазой, поэтому результаты измерения времени методом CV не способны достичь уровня результатов, полученных при использовании полноценного геодезического метода, особенно в интервалах менее одних суток.

В геодезическом анализе не используется передаваемая в вещательном режиме навигационная информация, за исключением, возможно, первого уровня ограничения доступа и редактирования данных. Для всех известных геофизических воздействий вычисляются заранее определенные модели высшего качества, а оставшиеся неизвестные величины подгоняются на основе данных с использованием физически приемлемой параметризации. В большинстве случаев целесообразно привязать показания спутниковых часов и параметров орбит к сверхточным определениям, публикуемым службой IGS, поскольку обычный пользователь GPS вряд ли сможет это сделать. Это значительно упрощает оценку показаний часов приемника при условии строгого соблюдения правил и моделей IGS.

13.3.2 Методы для глобальных решений

В том случае если показания часов и орбиты спутников должны быть определены, а не получены из внешнего источника, сначала необходимо рассмотреть процедуры, подобные тем, которые используются в аналитических центрах IGS, где данные, взятые из глобальной сети слежения, упрощаются в процессе одновременных широкомасштабных корректировок. Для определения орбит и показаний часов спутников необходимо наличие глобальной равномерно распределенной сети приемников. Дуги анализа, как правило, разделяются на 24-часовые сегменты, совпадающие со стандартными суточными файлами RINEX, которые обычно содержат результаты наблюдений с 00:00:00 по 23:59:30. (Следует отметить, что согласно правилам IGS время GPS используется для формирования временных меток во всех файлах данных IGS.) Для некоторых типов систем многосуточные дуги анализа могут формироваться путем объединения нескольких последовательных суточных дуг. Начальный этап обработки включает отбор файлов данных, полученных от каждой станции. Необходимо проверять и редактировать данные в целях выявления потенциально проблемных сегментов, исправлять или помечать сдвиги в фазах несущей, регулировать небольшие смещения временных меток в некоторых типах приемников и корректировать погрешности псевдодальности в случаях отсутствия P1 и P2. В большинстве случаев отобранные данные переформатируются в файлы с прямым доступом в соответствии с выбранной системой анализа.

Все геодезические методы коррекции предполагают наличие достаточно точной, заранее определенной информации о том, что оценка параметров является линейной, и таким образом могут применяться обобщенные методы наименьших квадратов. За неимением более подходящих источников данных может использоваться передаваемое в вещательном режиме навигационное сообщение. При необходимости, например, для новой станции в целях соблюдения условия линейности может использоваться итерация решений. Заранее установленные орбиты спутников перемещаются из системы отсчета, связанной с земной корой (используемой для орбит, данные о которых распространяются в вещательном сообщении, а также передаются службой IGS), в геоцентрическую инерциальную (ECI) систему отсчета, использующую заданный набор значений параметров ориентации Земли (EOP). В данном случае значения EOP, как правило, предоставляются IGS или Международной службой вращения и систем координат Земли (IERS); веб-сайт службы находится по адресу (www.iers.org). В системе отсчета ECI орбиты спутников могут быть согласованы с параметризованными моделями для динамических перемещений и объединены. Этот этап необходим для формирования частных производных параметров, если орбиты подлежат корректировке при последующей аппроксимации данных. Для описания движений спутников GPS были разработаны различные формы – от метода конечных элементов, описанного в работе [Fliegel *et al.*, 1992], до эмпирической модели [Beutler *et al.*, 1994]. Даже несмотря на то что лучшая физическая модель поведения спутников, как ожидается, должна превзойти чисто эмпирические методы, опыт свидетельствует о том, что любое улучшение является незначительным. Это связано с тем, что для геодезических прикладных задач, требующих высокой точности, параметризация орбиты должна быть достаточно интенсивной, чтобы зафиксировать сантиметровые перемещения, что для реальных спутников без использования по крайней мере нескольких эмпирических параметров является чрезвычайно сложной задачей. Перемещения усложняются колебаниями ускорения, зависящими от изменений воздействия давления солнечного излучения, и особенно работой микродвигателей, которые используются для регулировки положения некоторых спутников ранних моделей.

Для каждого значения полученных данных рассчитывается уравнение результатов наблюдений с использованием заранее определенных координат станций, привязанных также к системе отсчета ECI. Помимо уже упомянутых основных воздействий необходимо учитывать влияние некоторых менее значительных эффектов (см. следующий раздел). Корректировка параметров производится в целях согласования с результатами наблюдения путем минимизации остаточных погрешностей с использованием стандартных методов, в частности пакетного метода наименьших квадратов, последовательного метода наименьших квадратов или фильтра Калмана. Фильтр Калмана и связанные с ним фильтры особенно эффективны для обработки параметров часов, так как они легко обрабатывают стохастические шумовые процессы, соответствующие отклонениям показаний

реальных часов. Для глобальной сети, состоящей из нескольких десятков станций слежения, полный набор корректируемых параметров включает:

- до трех геоцентрических координат для каждой станции (при условии некоторых уточнений земной точки привязки, в частности ограничений для позиций определенных опорных станций);
- изменяющиеся во времени параметры часов приемника (которые должны быть достаточными для обеспечения сколь угодно больших отклонений от эпохи к эпохе);
- орбитальные параметры для каждого спутника (по крайней мере шесть кеплеровых элементов или их эквивалентов плюс смещение по оси Y и другие эмпирические члены);
- нестационарные спутниковые часы;
- переменные во времени зенитные тропосферные задержки (а также возможные азимутальные градиенты); значения смещения ЕОР и скоростей движения полюсов и изменения продолжительности дня;
- значения неопределенности фазы несущей.

В ряде случаев добавляются незначительные параметры для таких воздействий, как отклонения положения спутника или чистое смещение начальной точки сети слежения от центра массы Земли. Набор параметров часов имеет неполный ранг, равный единице, в связи с отсутствием абсолютной информации о какой-либо эпохе часов. Стандартный геодезический анализ решает эту проблему путем выбора конкретных часов (как правило, наземных часов, обладающих высокой стабильностью), которые не должны быть настроены, чтобы служить эталоном в процессе оценки. Затем относительно этих неподвижных часов производятся оценки показаний всех других часов. Кроме того, точка привязки часов может быть указана путем фиксирования линейной комбинации имеющихся часов, чтобы обеспечивалось равенство нулю (или другому заданному значению, например времени GPS).

Для достижения наивысшего качества желательно "зафиксировать" хотя бы некоторые из параметров фазовой неопределенности. Поскольку попытка сделать это на основе недифференцированных результатов односторонних наблюдений вызывает значительные затруднения, стандартная процедура заключается в применении жестких ограничений к целочисленным значениям неопределенностей с определением двойной разности для выбранных пар станций. Успешное выполнение процедуры для основной части параметров неопределенности значительно стабилизирует систему в целом. В большинстве случаев итерация параметров системы может увеличить количество успешно зафиксированных параметров неоднозначности и облегчить редактирование данных.

13.3.3 Системы отсчета и модели для поправочных членов

Если при оценке основного уравнения результатов наблюдений GPS требуется точность на уровне нескольких сантиметров, то необходимо учитывать ряд незначительных воздействий. Большинство из них документально зафиксировано в условных обозначениях IERS [McCarthy and Petit, 2003]. Геоцентрическая система координат, которая используется для точек, находящихся на поверхности Земли, называется Международной земной системой отсчета (ITRF) [Altamimi *et al.*, 2002]. При выполнении преобразования из системы ITRF в систему отсчета ECI принимаются в расчет движения полюса в земной системе отсчета Земли и вращение вокруг полюса. Движение полюса в инерциальном пространстве (т. е. нутация [Altamimi *et al.*, 2002]) иногда не учитывается совсем, либо оценивается лишь приблизительно, поскольку спутники на околоземных орбитах не очень чувствительны к этому воздействию. Таким образом, система отсчета ECI не всегда точно совмещена с Международной небесной системой отсчета (ICRF), практически инерциальной системой, которая образуется из позиций внегалактических источников радиоизлучения, найденных методом VLBI, и исходной точкой которой является барицентр Солнечной системы.

Поправочные члены для спутников – это описанные ранее значения смещения между центрами массы и фазовыми центрами антенн, а также фазовое вращение поляризации антенны, связанное с изменениями в перспективе. Последний эффект, известный в астрономии как угол параллакса, возникает потому, что сигнал GPS обладает правой круговой поляризацией. При изменении

геометрии видимости между спутником и приемником соответственно изменяется фаза поляризации. При оценке результатов наблюдений фазы несущей должна применяться поправка, однако к псевдодальности это не относится согласно описанию, приведенному в работе [Wu *et al.*, 1993].

Поправки к расположению приемника являются гораздо более разнообразными и сложными, что связано с геофизическими воздействиями [McCarthy and Petit, 2003]. Перемещения точек поверхности в основном вертикальные, связанные с приливным движением твердой Земли ("тела"), имеют амплитуды, равные на средних широтах нескольким дециметрам, и должны моделироваться с надлежащей точностью. Соответствующие движения земной коры, связанные с нагрузкой, создаваемой приливами в океане, в большинстве точек почти на порядок величины меньше, однако в некоторых прибрежных зонах могут усиливаться. Если оцениваются орбиты GPS, то колебания геопотенциала, связанные с твердой Землей и приливами в океане, также должны учитываться в объединениях орбит. Поправка, связанная с приливыми явлениями на полюсах, учитывает крупномасштабную деформацию при вращении, связанную с колебаниями положения полюса относительно земной коры. Само по себе движение полюсов и скорость вращения подвергаются значительным суточным и полусуточным модуляциям, связанным с приливыми движениями океана. Если местоположение спутников GPS определяется в инерциальной системе отсчета, то для столь крупномасштабных перемещений земной системы отсчета должны применяться поправки. Параметры орбит IGS в геоцентрической системе отсчета уже включают колебания ЕОР длительностью менее суток, поэтому для наблюдателя на Земле суммарное влияние отсутствует. Точные модели, описывающие все эти эффекты, предоставлены авторами МакКарти и Пети [McCarthy and Petit, 2003]. Кроме того, пользователям следует применять рекомендованные службой IGS и описанные ранее поправки, относящиеся к фазовым центрам конкретных антенн.

Несмотря на то что международные научные союзы выступают за использование геоцентрического координатного времени (TCG) для проведения анализа данных околоземных спутников, подавляющее большинство аналитических групп (если не все) продолжают использовать земное время (TT), которое отличается от UTC и TAI лишь на величину смещения. С другой стороны, TCG отличается от TT по скорости (частоте), что связано с общими релятивистскими эффектами. Следовательно, тактовые частоты, полученные от IGS и других аналитических групп GPS, должны непосредственно сравниваться с величинами, измеренными в лабораториях отсчета времени. Некоторые физические постоянные, в частности GM (произведение гравитационной постоянной и массы Земли), зависят от выбранной релятивистской системы отсчета, поэтому необходимо тщательно подходить к выбору соответствующих значений.

При обработке данных GPS, как правило, используются три вида релятивистских поправок.

- 1 Сдвиг частоты первого порядка относительно TT, связанный с замедлением времени и разницей гравитационного потенциала, уже применялся в системе GPS путем установки сдвигов частоты генератора колебаний на космическом аппарате при номинальных значениях элементов орбиты. Для некруговых орбит GPS пользователь должен применять поправку второго порядка (см. ICD-GPS-200).
- 2 "Динамическая" поправка к величине ускорения околоземных спутников приведена в условных обозначениях IERS [McCarthy and Petit, 2003].
- 3 Координатное время распространения, включая гравитационную задержку, отдельно указано в условных обозначениях IERS (однако им часто пренебрегают).

(Более подробную информацию см. в работе [Kouba, 2004].)

13.3.4 Метод точного определения местоположения

В отличие от крупных глобальных сетевых систем GPS анализ данных, полученных от отдельных станций в режиме точного определения местоположения (PPP), является гораздо более эффективным и экономичным при решении большинства прикладных задач [Zumberge *et al.*, 1997]. При использовании данного метода точные параметры спутниковых орбит и показания часов, предварительно полученные из какого-либо источника, применяются без каких-либо корректировок. (В некоторых разновидностях метода PPP допускается частичная релаксация параметров орбит и показаний часов.) Как уже говорилось выше, применяя все те же модели, пользователь может

определять координаты, отклонения в показаниях часов и тропосферные задержки для отдельно взятого приемника [Kouba and Heroux, 2000]. Качество результатов будет напрямую зависеть от точности и согласованности заранее полученной спутниковой информации. Система координат и точка привязки предполагаемых орбит и часов будут отражаться на результатах PPP, поэтому весьма важно, чтобы эти параметры были четко определены и стабильны. Специально для этих целей предназначаются продукты IGS (см. ниже). В работе [Kouba, 2004] приведено руководство по надлежащему использованию продуктов IGS для выполнения анализа метода PPP. Для суточных дуг анализа типичные значения повторяемости при определении местоположения должны быть на уровне около 10 мм по вертикали и от 3 до 5 мм по горизонтали. Часы приемника, работающего в режиме PPP, должны обладать аналогичным уровнем прецизионности < 100 пс, однако точность (без учета погрешностей калибровки), как правило, будет выше (см. далее); шкалой времени PPP будет служить шкала предварительно заданных спутниковых часов.

13.3.5 Влияние ошибок на показания часов

Ошибки в моделях анализа, предварительной информации или результатах наблюдений оказывают воздействие на оценочные показания часов GPS. В работе [Dach *et al.*, 2003] для изучения отличительных свойств различных типов ошибок ввода используется имитация. Например, ошибка в высоте станции вызывает сдвиг частоты для длинных базовых линий в направлении восток–запад. Во временной области подобная ошибка приводит к разрыву непрерывности на границе между дугами обработки. Аналогичное воздействие могут оказывать ошибки спутниковых орбит. В реальной практике влияние этих ошибок на продукты IGS вряд ли можно считать очень значительным, поскольку данные о местоположении станций и спутников обрабатываются вместе с показаниями часов. Вероятно, более важным является приведенное в работе [Dach *et al.*] подтверждение того, что шум псевдодальности на уровне 0,5 м вызывает смещение между дискретными суточными дугами обработки даже в том случае, если предположить, что распределение этого шума соответствует белому шуму. Значения смещения аналогичны смещению действующих часов (см. ниже). Цветной шум псевдодальности предположительно имеет еще более выраженное влияние на скачки показаний часов между дугами.

Использование большего количества данных о псевдодальности (более высокая частота дискретизации и/или более длинные дуги) предположительно должно повысить точность показаний часов. Увеличение частоты дискретизации является эффективным только в том случае, если преобладающая длина волны при многолучевом распространении меньше периода дискретизации; в противном случае ошибки в показаниях часов не будут снижать среднее значение при добавлении дополнительных данных. Как указано в работе [Senior *et al.*, 1999], в отношении формальных погрешностей часов более длинные дуги анализа должны снижать усредненное воздействие кодового шума, хотя и с меньшей эффективностью, чем \sqrt{N} . Однако это справедливо не для фактических показаний часов, а только для их формальных ошибок. Кроме того, не было установлено, отличаются ли более длинные дуги только на величину чистого смещения показаний часов, либо изменяется (улучшается) также частотный состав. Если дуги большей длины обеспечивают более высокую точность показаний часов лишь относительно смещения, то другие методы анализа должны давать практически эквивалентные результаты. Речь идет о специальной фильтрации после анализа результатов, полученных с более короткими дугами. Последние методы могут оказаться экономически более целесообразными либо более подходящими для некоторых прикладных задач.

Разрывы непрерывности между независимыми дугами анализа являются естественными и ожидаемыми для всех геодезических параметров, включая орбиты, тропосферные задержки, а также показания часов. Смещения должны отражать качество, присущее данным от GPS и методам анализа. Амплитуда скачков в показаниях часов, как правило, превышает таковую для большинства других параметров, так как в этом участвуют лишь кодовые данные, фактически усредненные по дуге анализа. Были рассмотрены различные методы, позволяющие минимизировать разрывы непрерывности в показаниях часов на границе суток. Наиболее очевидный метод заключается в том, чтобы полностью отказаться от пакетов дискретного анализа и использовать какую-либо непрерывную схему обработки [Petit *et al.*, 1999; Senior *et al.*, 1999].

Однако это нелегко осуществить на практике. Применение данного метода может вызвать накопление влияния ошибок [Senior *et al.*, 1999]. Длинные дуги анализа также приводят к тому, что оценки показаний часов коррелируются по одним и тем же периодам (статистика типа "случайного блуждания"), что ограничивает стабильность, которая может быть достигнута иначе – путем использования независимых дуг анализа (режим белого шума). Альтернативным методом устранения разрывов в результатах анализа является сцепление временных последовательностей, используя перекрывающиеся дуги для определения смещений [Bruyninx and Defraigne, 1999; Larson *et al.*, 2000]. Даже в том случае, если скачки в показаниях часов на границах дуг подчиняются распределению белого шума [Ray and Senior, 2003], воздействие на сцепленные последовательности представляет собой добавление случайного компонента белого шума. Другими словами, процесс сцепления также приводит к долгосрочным корреляциям показаний часов и может ограничивать долгосрочную стабильность, которой можно добиться в противном случае. В работе [Dach *et al.*, 2006] рассматриваются другие, более сложные методы формирования практически непрерывных показаний часов в рамках самого процесса оценки путем передачи информации от одной дуги к следующей. Эти методы в большинстве случаев работают по принципу фильтра или сглаживающего устройства, повышая краткосрочную стабильность передачи сигналов времени, при этом на более длинных интервалах эффекты незначительны.

Трудно понять широкораспространенное стремление к подавлению скачков в показаниях часов на границах дуг, особенно если они невелики (на уровне от 100 до 200 пс). Применение методов, предусматривающих введение долгосрочных корреляций во временные последовательности показаний часов (например, при помощи сцепления), представляется особенно контрпродуктивным. Если действительно существует необходимость в устранении разрывов, то, вероятно, предпочтительнее использовать метод фильтрации/сглаживания, что позволит избежать проблем, связанных с корреляцией временных последовательностей, несмотря на то что это может исказить краткосрочный характер изменений в показаниях часов. С другой стороны, сами по себе разрывы непрерывности предоставляют ценную диагностическую информацию о качестве установки станции (см. ниже). Если такие скачки превышают стандартный уровень шума, равный примерно 120 пс [Ray and Senior, 2003], то необходимо выявить и устранить причины этого явления, которые не исчезли из поля зрения в результате действий, проведенных после анализа.

13.4 Продукты IGS, связанные с показаниями часов, и временные шкалы

С момента своего создания в 1994 году служба IGS ежедневно предоставляет файлы, содержащие точные данные о расположении спутников и показания часов, табулированные с 15-минутными интервалами. С тех пор время от времени появляются новые или модифицированные продукты. Все продукты IGS (<http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>) формируются путем взвешенного усреднения показателей, предоставленных восемью участвующими аналитическими центрами. Поскольку наборы данных, используемые отдельными группами, обычно пересекаются, влияние различных стратегий анализа, моделирования и программного обеспечения в значительной степени независимо. Поэтому надлежащим образом взвешенные комбинации отдельных результатов, как правило, превосходят любое отдельно взятое решение. Таким образом, продукты IGS, возможно, выигрывают в прецизионности и точности и, безусловно, в стабильности, достоверности и надежности по сравнению с результатами работы какой-либо отдельной аналитической группы.

13.4.1 Имеющиеся в наличии наборы продуктов

"Классические" продукты IGS, связанные с показаниями часов, были изменены 5 ноября 2000 года (GPS Week 1087) – в день, когда был введен в действие новый алгоритм комбинации, а продукты, связанные с показаниями часов, были дополнены приемниками, входящими в состав сети слежения, а также спутниками [Kouba and Springer, 2001]. Интервал табуляции новых часов (на спутниках и станциях слежения) был сокращен до 5 мин. Для сравнения: ранее шаг дискретизации спутниковых часов равнялся 15 мин.

В зависимости от задержки передачи данных формируются три серии продуктов:

- 1) продукты Ultra-Rapid (сверхбыстрые) (содержащие показания спутниковых часов, но не приемников), предназначенные для работы пользователей в реальном времени;
- 2) продукты Rapid (оперативные), выпускаемые примерно через 17 часов после окончания каждого дня;
- 3) окончательные продукты Final, выпускаемые через 13 дней после окончания каждой недели.

В Таблице 13-1 представлены продукты IGS, связанные с параметрами орбит и показаниями часов, значения задержки и оценочные значения точности. (Помимо информации, приведенной в таблице, служба IGS предоставляет ионосферные карты, значения зенитных тропосферных задержек на трассе, параметры ориентации Земли и так далее.) Все продукты доступны в центрах обработки данных или центральном бюро IGS (igs.cb.jpl.nasa.gov). Использование продуктов IGS Rapid или Final взамен передаваемой в вещательном режиме информации позволяет определять значения PPP на уровне 1 см для 24-часовых дуг.

Сеть слежения IGS состоит более чем из 350 приемных станций, распределенных по всему миру. Все станции работают в непрерывном режиме и по крайней мере раз в день передают файлы результатов наблюдений RINEX с 30-секундными выборками. На большинстве станций используются внутренние кварцевые генераторы, которые привязываются к времени GPS по собственным результатам наблюдений, однако более 100 станций IGS оборудованы внешними эталонами частоты. На Рисунке 13-1 показано распределение и тип внешних эталонов в пределах сети IGS (по состоянию на ноябрь 2004 года). Примерно 51 станция используют в качестве эталонов водородные мазеры, 28 – цезиевые часы, а 27 – рубидиевые часы. Около 20 станций совмещены с лабораториями отсчета времени.

ТАБЛИЦА 13-1

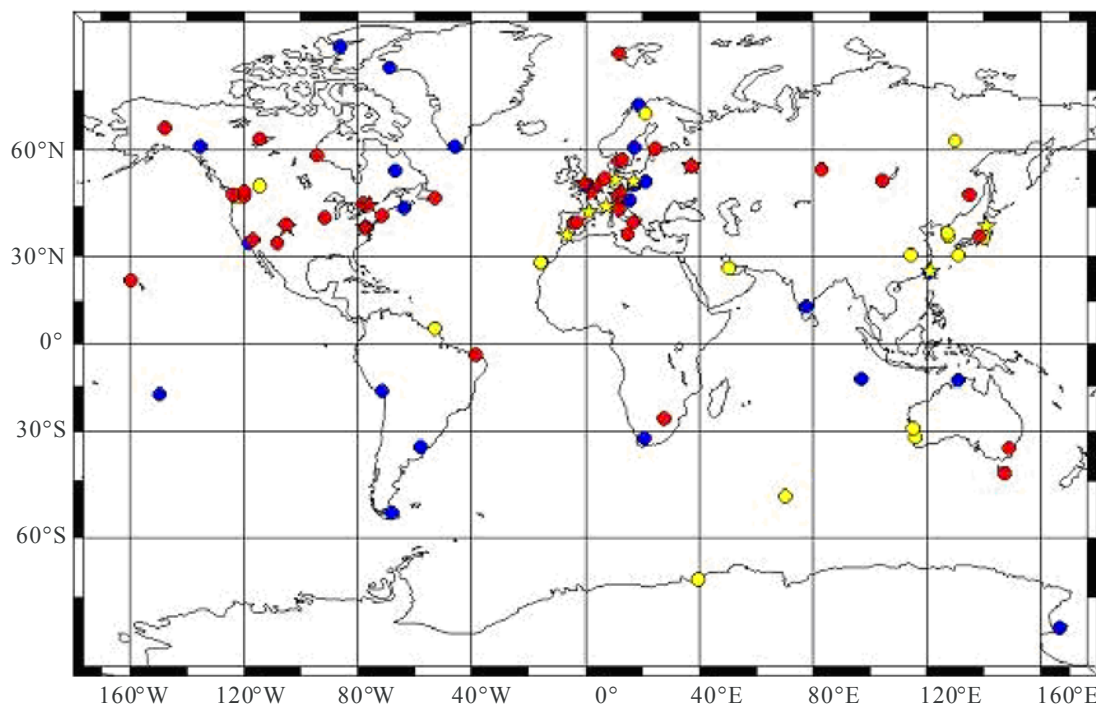
Комбинированные продукты IGS, связанные с параметрами орбит и показаниями часов, и их характеристики по сравнению со значениями, передаваемыми в вещательном режиме

Спутниковые эфемериды и показания часов спутников/станций GPS		Оценка точности	Задержка	Интервалы обновлений	Интервал выборки
Сведения, передаваемые в вещательном режиме	Орбиты	~200 см	В реальном времени	–	Ежедневно
	Спутниковые часы	~7 нс			
Ultra-rapid (расчетная часть)	Орбиты	~10 см	В реальном времени	Четыре раза в день	15 мин
	Спутниковые часы	~5 нс			
Ultra-rapid (наблюдаемая часть)	Орбиты	<5 см	3 ч	Четыре раза в день	15 мин
	Спутниковые часы	~0,2 нс			
Rapid	Орбиты	<5 см	17 ч	Ежедневно	15 мин
	Часы спутников и станций	~0,1 нс			5 мин
Final	Орбиты	<5 см	~13 дней	Еженедельно	15 мин
	Часы спутников и станций	~0,1 нс			5 мин

Оценки точности орбит, кроме расчетных параметров, основываются на сравнениях с результатами независимых лазерных измерений дальности. Значения прецизионности лучше приведенных значений точности. Файлы продуктов представлены для 24-часовых периодов, кроме продуктов Ultra-rapid, рассчитанных на 48 ч. 5-минутные данные показаний часов доступны в файлах формата "clock RINEX", а 15-минутные выборки показаний часов находятся в файлах формата SP3 вместе со спутниковыми эфемеридами.

РИСУНОК 13-1

Карта распределения станций IGS, использующих внешние эталоны частоты (по состоянию на ноябрь 2004 года). Цветом обозначены виды стандартов: красным – водородные мазеры, желтым – цезиевые стандарты, а синим – рубидиевые стандарты. Станции IGS, совмещенные с лабораториями отсчета времени, отмечены звездочками



Sat_time_freq-13-01

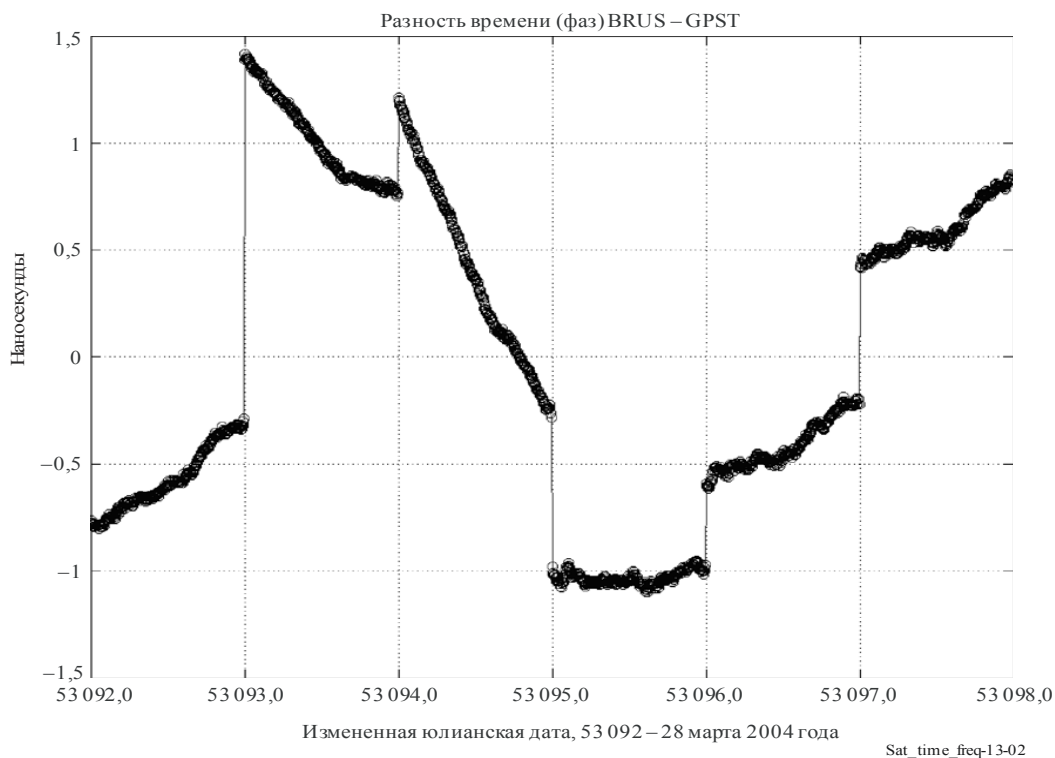
13.4.2 Шкалы времени IGS

Особых требований к базовой шкале времени для продуктов, связанных с показаниями часов, не предъявляется, если продукты используются в геодезических прикладных задачах позиционирования. Единственное требование – шкала времени должна быть достаточно близка к времени GPS. Важным преимуществом геодезии GPS является то, что она в первом приближении не зависит ни от стабильности, ни от точности шкалы времени, поскольку влияние часов может быть устранено при помощи двойного вычисления разностей. Тем не менее желательно, чтобы эталонная шкала времени обладала другими свойствами, такими как высокая стабильность и точная прослеживаемость к UTC. Эти качества увеличивают ценность продуктов IGS, связанных с показаниями часов, для прикладных задач, напрямую не связанных с геодезией, особенно для процедур отсчета времени.

Первоначально в качестве эталона для продуктов, связанных с показаниями часов, служба IGS использовала простую ежедневную линейную привязку наблюдаемых показаний спутниковых часов к передаваемому в вещательном режиме времени GPS. Однако нестабильность времени GPS сравнительно высока и составляет около 2×10^{-14} в день, что по крайней мере на порядок хуже нестабильности лучших эталонов частоты в сети IGS. Некоторые из новейших спутников серии Block IIR оборудованы часами, которые более стабильны, чем комплекс часов, поддерживающих время GPS. Это частично связано с алгоритмом релейного управления, используемым для привязки передаваемой в вещательном режиме шкалы времени к UTC (через реализацию, выполняемую Военно-морской обсерваторией США). Устаревшая процедура ежедневной привязки своих часов к времени GPS, выполняемая IGS, изо дня в день вызывала значительные разрывы непрерывности как по времени, так и по частоте (Рисунок 13-2). Данная процедура не влияет на использование продуктов для точного определения местоположения, однако она безусловно ограничивает возможности распространения сигналов времени и частоты.

РИСУНОК 13-2

Оценки параметров геодезической передачи сигналов времени через GPS для станции BRUS, расположенной в Брюсселе, в период с 28 марта по 2 апреля 2004 года



Оценки параметров передачи времени, указанные на Рисунке 13-2, соответствуют ежедневной линейной привязке к времени GPS. На нестабильность станции BRUS влияет ежедневная линейная привязка к передаваемому в вещательном режиме времени GPS, которая является причиной значительных разрывов непрерывности по времени и частоте. При построении графика линейная диаграмма была удалена.

В целях повышения стабильности продуктов Rapid и Final, связанных с показаниями часов, были разработаны новые внутренние шкалы времени IGS. Новые шкалы времени построены в виде взвешенных комплексов включенных в них часов как для станций, так и для спутников. Подробное описание алгоритма приведено в работе [Senior *et al.*, 2003].

Основными запускающими механизмами для каждой из временных шкал (IGRT для продуктов Rapid и IGST для продуктов Final) являются действующие водородные мазеры. Несмотря на это, некоторый вклад могут внести и менее распространенные часы, в том числе рубидиевые генераторы, установленные на спутниках серии Block II.

Данный алгоритм построен на базе фильтра Калмана. Для каждого часа за простой полиномиальной моделью следует линейный квадратичный гауссов (LQG) алгоритм для свободной привязки временных шкал к времени GPS.

Взвешенные значения для каждого часа определяются динамически при помощи итерации на основе нестабильности, наблюдаемой на нескольких интервалах усреднения, не превышающих одни сутки. Для каждого часа задается верхний предел весовых значений во избежание ситуаций, в которых отдельные часы могут обогнать шкалы времени [Thomas and Azoubib, 1996].

Алгоритм привязки LQG жестко ограничен постоянной времени, равной примерно 30–40 дням. нестабильность полученных в результате шкал времени, как правило, не превышает 1×10^{-15} в сутки. Для средних и более продолжительных периодов времени эта величина ограничивается путем привязки к времени GPS. Однако существуют периоды времени, в которые нестабильность шкал

времени может быть в определенной степени снижена, например если количество станций, использующих водородный лазер, в продуктах, связанных с показаниями часов, невелико.

На Рисунке 13-3 показаны характеристики часов станции BRUS после перехода этого эталона к шкале времени IGST на основе продукта IGS Final. Межстанционные показания часов аналогичны тем, которые приведены на Рисунке 13-2; отличаются лишь базовые шкалы времени. Налицо существенное повышение стабильности при использовании шкалы времени IGS. Незначительные остаточные разрывы непрерывности на некоторых границах суток отражают главным образом качество локальных данных станции BRUS.

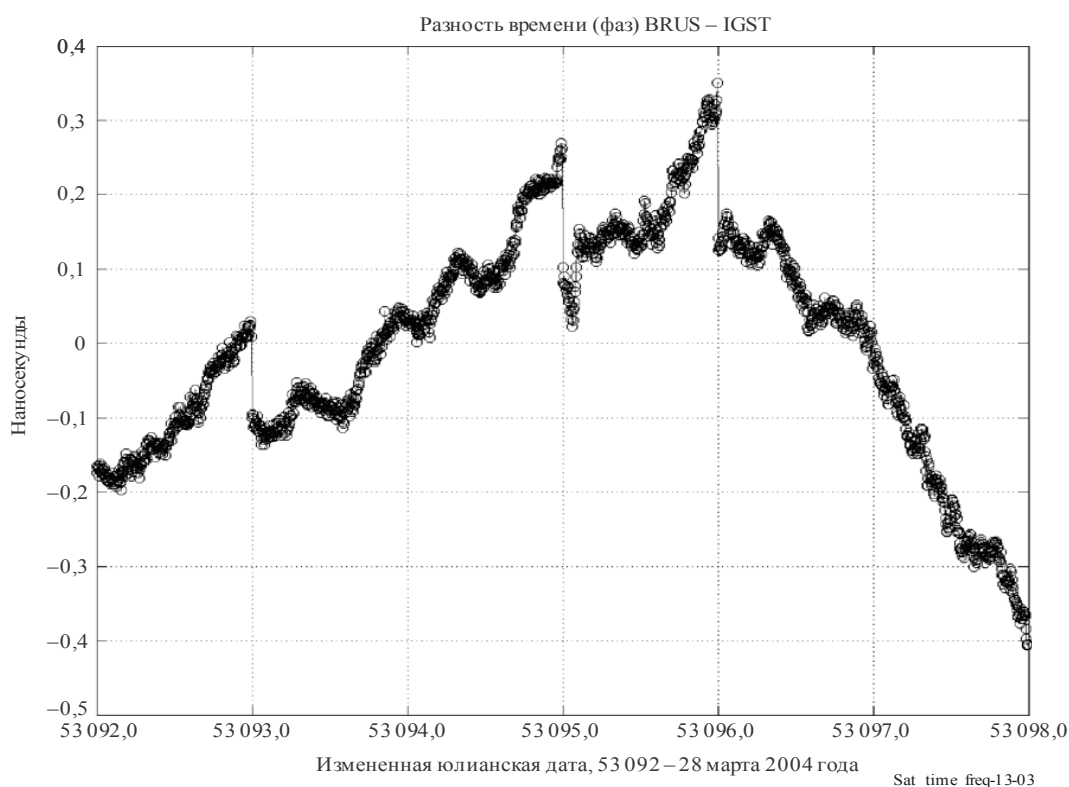
Возможно, некоторые эффекты, проявляющиеся для отдельных часов, в том числе скачки на границах суток, могут отрицательно повлиять на ансамблевые шкалы времени, например из-за проблем, связанных с редактированием необнаруженных данных. Тем не менее есть доказательства, что любые подобные ограничения являются несущественными и что ансамблевые шкалы времени намного превосходят отдельно взятые часы, участвующие в процессе.

Новые шкалы времени IGS были внедрены в официальные продукты в начале марта 2004 года (см. IGS Mail № 4875 по адресу igscb.jpl.nasa.gov).

Продукты, связанные с показаниями часов и привязанные к тем же внутренним шкалам времени, с ноября 2000 года доступны по адресу (<https://goby.nrl.navy.mil/IGStime>).

РИСУНОК 13-3

Показания часов станции BRUS, идентичные отображенным на Рисунке 13-2, за исключением тех, которые привязаны к шкале времени IGST (Показания часов продукта IGS Final). При построении графика линейная диаграмма была удалена



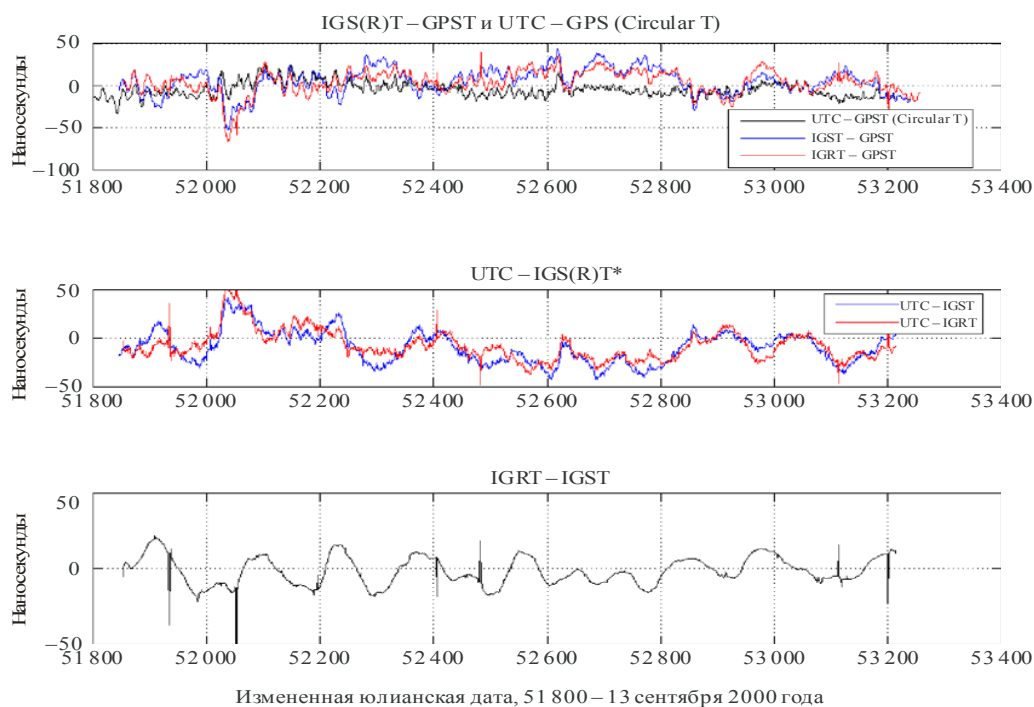
Долгосрочные отклонения каждой шкалы времени IGS относительно времени GPS и времени UTC изображены на Рисунке 13-4 (приблизительно). Нестабильность шкал времени IGS на интервале от долей суток до одних суток существенно улучшается по сравнению с временем GPS, однако долгосрочная нестабильность остается на прежнем уровне, поскольку все еще зависит от времени

GPS. В настоящее время предпринимаются шаги для более точной привязки шкал времени IGS к UTC путем использования данных, полученных из BIPM, и задействования станций IGS, совмещенных с лабораториями отсчета времени [Senior *et al.*, 2004].

Верхний график на Рисунке 13-4 показывает значение UTC минус GPST из Circular T бюро BIPM, а также значения шкал времени IGST и IGRT службы IGS минус GPST. В IGS и BIPM реализации GPST могут отличаться на несколько наносекунд, что связано с применением различных стратегий наблюдения и анализа [Senior *et al.*, 2004]. Средний график отображает значения UTC – IGST и UTC – IGRT, полученных путем вычисления разности временных последовательностей, указанных на верхнем графике, в связи с чем предполагается, что GPST является эквивалентом из Circular T и IGS. Отклонения от данного предположения являются причиной незначительной части отличий, отмеченных на графиках, особенно на высоких частотах. И наконец, нижний график отображает значение IGRT минус IGST, при этом предполагается, что каждая из шкал в одинаковой степени придерживается GPST. Случайные всплески связаны с редко встречающимися погрешностями рассогласования показаний часов продукта IGS Rapid с GPST и фактически отсутствуют в обеих шкалах времени.

РИСУНОК 13-4

Сравнение шкал времени IGST и IGRT службы IGS с временем GPS (GPST) и с временем UTC (Без учета дополнительных секунд) с 5 ноября 2000 года по 28 июня 2004 года



Sat_time_freq-13-04

13.5 Оценка характеристик путем анализа разрывов на границах суток

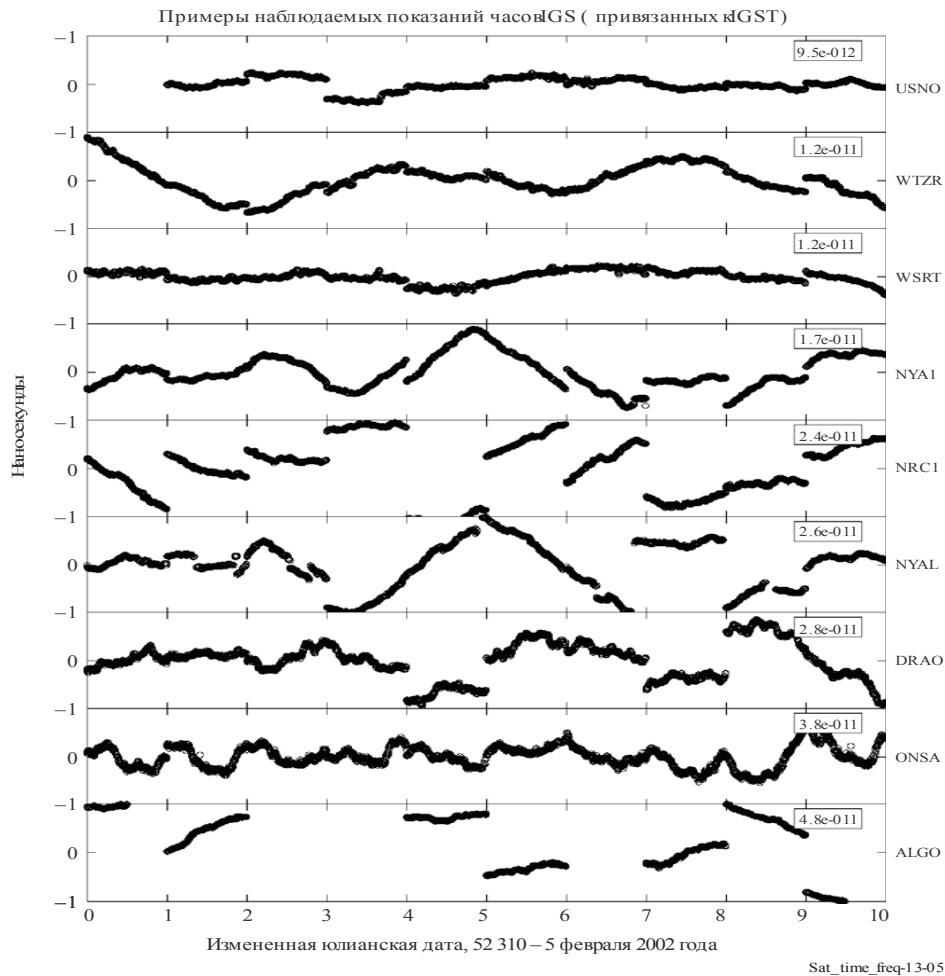
"Абсолютная" точность оценочных показаний часов на основе GPS (без учета погрешности калибровки) целиком и полностью определяется данными измерения псевдодалности, усредненными по интервалу анализа, равному, как правило, 24 часам. При анализе односуточных дуг глобальных данных, отобранных по 5-минутным интервалам, оценки формальных ошибок часов обычно составляют около 120 пс при условии, что каждый результат измерения псевдодалности обладает погрешностью в 1 м. Более реалистичные испытания фактической точности измерений могут быть проведены путем сравнения оценочных показаний часов на границах между

независимыми дугами анализа для приемников, оборудованных генераторами с повышенной устойчивостью. (Менее стабильные часы также могут подвергаться испытаниям, в случае если для устранения ошибок интерполяции используются перекрывающиеся дуги анализа, однако смежные оценочные показания часов уже не будут независимыми.) Это является аналогом классического геодезического испытания на воспроизводимость для временной последовательности данных определения местоположения.

Скачки в показаниях часов на границах суток могут подвергаться анализу для систем на основе базовых линий или для сетей, в которых часы отдельной станции фиксируются в качестве эталона. Однако интерпретация результатов может вызывать определенные трудности, поскольку воздействия, наблюдаемые на двух станциях, будут свернуты в каждой временной последовательности показаний часов. Более совершенный метод заключается в использовании для подобного анализа продуктов IGS, связанных с показаниями часов, включающих новую комплексную шкалу времени, обладающую повышенной стабильностью [Senior *et al.*, 2003]. Разделяя пары часов, можно изолировать наблюдаемые варианты поведения для отдельных станций. На Рисунке 13-5 приведен пример параллельных временных последовательностей оценочных показаний часов IGS для восьми станций на основе водородного лазера. Следует отметить, что изменчивость в отношении разрывов непрерывности между станциями не зависит от стабильности отдельных часов, поскольку некоторые станции демонстрируют большие скачки и при этом отменную стабильность в интервалах менее суток, и наоборот. Распределения значений смещения на границах суток, изученные Рэем и Сеньором, оказались нулевым средним и гауссовым, при этом среднеквадратические отклонения сильно зависели от конкретных станций.

РИСУНОК 13-5

**Оценочные показания часов девяти станций IGS, использующих водородные лазеры,
за период 5–15 февраля 2002 года**



При построении графика на Рисунке 13-5 из данных для каждого часа была удалена отдельная квадратическая тенденция. На каждой панели число, обведенное прямоугольником, соответствует девиации Аллана на 300 с, при этом скачки в показаниях часов на границах суток не учитываются. Амплитуда скачков на границах суток существенно меняется от станции к станции и не зависит от стабильности часов в пределах менее суток.

Обновленные и расширенные результаты предыдущего анализа скачков в показаниях часов IGS представлены в Таблице 13-2. Проведено исследование показаний часов продуктов IGS Rapid и Final за 1310 дней с октября 2000 года по июнь 2004 года.

Критерии редактирования и обработки аналогичны критериям, указанным в работе Рэя и Сеньора [Senior *et al.*, 2003]. Максимальный разрыв данных на границе суток составляет 30 мин (обычно 5 мин), поэтому шумом интерполяции, вызванным нестабильностью стандартов на основе водородных мазеров, можно пренебречь. Поскольку для конкретных значений разности между парами независимых суток приведены среднеквадратические статистические данные, каждая оценка суточного значения точности должна быть меньше на $\sqrt{2}$. Следует особо отметить значительный (фактически на порядок) разброс среднеквадратических характеристик от станции к станции. Это явление предположительно отражает широкий диапазон характеристик кода между этими станциями и в свою очередь демонстрирует существенные различия условий многолучевого распространения: внешних – для антенны, и внутренних – для оборудования GPS. В некоторых случаях эти характеристики заметно изменяются во времени, иногда в соответствии с изменениями, зарегистрированными в контрольных журналах станций. В ряде случаев отмечены сезонные колебания. Ранее было показано, что среднеквадратические отклонения не зависят от выбора моделей приемника или антенны, а также от использования обтекателей.

ТАБЛИЦА 13-2

Сводные статистические данные по разрывам непрерывности в показаниях часов на границах суток для 38 станций IGS, оборудованных стандартами частоты на основе водородных мазеров

Станция IGS	Среднеквадратическое значение скачка в показаниях часов (пс)	Замечания
ONSA	149	Отлично
BREW	152	Отлично
OPMT (TL)	158	Новая станция, данные крайне ограничены
BRUS (TL)	165	Улучшение до 118 пс после изменений летом 2003 года
MAD2	170	Крайне ограниченные данные, среднеквадратическое значение недостоверно
WTZR (TL)	189	
GODE	205	
USN1 (TL)	225	В июле 2004 года станция заменена на USN3
WSRT	227	Незначительное ухудшение с лета 2003 года
KHAJ	233	Ограниченные данные
CRO1	236	Мазер больше не используется
USUD	266	Мазер больше не используется
NPLD (TL)	268	
TID*	269	Очевидное улучшение с лета 2003 года
YEBE	271	

ТАБЛИЦА 13-2 (окончание)

Станция IGS	Среднеквадратическое значение скачка в показаниях часов (пс)	Замечания
GOL2	271	Крайне ограниченные данные, среднеквадратическое значение недостоверно
AMC2 (TL)	283	Показатели улучшены после замены антенны/приемника в июне 2002 года
SPT0 (TL)	286	
WES2	296	
PIE1	305	Улучшение после замены приемника в октябре 2002 года
STJO	334	
USNO (TL)	354	Очевидное ухудшение с весны 2003 года
IRKT	359	
NYAL	363	Намного лучше, чем на станции NYA1 в 2004 году
NLIB	368	
MATE	389	Значительные временные отклонения; улучшение в 2004 году
KOKB	460	Существенное ухудшение перед заменой антенны/кабеля в мае 2004 года
FAIR	478	Частичное улучшение с лета 2003 года
DRAO	522	
YELL	564	Большие сезонные колебания, значительное ухудшение в зимний период
ALBH	587	С сентября 2003 года существенное улучшение – до 97 пс

Станция IGS	Среднеквадратическое значение скачка в показаниях часов (пс)	Замечания
HOB2	631	Отклонения, коррелируемые с изменениями на станциях
MEDI	703	
FORT	706	
NYA1	750	Значительное ухудшение с лета 2003 года
ALGO	877	Большие сезонные колебания, значительное ухудшение в зимний период
NRC1 (TL)	936	Большие сезонные колебания, значительное ухудшение в зимний период
METS	1 065	Мазер больше не используется
Использованы показания часов в продуктах IGS Rapid и Final с октября 2000 года по июнь 2004 года. Станции, совмещенные с лабораториями отсчета времени, отмечены символами TL.		

Наилучшие долгосрочные характеристики среди исследованных станций IGS, соответствующие суточной точности часов, равной $(149/\sqrt{2}) = 105$ пс, получены на станции ONSA (Онсала, Швеция).

Суточные погрешности показаний часов станций BREW (Брюстер, штат Вашингтон, Соединенные Штаты Америки), OPMT (Париж, Франция), BRUS (Брюссель, Бельгия), MAD2 (Мадрид, Испания), WTZR (Веттцель, Германия) и GODE (Гринбелт, штат Мэриленд, Соединенные Штаты Америки) лишь незначительно выше – от 107 до 145 пс.

У остальных станций наблюдается постоянное прогрессирующее ухудшение характеристик от 620 до 753 пс для станций ALGO (Алгонкин, Онтарио, Канада), NRC1 (Оттава, Онтарио, Канада) и METS (Метсахови, Финляндия).

Диапазон точности показаний часов, составляющий порядок величины, отражает изменения в местных условиях и не является недостатком, к примеру шкалы времени IGS. Данный вывод убедительно подтверждается временными изменениями характеристик, наблюдаемыми на ряде станций.

Резкие колебания обычно соответствуют заранее известным изменениям конфигурации или оборудования. (К сожалению, не для всех станций опубликованы данные об изменениях.) На некоторых станциях наблюдались существенные сезонные колебания, особенно на трех канадских станциях: YELL, ALGO и NRC1 (Рисунок 13-6).

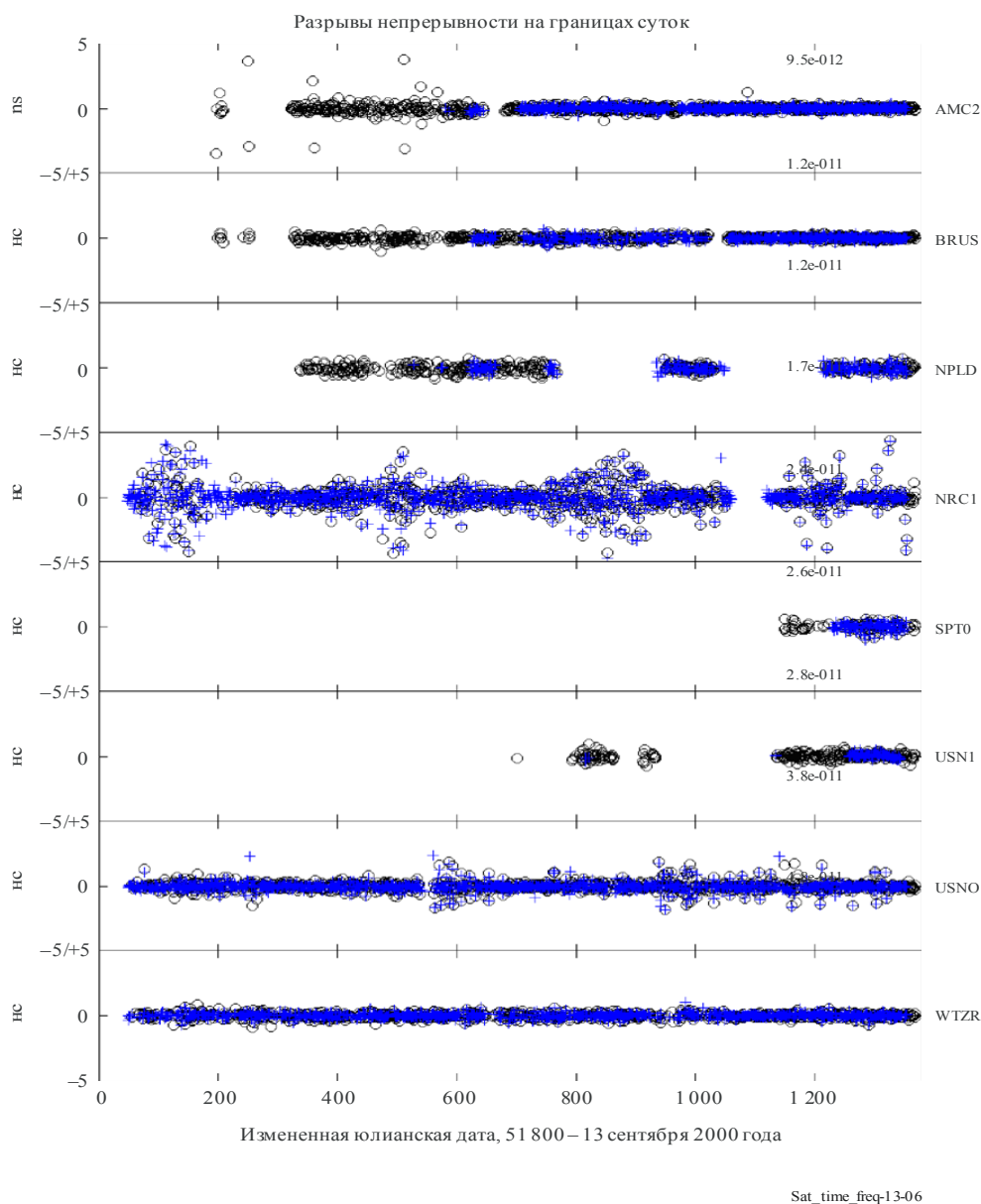
Ранее было высказано предположение, что значительное увеличение скачков в показаниях часов на этих станциях в зимний период связано с накоплением снега и льда на поверхностях под антеннами и в ближнем поле антенн.

На Рисунке 13-6 показана история скачков в показаниях часов на границах суток для тех станций IGS в лабораториях отсчета времени, которые оборудованы водородными мазерами (в Таблице 13-2 они обозначены символами TL). Со станции OPMT данные поступают редко, поэтому они не были учтены. Станцию BRUS, особенно с лета 2003 года, следует считать образцом и моделью для других лабораторий отсчета времени.

Период исследования на Рисунке 13-6 – с октября 2000 года по июнь 2004 года. Показания часов продуктов IGS Rapid показаны в виде кругов черного цвета; показания часов продуктов Final – в виде символов "+" синего цвета.

РИСУНОК 13-6

Временные колебания смещений в показаниях часов на границах суток для восьми станций IGS на основе водородных мазеров в лабораториях отсчета времени



13.6 Результаты сравнения с независимыми системами двусторонней передачи сигналов времени

Помимо внутренних оценок, рассмотренных выше, весьма важно сравнить оценочные показания геодезических часов с оценками, полученными от независимых систем. Стандартный метод CV, широко применяемый в лабораториях отсчета времени, не обеспечивает достаточной точности для выполнения информативных сравнений, за исключением максимально больших временных интервалов усреднения. Более перспективными являются методы CV P3 и TWSTT. Одними из лучших результатов для межконтинентальных базовых линий являются совпадения с геодезическими часами со среднеквадратической погрешностью, равной примерно 0,5 нс или около 0,3 нс TDEV для периодов усреднения до нескольких месяцев [Plumb *et al.*, 2005; Petit *et al.*, 2004].

В Таблице 13-3 приведены сводные результаты недавних сравнительных высококачественных исследований.

ТАБЛИЦА 13-3

Сводные опубликованные результаты сравнения геодезического метода и методов CV P3 или TWSTT для ряда линий связи различной длины

Линия связи	Длина базовой линии	Метод/статистический показатель/значение	Период сбора данных	Источник
NPL-PTB	749 км	P3/RMS/0,48 нс TW/RMS/0,57 нс	5 месяцев 4 месяца	Petit & Jiang, 2004
IEN-PTB	835 км	P3/RMS/0,49 нс TW/RMS/0,64 нс	2 месяца 2 месяца	Petit & Jiang, 2004
TL-CRL	2 112 км	P3/RMS/0,58 нс TW/RMS/1,27 нс	8 месяцев 8 месяцев	Petit & Jiang, 2004
USNO-NPL	5 695 км	P3/RMS/0,48 нс TW/RMS/0,59 нс	5 месяцев 3 месяца	Petit & Jiang, 2004
USNO-PTB	6 275 км	P3/RMS/0,45 нс TW/RMS/0,49 нс	5 месяцев 5 месяцев	Petit & Jiang, 2004
USNO-AMC ⁽¹⁾	2 361 км	TW/Разность ± RMS/ -2,10 ± 0,69 нс (договор калибровки) TW/TDEV/ <0,1 нс, 300 ≤ τ ≤ 2 000 с <0,34 нс, 2 000 ≤ τ ≤ 7 × 10 ⁶ с TDEV/0,34 нс при 7 × 10 ⁶ с	7 месяцев	Plumb & Larson, 2004
USNO-NIST	2 405 км	TW/RMS/0,83 нс TW/TDEV/ <0,3 нс, 3 600 ≤ τ ≤ 6 × 10 ⁶ с <0,72 нс, 6 × 10 ⁶ ≤ τ ≤ ≤ 7,4 × 10 ⁶ с TDEV/0,72 нс при 7,4 × 10 ⁶ с	5,5 месяца	Plumb & Larson, 2004
PTB-NIST	7 532 км	TW/RMS/0,79 нс TW/TDEV/ <0,5 нс, 2 × 10 ⁵ ≤ τ ≤ 7,5 × 10 ⁶ с TDEV/0,24 нс при 7,5 × 10 ⁶ с	7 месяцев	Plumb & Larson, 2004
USNO-PTB	6 275 км	RMS/2 нс	2 года	Dach <i>et al.</i> , 2002

⁽¹⁾ Линии TW и геодезические линии были откалиброваны раздельно для учета инструментальных задержек.

RMS – это среднеквадратическое значение.

Результаты измерений TWSTT относительно более редки по сравнению с непрерывными данными GPS, получаемыми в последние годы примерно четыре раза в сутки. Значения разности вычисляются путем интерполяции результатов, полученных геодезическим методом и методом CV P3, до эпох TWSTT. При обработке данных методом CV P3 использовались точные параметры орбит и ионосферные карты IGS, а также перемещения моделей для приливных движений твердой Земли. К результатам P3 применялось также сглаживание Вондрака, эквивалентное фильтру нижних частот с периодом отсечки около 0,4 суток. Как отмечали Пети и Цзян [Petit and Jiang, 2004], значения разности между параллельными временными последовательностями должны быть постоянными для каждой пары часов (эквивалентно погрешности калибровки).

Таким образом, стандартное отклонение должно являться мерой относительной долгосрочной нестабильности двух методов передачи сигналов времени. Данные, полученные геодезическим методом и методом P3, часто относятся к одному и тому же приемнику GPS, поэтому можно предположить, что некоторые ошибки, связанные с приемником и антенной, будут общими для обоих

методов и не очевидными в их различиях (это относится в частности к влиянию температурной чувствительности). Таким образом, полностью независимыми являются лишь сравнения с методом TWSTT. Для всех трех длинных базовых линий, изученных Пламбом и Ларсоном [Plumb and Larson, 2005], значения нестабильности метода TWSTT вплоть до интервалов от 10^5 до 10^6 с преобладали над значениями девиации Аллана для разностей показаний геодезических TW-часов. На более длинных интервалах значения нестабильности показаний часов преобладают над значениями шума при передаче, полученными обоими методами.

На основании опубликованных результатов сравнения с методом TWSTT точность результатов геодезического метода передачи сигналов времени, очевидно, будет не ниже $(0,5 \text{ нс}/\sqrt{2}) = 0,35 \text{ нс}$ (среднеквадратическое значение), если предположить, что каждый метод вносит одинаковый вклад в наблюдаемые различия. Это намного больше геодезических формальных ошибок для суточных анализов, примерно равных 0,12 нс, однако такая точность укладывается в диапазон характеристик некоторых станций GPS с худшими показателями (Таблица 13-2). Учитывая, что эти сравнения показывают неизменно лучшую стабильность геодезических часов для интервалов времени, достигающих семи дней, действующий среднеквадратический уровень шума для метода TWSTT почти всегда выше, а типичное значение геодезической точности лучше, чем 0,35 нс.

13.7 Оценка параметров передачи сигналов времени

На Рисунке 13-7 изображен порог стабильности 24-часовых показаний геодезических часов согласно выводам, сделанным Рэем и Сеньором [Ray and Senior, 2003] на основе анализа скачков в показаниях часов IGS на границах суток. Характер изменений не сильно отличается от $\tau^{-0,5}$, соответствующая процессу шума в режиме случайного блуждания. Для времени усреднения, равного одним суткам, выведенное значение нестабильности составляет $1,4 \times 10^{-15}$.

Некоторые из наилучших станций IGS приближаются к подобным показателям, однако, как мы видим, показатели остальных станций гораздо скромнее. Если интервал анализа составляет более суток, то оценочные показания часов должны быть практически независимыми, а предполагаемый характер изменений ближе к процессу белого шума τ^{-1} , как показано на Рисунке 13-7.

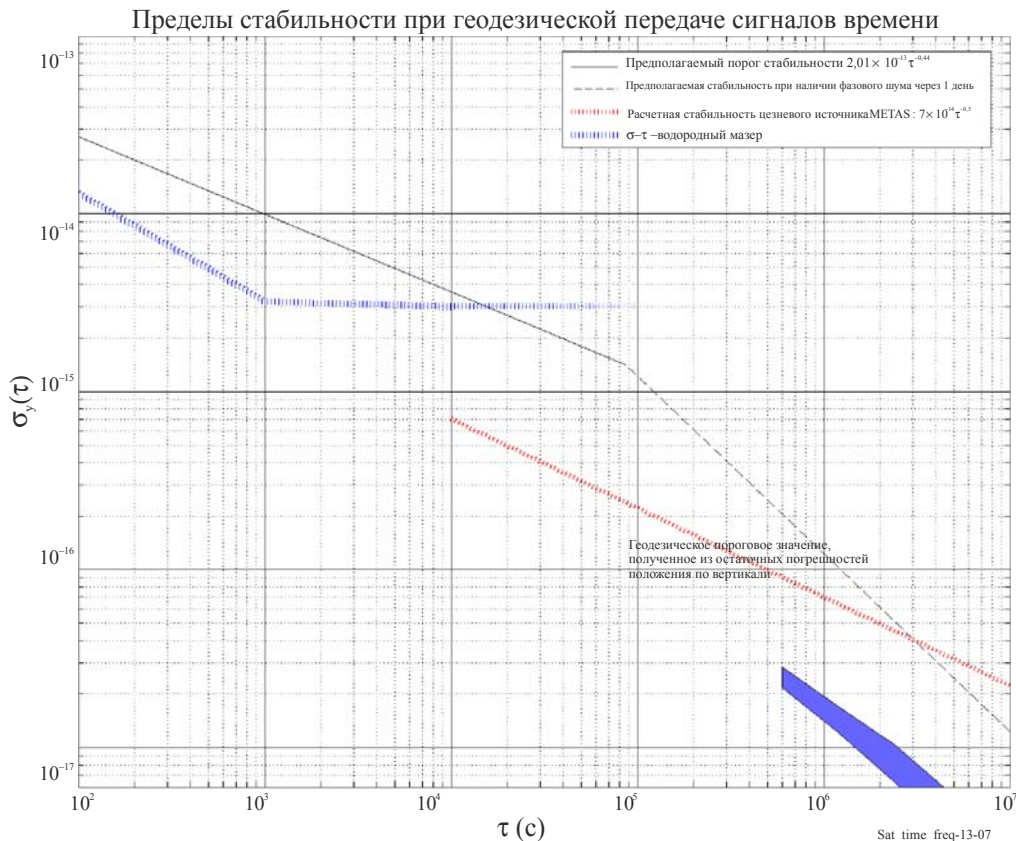
Однако до сих пор не представилась возможность тщательного изучения данной области, что связано с нестабильностью широко применяемых стандартов частоты. Как только данные цезиевых источников станут более доступными, можно будет говорить о стабильности геодезических часов на интервалах более одних суток. На Рисунке 13-7 в качестве примера приведен график планируемых параметров цезиевого источника METAS [Dudle *et al.*, 2001].

Если значения длины дуг анализа выходят за пределы 24 часов, то порог стабильности, вероятно, будет ниже показанного здесь уровня, хотя это на рисунке и не отображено. С другой стороны, это безусловно расширит характеристики показаний геодезических часов в режиме случайного блуждания на тех же самых более длительных интервалах и, следовательно, может поставить под угрозу достижение более высокой стабильности в течение более длительных периодов времени с использованием независимых суточных дуг.

На Рисунке 13-7 показана также особая стабильность (предположительно заниженная) активного водородного лазера MHM2010 производства Symmetricon (преемника устаревшего водородного лазера Sigma Tau). Из этого можно сделать вывод, что геодезический метод не должен служить ограничением для сравнения часов, обладающих столь высокими характеристиками в суточных интервалах времени, несмотря на то что шум при передаче сигналов времени, вероятно, преобладает над нестабильностью часов в интервалах, не превышающих 14 000 с. Разброс суточных значений стабильности, наблюдаемых на станциях IGS, использующих водородные лазеры, от уровня выведенного нами порога нестабильности до величины, приблизительно равной 10^{-14} , вероятно, является комбинацией стабильности, присущей локальному стандарту частоты (некоторые из них устарели, и при их эксплуатации не проводится строгий контроль условий окружающей среды), и местных условий многолучевого распространения, влияющих на измерение псевдодальности.

РИСУНОК 13-7

Порог стабильности девиации Аллана для геодезической передачи сигналов времени обозначен сплошной черной линией



Характеристики предела стабильности на Рисунке 13-7 согласуются с шумовым процессом в режиме случайного блуждания на интервалах вплоть до одних суток. Кроме того, предполагается, что независимые оценочные суточные показания часов будут иметь ошибки с распределением белого шума и следовать девиации Аллана τ , изображенной пунктирной черной линией. Для сравнения, красной полосой обозначены планируемые параметры цезиевого источника METAS, а синей полосой – параметры водородного мазера $\sigma \tau$ (производства Symmetricon). Основной предел геодезических значений, представленный синей полосой внизу, основан на повторяемости результатов измерений высоты станции.

13.8 Будущие тенденции

Применение геодезических методов для глобальной передачи сигналов времени и частоты находится в зачаточном состоянии. Эти методы не особенно широко используются хронометрическими организациями. Можно ожидать гораздо более интенсивного использования метода для проведения сравнений времени и частоты в международном масштабе в будущем, особенно с учетом его высокой эффективности и умеренной стоимости. Установка новых, более стабильных лабораторных стандартов частоты несомненно будет способствовать этому процессу. Вероятно, самым крупным препятствием для более широкого применения геодезического метода является тот факт, что он требует более сложного анализа данных. В то время как существует ряд пакетов программного обеспечения, которое широко используется организациями, занимающимися вопросами определения местоположения, среди групп отсчета времени эти программы не так распространены, что вполне объяснимо. С большой степенью определенности разработка простых общедоступных инструментов для расчета показаний часов методом PPP будет способствовать более широкому использованию геодезических оценочных показаний часов.

Поскольку предельные характеристики геодезического отсчета времени задаются качеством данных измерения псевдодалности, особенно влияния многолучевого распространения, любые значительные усовершенствования этого метода, вероятно, приведут к сокращению ошибок при измерении псевдодалности и анализе многолучевого распространения. Доработка технологий слежения при помощи приемников GPS и конструкции геодезических антенн также может предложить некоторые преимущества. Безусловно, во многих случаях будет целесообразно выполнять более тщательное размещение и установку существующего оборудования. Однако наибольшую выгоду скорее всего принесут новые широкополосные сигналы и схемы модуляции ГНСС. Например, некоторые из форм сигналов, предложенных для системы GALILEO, в перспективе обладают значительно более низким уровнем ошибок из-за многолучевого распространения [Hein and Rapp, 2002]. Предлагаемые структуры сигналов, в которых большая часть мощности сдвигается к краям полосы, в том числе некоторые новые модуляции GPS, как правило, потенциально способны существенно уменьшить негативное воздействие многолучевого распространения [Weill, 2003].

Для процедур сравнения показаний времени с использованием любого из существующих методов погрешность калибровки оборудования является преобладающей абсолютной ошибкой. Ошибки калибровки по крайней мере на порядок величины превышают типичные ошибки геодезических оценочных показаний часов. Перспективы существенного повышения точности калибровки в будущем пока остаются неясными.

Ссылки

- ALLAN D. and WEISS, M. [1980] Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite, *Proc. 1980 IEEE Freq. Contr. Symp.*, Philadelphia, PA, p. 334-356.
- ALTAMIMI Z., SILLARD P. and BOUCHER C. [2000] ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth science application. *J. Geophys. Res.*, **107**(B10), 2214, doi: 10.1029/2001-JB000561, 2002.
- BEUTLER G., BROCKMANN E., GURTNER W., HUGENTOBLER U., MERVART L. and ROTHACHER M. [1994] Extended orbit modeling techniques at the CODE processing center of the International GPS Service for Geodynamics (IGS): Theory and initial results. *Manuscripta Geodaetica*, **19**, p. 367-386.
- BOSSLER J. D., GOAD C. C. and BENDER, P. L. [1980] Using the Global Positioning System (GPS) for geodetic positioning. *Bull. Geod.*, **54**, p. 553-563.
- BRUYNINX C. and DEFRAIGNE P. [1999] Frequency transfer using GPS codes and phases: Short- and long-term stability. *Proc. 31st Precise Time and Time Interval Meeting*, Washington, DC: The U.S. Naval Observatory, p. 471-480.
- BYUN S. H., HAJJ, G. A. and YOUNG L.E. [2002] GPS signal multipath: A software simulator. *GPS World*, **July 13**(7), p. 40-49.
- COUNSELMAN C. C. and SHAPIRO I. I. [1979] Miniature interferometric terminals for Earth surveying. *Bull. Geod.*, **53**, p. 139-163.
- DACH R., BEUTLER G., HUGENTOBLER U., SCHAER, S., SCHILDKNECHT, T., SPRINGER T., DUDLE G. and PROST L. [2003] Time transfer using GPS carrier phase: Error propagation and results. *J. Geodesy*, **77**, doi 10.1007/s00190-002-0296-z, p. 1-14.
- DACH R., SCHILDKNECHT T., HUGENTOBLER U., BERNIER L.G. and DUDLE G. [2006] Continuous Geodetic Time Transfer Analysis Methods. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **53**(7), p. 1250-1259.
- DEFRAIGNE P., PETIT G. and BRUYNINX C. [2001] Use of geodetic receivers for TAI, *Proc. 33rd Precise Time and Time Interval Meeting*, Washington, DC: The U.S. Naval Observatory, p. 341-348.
- DUDLE G., JOYET A., BERTHOUD P., MILETI G. and THOMANN P. [2001] First results with a cold cesium continuous fountain resonator. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **50**(2).
- ELOSEGUI P., DAVIS J. L., JALDEHAG R. T. K., JOHANSSON J. M., NIELL A. E. and SHAPIRO I. I. [1995] Geodesy using the Global Positioning System: The effects of signal scattering on estimates of site positions. *J. Geophys. Res.*, **100**, p. 9921-9934.

- ESTEY L. H. and MEERTENS C.M. [1999] TEQC: The multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. *GPS Solutions*, **3**(1), p. 42-49.
- FLIEGEL H., GALLINI T. and SWIFT, E. [1992] Global Positioning System radiation force model for geodetic applications. *J. Geophys. Res.*, **97**(B1), p. 559-568.
- HEIN G. W. and PANY T. [December, 2002] Architecture and signal design of the European satellite navigation system Galileo – Status. *J. Global Positioning Systems*, **1**(2), 2002, p. 73-84.
- KEDAR S., HAJJ G. A., WILSON B. D. and HEFLIN M. B. [2003] The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions. *Geophys. Res. Lett.*, **30**(16), 1829, doi:10.1029/2003 GL017639.
- KOUBA J. [2004] Improved relativistic transformations in GPS. *GPS Solutions*.
- KOUBA J. and HEROUX P. [2000] Precise point positioning using IGS orbit products. *GPS Solutions*, **5**(2), p. 12-28.
- KOUBA J. and SPRINGER T. [2001] New IGS station and satellite clock combination. *GPS Solutions*, **4**(4), p. 31-36.
- LANGLEY R. B. [1996] GPS receivers and the observables. *GPS for Geodesy*, Teunissen, P.J.G. and A. Kleusberg (editors), Berlin: Springer-Verlag, p. 141-173.
- LARSON K. M., LEVINE J., NELSON L. M., and PARKER T. E. [2000] Assessment of GPS carrier-phase stability for time-transfer applications. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **47**(2), p. 484-494.
- LEWANDOWSKI W., AZOUBIB J., De JONG G., NAWROCKI J. and DANAHER J. [1997] A new approach to international time and frequency comparisons: All-in-view multi-channel GPS+GLONASS observations. *Proc. Institute of Navigation GPS97*, p. 1085-1091.
- LICHTEN S. and BORDER J. [1987] Strategies for high precision GPS orbit determination. *J. Geophys. Res.*, **92**, 1987, p. 12751-12762.
- MADER G. L. [1998] GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey. *GPS Solutions*, **3**(1), p. 50-58.
- MADER G. L. and CZOPEK F. [2002] Calibrating antenna phase centers. *GPS World*, **13**(5), p. 40-46.
- MCCARTHY D.D. and PETIT G. [2003] IERS Conventions 2003, IERS Technical Note 32, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2003.
- OVERNEY F., SCHILDKNECHT Th., BEUTLER G., PROST L. and FELLER U. [1997] GPS Time transfer using geodetic receivers: Middle-term stability and temperature dependence of the signal delays. *Proc. 11th European Frequency and Time Forum*, p. 504-508.
- PETIT G. and JIANG Z. [28 May 2004 and 16 July 2004] Study of time transfer methods: II. TWSTT vs. geodetic clock comparisons, internal BIPM reports.
- PETIT G., JIANG Z., MOUSSAY P., WHITE J., POWERS E., DUDLE G. and UHRICH P. [2001] Progresses in the calibration of “geodetic like” GPS receivers for accurate time comparisons. *Proc. 15th European Frequency and Time Forum*, p. 164-166.
- PETIT G., JIANG Z., TARIS T., UHRICH P., BARILLET R. and HAMOUDA F. [1999] Processing strategies for accurate frequency comparison using GPS carrier phase. *Proc. 1999 Joint European Frequency and Time Forum and 1999 IEEE International Frequency Control Symposium*, p. 235-238.
- PETIT G., JIANG Z., UHRICH P. and TARIS F. [2000] Differential calibration of Ashtech Z12-T receivers for accurate time comparisons. *Proc. 14th European Frequency and Time Forum*, p. 40-44.
- PETIT G., JIANG Z., WHITE Z., J., BEARD R. and POWERS E. [2001] Absolute calibration of an Ashtech Z12-T GPS receiver. *GPS Solutions*, **4**(4), p. 41-46.
- PETIT G., THOMAS C., JIANG Z., UHRICH P. and TARIS F. [1998] Use of GPS Ashtech Z12T receivers for accurate time and frequency comparisons. *Proc. 1998 IEEE International Frequency Control Symposium*, p. 306-314.
- PLUMB J. and LARSON K. [2005] Long-Term Comparisons Between Two-Way Satellite and Geodetic Time Transfer Systems. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **52**(11), p. 1912-1918.
- PLUMB J., LARSON K., WHITE J. and POWERS E. [2005] Absolute Calibration of a Geodetic Time Transfer System. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **52**(11), p. 1904-1911.
- RAY J. R., DRAGERT H. and KOUBA J. [2000] Recommendations for handling non-Rogue data. *IGS 1999 Technical Reports*, Jet Propulsion Laboratory Publication, Pasadena, California, p. 445-451.

- RAY J. R. and SENIOR K. [2001] Temperature sensitivity of timing measurements using Dorne Margolin antennas. *GPS Solutions*, **5**(1), p. 24-30.
- RAY J. R. and SENIOR K. [2003] IGS/BIPM Pilot Project: GPS carrier phase for time/frequency transfer and time scale formation. *Metrologia*, **40**(3), p. S270-S288.
- RIECK C., JARLEMARK P., JALDEHAG K. and JOHANSSON J. [2003] Thermal influence on the receiver chain of GPS carrier phase equipment for time and frequency transfer. *Proc. 2003 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum*, p. 326-331.
- SCHILDKNECHT Th. and DUDLE G. [2000] Time and frequency transfer: High precision using GPS phase measurements. *GPS World*, 2000 **11**(2), 2000, p. 48-52.
- SCHMID R. and ROTHACHER M. [2003] Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites. *J. Geodesy*, **77**, doi: 10.1007/s00190-003-0339-0, p. 440-446.
- SCHUPLER B.R., ALLSHOUSE R.L. and CLARK T.A. [1994] Signal characteristics of GPS user antennas. *J. Inst. Navigation*, **41**, p. 277-295.
- SCHUPLER B.R. and CLARK T.A. [2001] Characterizing the behavior of geodetic GPS antennas. *GPS World*, **12**(2), p. 48-55.
- SENIOR K., KOPPANG P. and RAY J. [2003] Developing an IGS time scale, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, **50**(6), p. 585-593.
- SENIOR K., MATSAKIS D. and POWERS E. [1999] Attenuating day-boundary discontinuities in GPS carrier-phase time transfer. *Proc. 31st Precise Time and Time Interval Meeting*, p. 481-489.
- SENIOR K., RAY J. and PETIT G. [2004] Comparison of instrumental and empirical station timing biases for a set of Ashtech GPS receivers, *Proc. 2004 European Frequency and Time Forum*.
- THOMAS C. and AZOUBIB J. [1996] TAI computation: Study of an alternative choice for implementing an upper limit of clock weights. *Metrologia*, **33**, p. 227-240.
- WEILL, L. R. [2003] How good can it get with new signals? Multipath mitigation. *GPS World*, **14**(6), p. 106-113.
- WHITE J., BEARD R., LANDIS G., PETIT G. and POWERS E. [2001] Dual frequency absolute calibration of a geodetic GPS receiver for time transfer. *Proc. 15th European Frequency and Time Forum*, p. 167-172.
- WU J.T., WU S.C., HAJJ G.A., BERTIGER W.I. and LICHTEN S.M. [1993] Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. *Manuscripta Geodaetica*, **18**, p. 91-98.
- ZUMBERGE J.F., HEFLIN M.B., JEFFERSON D.C., WATKINS M.M. and WEBB F.H. [1997] Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. Geophys. Res.*, **102**(B3), p. 5005-5017.

ГЛАВА 14

**ДВУСТОРОННЯЯ СПУТНИКОВАЯ ПЕРЕДАЧА
СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ (TWSTFT)**

	<i>Стр.</i>
14.1 Введение.....	208
14.2 Описание метода TWSTFT.....	208
14.3 Измерения, выполняемые методом TWSTFT.....	210
14.4 Лабораторное оборудование станции	211
14.4.1 Модем с расширенным спектром сигналов.....	211
14.4.2 Счетчик интервалов времени.....	212
14.5 Измерения, зависящие от линии связи (трасса и оборудование)	212
14.5.1 Эффект Саньяка	212
14.5.2 Релятивистская поправка второго порядка к эффекту Саньяка	212
14.5.3 Разность в частотах на линии вверх и линии вниз.....	213
14.6 Методы калибровки	213
14.6.1 Калибровка станции при помощи имитатора космической среды.....	213
14.6.2 Калибровка станции при помощи транспортируемой земной станции.....	214
14.6.3 Калибровочные кампании 1993 и 1998 годов.....	214
14.6.4 Калибровочная кампания с использованием станции, работающей в диапазоне X.....	214
14.7 Проблемы, возникающие при использовании различных спутниковых ретрансляторов	215
14.8 Проблемы, возникающие при использовании различных спутниковых ретрансляторов	215
14.9 Долговременная стабильность метода TWSTFT.....	216
14.9.1 Долгосрочные процедуры сравнения методов GPS и TWSTFT	216
14.10 Заключение	217
Ссылки	218

14.1 Введение

При передаче сигналов времени одной из первоочередных задач является сравнение показаний часов и/или стандартов частоты при разнесении этих устройств на большие расстояния. Для проведения подобных процедур сравнения имеется ряд причин. Одной из причин может служить простая заинтересованность в проведении мгновенных измерений показаний удаленных друг от друга часов в целях контроля характеристик шкал времени посредством сравнения часов. Кроме того, может вызвать интерес проведение сравнений новейших стандартов частоты, в частности цезиевых источников, и/или проверка долговременной стабильности подобных стандартов. Значения прецизионности и точности, которые могут быть достигнуты при этих измерениях, являются предметом изучения в метрологии.

Метод, известный под названием TWSTFT, позволяет получить оценку разности показаний часов между двумя станциями путем активного обмена сигналами синхронизации через геостационарный спутник связи [Kirchner, 1991]. В 1989 году на 11-м заседании Консультативного комитета по определению секунды (CCDS), который сейчас называется Консультативным комитетом по времени и частоте (CCTF), была принята декларация 1989/1, в которой поощрялось использование метода TWSTFT и предлагалось создание в рамках ВРМ специальной рабочей группы по вопросам TWSTFT.

Согласно постановлению 12-го заседания CCDS, проведенного в 1993 году, специальная группа была преобразована в постоянную рабочую группу CCTF. Основными результатами деятельности рабочей группы являются:

- разработка стандартного формата;
- организация линий передачи сигналов времени TWSTFT;
- выбор модемов;
- создание графика наблюдений;
- продолжительность наблюдения;
- обмен данными;
- переговоры по использованию спутников;
- оценка линий связи TWSTFT;
- сравнение с другими методами передачи сигналов времени.

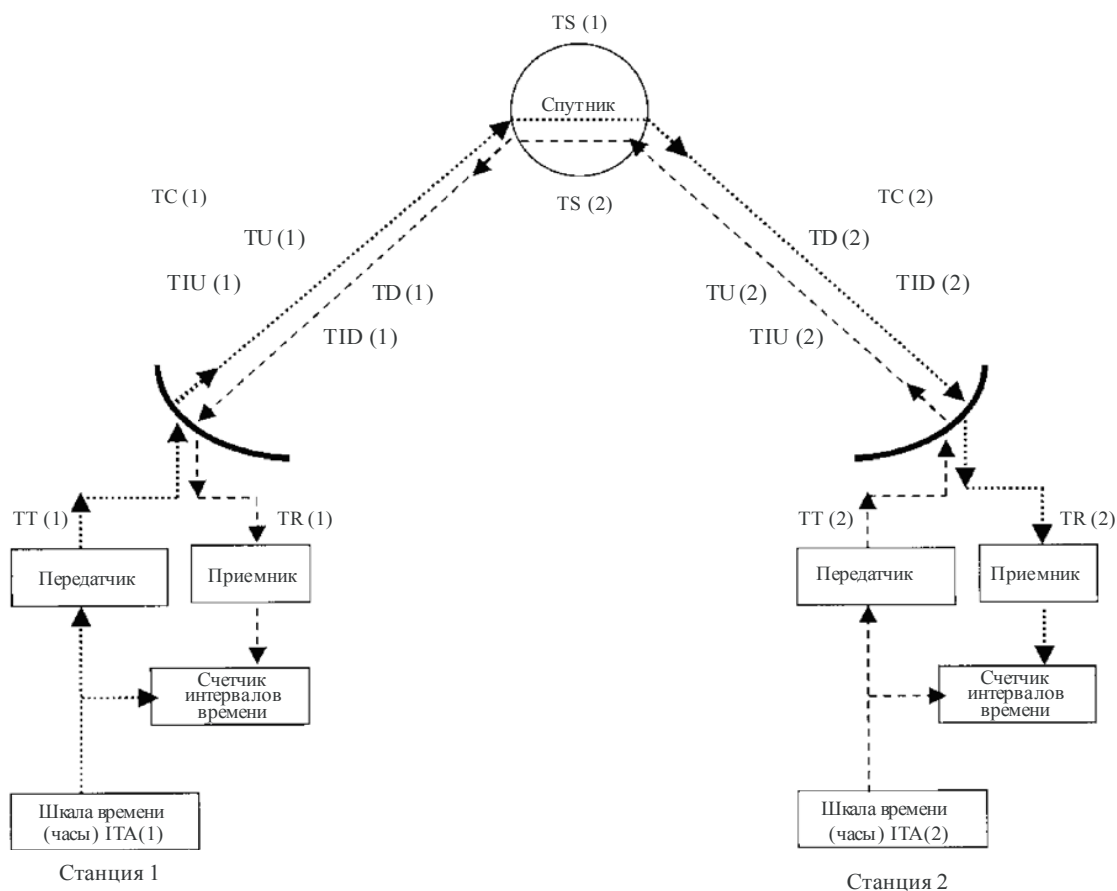
Популярность метода как средства проведения с высокой точностью сравнений между лабораториями отсчета времени постоянно растет. В настоящее время ВРМ использует информацию о часах, которые участвуют в поддержании шкалы TAI, полученной при помощи данного метода (см. 20-й отчет ВРМ по методу TWSTFT).

14.2 Описание метода TWSTFT

Для реализации метода TWSTFT лаборатории должны работать попарно (Рисунок 14-1). В обеих лабораториях должны быть установлены приемопередающие станции и модемы с расширенным спектром сигналов для обмена информацией о времени через спутники связи с использованием сигналов, кодированных псевдошумом (PN), и многостанционного доступа с кодовым разделением (CDMA). Передающая сторона при помощи модема модулирует сигналом 1 PPS (один импульс в секунду) промежуточную частоту (ПЧ) станции, как правило равную 70 МГц. Затем этот сигнал преобразуется в радиочастотный (РЧ), усиливается и передается на спутник. В спутниковом ретрансляторе сигнал усиливается, частота его сдвигается на величину частоты преобразования спутника, затем сигнал снова усиливается и передается обратно. На приемной стороне принятый РЧ-сигнал усиливается, преобразуется с понижением частоты в промежуточную, затем сигнал демодулируется при помощи модема для получения принимаемого сигнала 1 PPS. Во время этого процесса на обеих сторонах происходит одновременное измерение интервалов времени. Сигнал 1 PPS, генерируемый местными часами, запускает локальный счетчик интервалов времени, а затем, после передачи через спутник, останавливает удаленный счетчик интервалов времени.

РИСУНОК 14-1

Принцип сравнения методом двусторонней спутниковой передачи сигналов времени и частоты



Sat_time_freq-14-01

На Рисунке 14-1 приведены следующие параметры для станции 1 и станции 2 ($k = 1, 2$):

- $TA(k)$ – показания часов или шкалы времени на станции k ;
- $TI(k)$ – показания счетчика интервалов времени;
- $TT(k)$ – задержка передатчика;
- $TR(k)$ – задержка приемника;
- $T_U(k)$ – задержка при распространении в атмосфере на линии вверх;
- $T_D(k)$ – задержка при распространении в атмосфере на линии вниз;
- $TS(k)$ – задержка при распространении через спутниковый ретранслятор;
- $TC(k)$ – поправка на релятивистские эффекты;
- $T_{IU}(k)$ – ионосферная задержка на линии вверх;
- $T_{ID}(k)$ – ионосферная задержка на линии вниз.

Разность между показаниями часов, расположенных на станциях 1 и 2, определяется как

$$TA(1) - TA(2),$$

где:

TA(1) и TI(1) связаны уравнением

$$TI(1) = TA(1) - TA(2) + TT(2) + T_U(2) + TS(2) + T_D(1) + TR(1) + TC(1) + TI_U(1) + TI_D(1), \quad (14-1)$$

а TA(2) и TI(2) связаны уравнением

$$TI(2) = TA(2) - TA(1) + TT(1) + T_U(1) + TS(1) + T_D(2) + TR(2) + TC(2) + TI_U(2) + TI_D(2). \quad (14-2)$$

Разность между этими двумя выражениями составляет:

$$TI(1) - TI(2) = 2 [TA(1) - TA(2) + TT(2) - TT(1) + T_U(2) - T_U(1) + TS(2) - TS(1) + T_D(1) - T_D(2) + TR(1) - TR(2) + TC(1) - TC(2) + TI_U(1) - TI_U(2) + TI_D(1) - TI_D(2)]. \quad (14-3)$$

Это выражение может быть переписано следующим образом:

$$TA(1) - TA(2) = \frac{1}{2} [TI(1) - TI(2) + TT(1) - TT(2) + T_U(1) - T_U(2) + TS(1) - TS(2) + T_D(2) - T_D(1) + TR(2) - TR(1) + TC(2) - TC(1) + TI_U(1) - TI_U(2) + TI_D(1) - TI_D(2)]. \quad (14-4)$$

Если сигналы проходят через один и тот же спутниковый ретранслятор, то задержка TS(1) равна TS(2), и эти задержки взаимно погашаются. Если спутник движется не очень быстро, то задержка T_U(1) равна T_D(1), а задержка T_U(2) равна T_D(2) и эти задержки взаимно погашаются. Поправки TC(1) и TC(2) могут быть рассчитаны, но с погрешностью определения координат станций. Если станции расположены близко друг к другу, то TI_U(1) = TI_U(2), а TI_D(1) = TI_D(2).

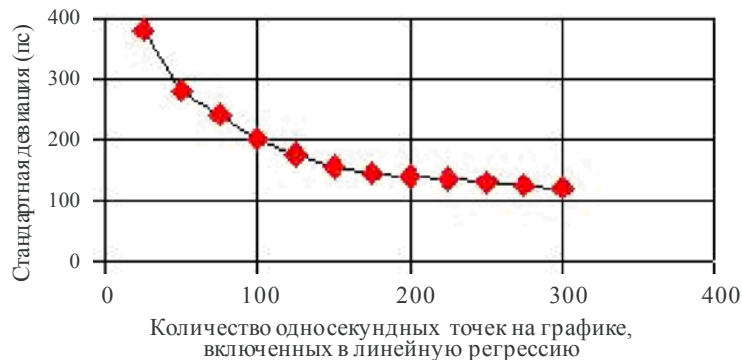
14.3 Измерения, выполняемые методом TWSTFT

Основным видом измерений, выполняемых методом TWSTFT, является оценка разности между показаниями двух часов. Можно рассчитать стандартное отклонение остаточных погрешностей измеренных значений разности между показаниями двух часов, полученными методом TWSTFT. Если обоснованно предположить наличие белого шума при нормальном режиме работы часов, то можно ожидать, что стандартное отклонение линейной регрессии применительно к значениям разности показаний часов асимптотически достигает предела, поскольку в регрессию включается бóльший объем измеренных данных.

На Рисунке 14-2 показано стандартное отклонение как функция количества односекундных точек на графике, включенных в интервал аппроксимации кривой [Klepczynski, 1995]. Примерно через 300 с наблюдения достигается предел, приблизительно равный 125 пс.

РИСУНОК 14-2

**Стандартное отклонение остаточных погрешностей
относительно линейной аппроксимации значений разности показаний часов,
полученных методом TWSTFT**



Sat_time_freq-14-02

14.4 Лабораторное оборудование станции

Было проведено множество исследований, касающихся погрешностей оборудования TWSTFT, используемого на наземных станциях. Отчет о результатах этих исследований представлен Кирхнером [Kirchner, 1999]. В данном случае основными источниками погрешностей являются:

- модем с расширенным спектром сигналов, используемый для формирования сигнала 1 PPS, который передается одной станцией и принимается другой;
- счетчик интервалов времени, используемый для измерения разности между показаниями местных часов и тактовым импульсом, который восстанавливается модемом с расширенным спектром сигналов;
- погрешность, вызванная отклонениями в отношении мощности несущей к плотности шума (C/N_0) в используемом модеме с расширенным спектром сигналов.

14.4.1 Модем с расширенным спектром сигналов

Первым серийно выпускаемым модемом с расширенным спектром сигналов стала модель MITREX, специально разработанная для измерения дальности и передачи сигналов времени из пункта в пункт с высокой прецизионностью и точностью при помощи геостационарного спутника связи [Hartl *et al.*, 1983]. В этом модеме используется так называемый метод прямой последовательности или метод PN. Модуляция несущей выполняется методом двоичной фазовой манипуляции (BPSK). Разрешающая способность системы, использующей коды PN, зависит от длины элемента (chip length) кода, а требуемая полоса пропускания задается обратной величиной – частотой следования элементов сигнала (f_c). Используя коды с малой взаимной корреляцией, можно передавать несколько таких кодов по одному и тому же каналу (CDMA), при этом они не будут создавать друг другу помех. В модеме MITREX используется частота следования элементов сигнала, равная 2,5 МГц. В зависимости от используемой фильтрации сигнала и конкретной спутниковой службы для его работы необходим спутниковый канал с пропускной способностью, равной обычно 3,5 МГц [Veenstra, 1990].

В настоящее время серийно выпускаются два типа модемов: модем ATLANTIS производства компании Allen Osborne Associates, США, и модем SATRE производства компании Time Tech GmbH, Германия. Модем SATRE полностью совместим с модемом MITREX, а модем ATLANTIS использует собственный стандарт (небольшие отличия в частоте следования элементов сигнала, а также другие коды) и не совместим с другими моделями. Модем, разработанный в Научно-исследовательской лаборатории связи (CRL), Япония, не совместим с модемом MITREX.

14.4.2 Счетчик интервалов времени

Также нормальной практикой является применение на станциях внешнего счетчика в тех случаях, когда используется модем, обладающий функцией внутреннего измерения интервалов времени. Для проведения сопутствующих измерений необходим, как правило, внешний счетчик.

14.4.2.1 Отношение мощности несущей к плотности шума (C/N_0)

Что касается станций TWSTFT, то эксплуатационные параметры конкретной станции определяются отношением мощности несущей к плотности шума (C/N_0) модема и характеристиками спутника (эквивалентной изотропно излучаемой мощностью (ЭИИМ) и добротностью (G/T) спутникового оконечного устройства). Последние параметры рассчитываются на основе бюджета линии. Отношение мощности несущей к плотности шума, C/N_0 , необходимо для получения требуемой прецизионности измерения.

14.5 Измерения, зависящие от линии связи (трасса и оборудование)

В данном случае основными источниками погрешностей являются:

- эффект, вызванный движением участвующих станций и конкретного спутника вокруг оси вращения Земли в процессе распространения сигнала к спутнику и от спутника (эффект Саньяка);
- эффект, вызванный перемещением геостационарного спутника относительно поверхности Земли;
- эффект, вызванный разностью в задержке сигнала в ионосфере на частотах линии вверх и линии вниз, используемых для передачи сигналов пользователем и спутником.

14.5.1 Эффект Саньяка

Эффект Саньяка возникает вследствие движения земных станций и спутника вокруг оси вращения Земли в процессе распространения сигнала к спутнику и от спутника [Ashby and Allan, 1979]. Он пропорционален экваториальной проекции площади четырехугольника, вершинами которого являются центр Земли и точки расположения станций на поверхности Земли, а также положению спутника относительно поверхности Земли. Таким образом, эта величина является функцией местоположений станций 1 и 2 и спутника. Предельное значение применительно к данному эффекту составляет порядка 420 нс для станций 1 и 2 на экваторе, угол места каждой из которых равен 6° и обусловлен максимальным разнесением по долготе (около 150°). Для расчета эффекта Саньяка требуемая точность определения местоположения на несколько порядков величины меньше точности, которая необходима для расчета задержки сигнала при использовании методов односторонней связи, например GPS. Оценочные значения погрешности, возникающей вследствие ошибок в определении координат станций, для эффекта Саньяка между TUG и USNO равны 150 пс, а между TUG и OCA – 16 пс.

14.5.2 Релятивистская поправка второго порядка к эффекту Саньяка

Поправка второго порядка, связанная с перемещением спутника относительно поверхности Земли, является функцией скорости спутника и значений угла места спутника относительно станций 1 и 2 [Petit and Wolf, 1993]. Крайний случай – если угол места одной станции равен 6° , а другой – 90° . Разность в значениях времени прихода (TOA) одновременно передаваемых сигналов на спутнике составит в таком случае 17 мс. Если предположить, что радиальная скорость спутника достаточно высока и равна 3 м/с, полученная ошибка составит около 170 пс. Данный эффект может быть сведен к минимуму путем выбора спутника, который наблюдается обеими станциями под одинаковым углом места. Сдвиг времени передачи позволит устранить этот эффект полностью. Оценочные значения воздействий для экспериментов, проводимых между Военно-морской обсерваторией США (USNO) и Техническим университетом Граца (TUG), составили порядка 100 пс. Для измерений между обсерваторией Observatoire de la Cote d'Azur (OCA) и Техническим университетом Граца (TUG) эти значения составили порядка 10 пс.

14.5.3 Разность в частотах на линии вверх и линии вниз

Избыточная ионосферная задержка сигнала, проникающего в ионосферу, зависит от частоты (пропорциональна $1/f^2$), полного электронного содержания (ТЕС) и угла места [Flock *et al.*, 1982; Jespersen, 1989]. ТЕС – это полное электронное содержание в вертикальном столбе с площадью поперечного сечения, равной 1 м^2 , измеряемое в электронах на квадратный метр. Используя функцию преобразования, можно рассчитать полное электронное содержание вдоль наклонной трассы. Погрешность, связанная с ионосферой, является функцией частоты на линиях вверх и линиях вниз станций 1 и 2, значений ТЕС для станций 1 и 2 и углов места станций 1 и 2. Необратимая погрешность равна примерно 150 пс в предельном случае, т. е.

- если угол места одного спутника равен 90° , а угол места другого – 6° ;
- если значения частоты на линиях вверх и линиях вниз равны 14 ГГц и 12 ГГц, а также 14 ГГц и 11 ГГц;
- если значения ТЕС равны 10^{17} электронов/ м^2 и 10^{18} электронов/ м^2 (в предположении, что эти показатели приведены для одной станции при работе в ночное время, а для другой – в дневное).

Для частот в диапазоне С (6/4 ГГц) воздействие, безусловно, значительно сильнее. Это воздействие может быть минимизировано путем выбора спутника, для которого оба угла места примерно равны при условии равенства значений ТЕС и частот на линиях вверх и линиях вниз для обеих станций, либо путем использования более высоких частот (диапазон Ка: 30/20 ГГц).

Влиянием тропосферной задержки в данном случае пренебрегают. На частотах, используемых для спутниковой связи, эта величина является частотно-независимой (и ничтожно малой).

14.6 Методы калибровки

Некоторые погрешности не поддаются статистическому измерению или оценке. Их оценка должна производиться при помощи процесса, который называется *калибровкой*. В ряде случаев это означает измерение задержек при прохождении сигнала через отдельные компоненты системы, используемые для проведения измерений или измерения задержки при прохождении через всю систему. Кроме того, калибровка может производиться путем транспортировки системы, которая проявила себя достаточно стабильной, либо системы, которая была откалибрована. Этот процесс иногда называется относительной калибровкой. В ряде случаев может даже производиться сравнение с совершенно другой системой.

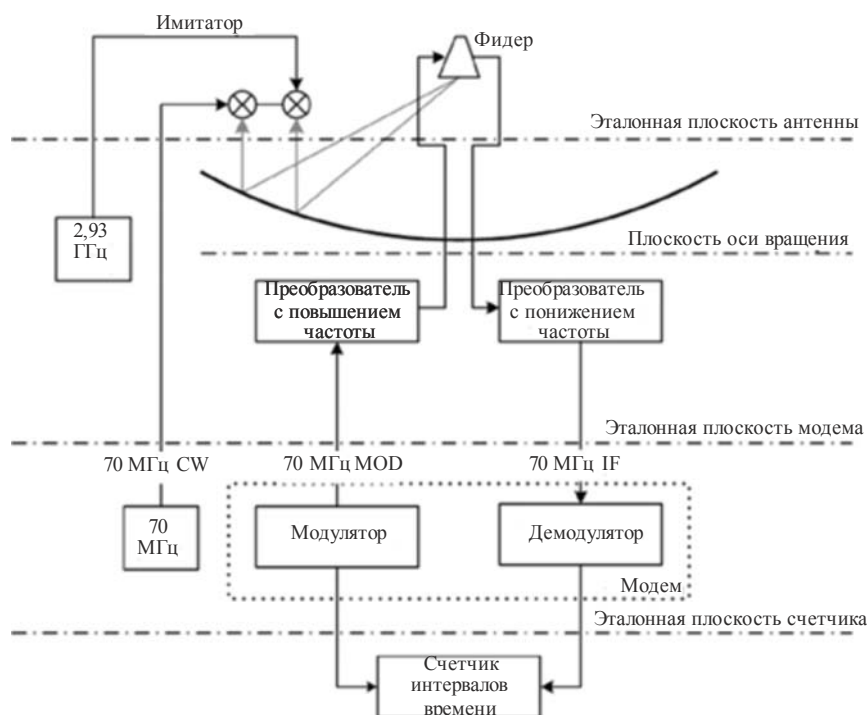
14.6.1 Калибровка станции при помощи имитатора космической среды

В то время как могут быть измерены значения задержки, вызванной некоторыми отдельными компонентами системы, суммарная погрешность системы не может быть оценена напрямую из-за сложных трасс, по которым могут проходить сигналы. Эта задача может быть решена двумя методами. Можно измерить либо разность значений задержки станций 1 и 2, либо задержки обеих станций по отдельности.

При использовании первого метода задержки при прохождении через отдельные компоненты системы создаются путем пропускания сигнала через имитатор космической среды, характеристики которого точно задокументированы [De Jong and Polderman, 1994; De Jong and Van Bemmelen, 2001]. Система калибровки автоматизирована, а одна из измерительных кампаний проводилась с использованием спутникового терминала Fly-Away (FAST) [De Jong *et al.*, 1995]. Подобный имитатор космической среды также может использоваться для постоянного измерения отклонений в уровнях задержки, обеспечивая долгосрочную стабильность станции. На Рисунке 14-3 приведено схематическое изображение имитатора космической среды VSL, используемого для выполнения подобных измерений.

РИСУНОК 14-3

Схематическое изображение имитатора космической среды VSL для измерения задержек при прохождении через земную станцию системы TWSTFT



Sat_time_freq-14-03

14.6.2 Калибровка станции при помощи транспортируемой земной станции

Второй метод может быть реализован путем размещения земной станции на двух участвующих станциях либо путем использования третьей станции в качестве стандарта передачи сигналов. В 1993 и 1998 годах были проведены измерительные кампании с использованием данного метода.

14.6.3 Калибровочные кампании 1993 и 1998 годов

Во время первой кампании станция TWSTFT перевозилась между обсерваторией Observatoire de Cote d'Azur, Грасс, Франция (OCA), и Техническим университетом Граца, Австрия (TUG), расстояние между которыми составляет 800 км [Kirchner *et al.*, 1993]. Формальные стандартные отклонения результатов измерений, сделанных в ходе выездной сессии, составили около 1 нс. Были обсуждены пути улучшения данного эксперимента, а затем проведена вторая кампания [Kirchner *et al.*, 1998]. Во время второй кампании формальные стандартные отклонения составили порядка 200 пс, что означало существенное улучшение результатов по сравнению с первым экспериментом. Во время обеих кампаний проводились сравнения с методом одновременного наблюдения GPS и были отмечены систематические различия между двумя методами. В обоих методах внешней калибровки измерения должны проводиться на постоянной основе. Это позволит собрать статистическую хронологию данных, касающихся погрешностей.

14.6.4 Калибровочная кампания с использованием станции, работающей в диапазоне X

Эксперимент, в котором использовалась транспортируемая станция, работающая в диапазоне X, был проведен между Военно-морской обсерваторией США (USNO), Вашингтон, и Национальной физической лабораторией (NPL), Теддингтон, Англия.

14.7 Проблемы, возникающие при использовании различных спутниковых ретрансляторов

Если только измерения значений задержки при прохождении сигнала через различные ретрансляторы спутника не были выполнены до запуска спутника, то оценить значения погрешности при наличии задержек крайне затруднительно. Это можно выполнить только при помощи относительной калибровки путем транспортировки откалиброванной системы на участвующие станции. Подобные измерения следует повторять как можно чаще. Кроме того, они должны проводиться с использованием различных независимых методов, что позволит наилучшим образом проверить результаты, полученные при помощи других методов. Основная проблема в данном случае заключается в том, что методы, используемые для проверки других методов, могут не обладать такой же погрешностью, как основной метод. При оценке погрешности подобным образом необходимо проявлять особую осторожность.

Независимая откалиброванная система также может представлять собой систему TWSTFT, если для нее не существует проблемы, связанной с отсутствием данных о дифференциальных спутниковых задержках. При наличии данных о дифференциальных спутниковых задержках (например, на основе результатов измерений, проведенных перед запуском спутника) можно использовать методы, приведенные в предыдущем разделе для калибровки значений задержки станций.

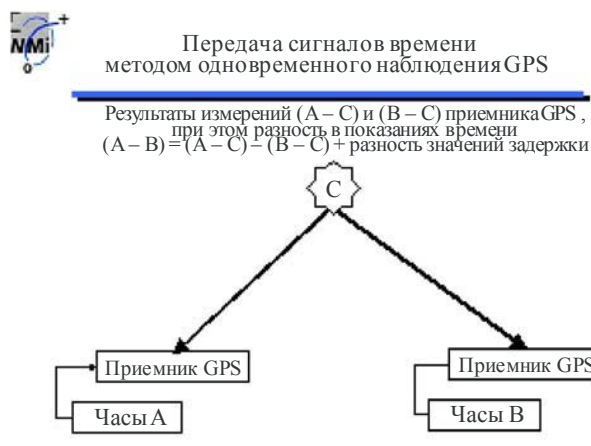
14.8 Проблемы, возникающие при использовании различных спутниковых ретрансляторов

Помимо двух систем, упомянутых ранее, могут использоваться другие методы, такие как GPS. Безусловно, полученная точность не может быть выше точности самого метода GPS.

Структура системы измерительной установки для метода CV GPS показана на Рисунке 14-4. Сигналы навигационных спутников (С) принимаются приемниками и измеряются относительно шкал времени часов А и часов В, расположенных в точках А и В. Измеренные величины (А – С) и (В – С) вычитаются, и в результате получается разность шкал времени (А – В).

РИСУНОК 14-4

Метод одновременного наблюдения GPS



Sat_time_freq-14-04

Общие значения задержки спутника и установленных на нем часов взаимно погашаются. Однако необходимо учитывать разность значений избыточной задержки в ионосфере и в тропосфере. Задержки в антенне, антенном кабеле, кабеле часов и приемнике на каждой станции должны быть известны (откалиброваны), чтобы результат мог быть скорректирован с учетом разности значений

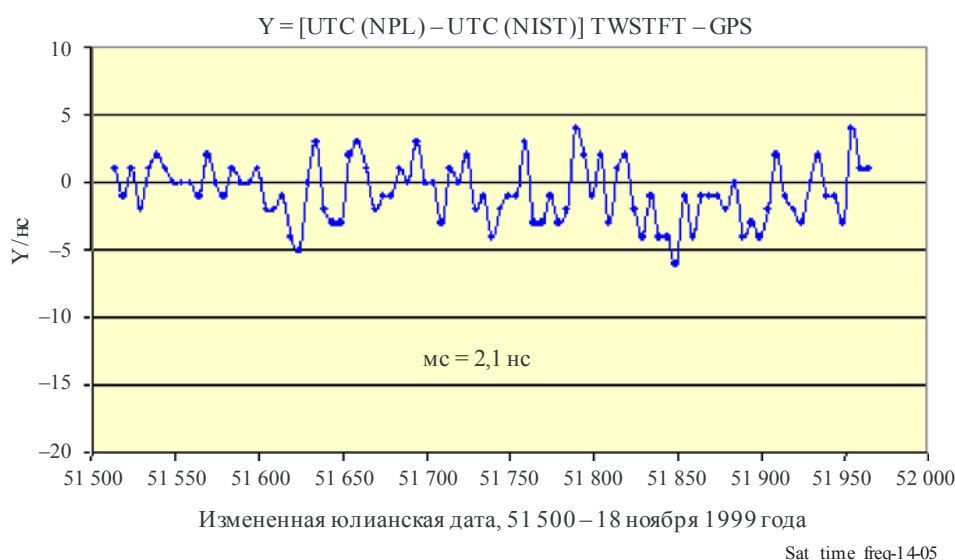
задержки в оборудовании в точках А и В. Эти задержки должны быть стабильными независимо от условий окружающей среды.

Сначала калиброванное устройство передачи сигналов времени (TTU) GPS перемещается на участвующие станции, и таким образом базовые измерения могут выполняться в начале периода калибровки относительно устройства TTU GPS, которое будет находиться на участвующих станциях в течение периода проведения оценки. Затем в течение последующих интервалов времени откалиброванный приемник вновь перемещается на участвующие станции.

На Рисунке 14-5 показаны результаты этих процедур сравнения, выполненных в течение длительных периодов времени.

РИСУНОК 14-5

Различия между методом TWSTFT и методом одновременного наблюдения GPS с использованием кода C/A для линии NPL/NIST



14.9 Долговременная стабильность метода TWSTFT

Для целей сравнения частоты величина 150 пс является, вероятно, достоверной оценкой погрешности, связанной с измерениями, проводимыми методом TWSTFT.

14.9.1 Долгосрочные процедуры сравнения методов GPS и TWSTFT

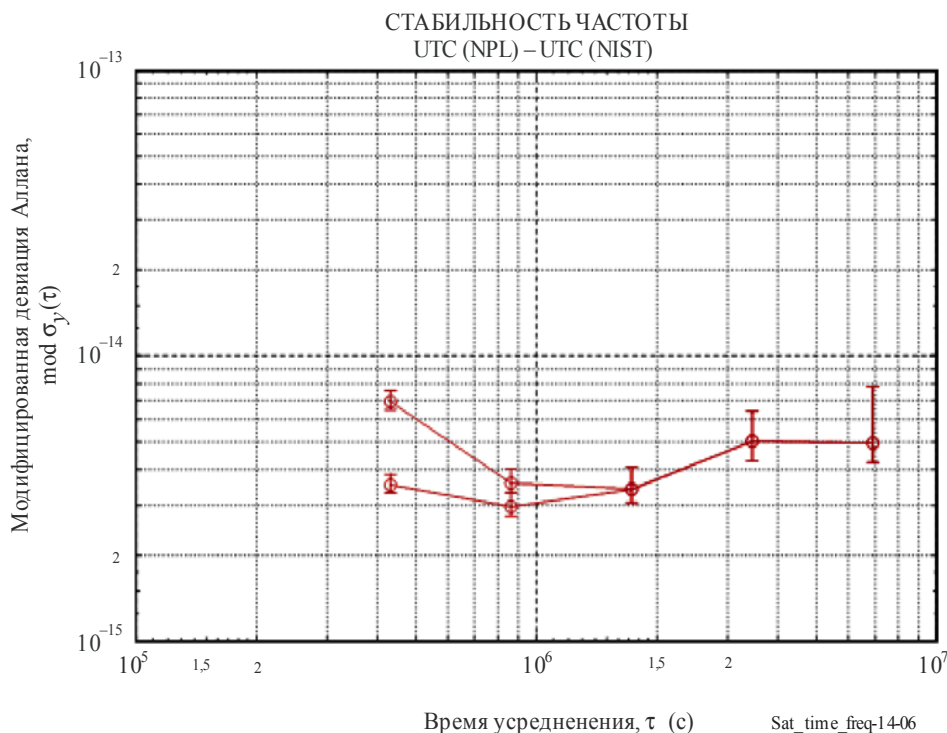
На сентябрь 2002 года в Европе, Северной Америке и Тихоокеанском регионе существовало 12 действующих линий TWSTFT. Из них 10 линий используются для формирования TAI. Все эти линии TWSTFT проходят процедуру сравнения с методом одновременного наблюдения GPS, а результаты публикуются в отчетах ВРМ по методу TWSTFT. Такой постоянный контроль предоставляет ценную информацию о долгосрочной стабильности обоих методов; некоторые из этих линий эксплуатируются уже 3 года. Типичная процедура сравнения для линии NPL/NIST длиной около 8000 км для периода измененного юлианского дня 51 510–51 970 приведена на Рисунке 14-5. Линия TWSTFT NPL/NIST была откалибрована методом GPS.

Данные TWSTFT, полученные в течение трех еженедельных сеансов – в понедельник, вторник и пятницу, – подверглись линейной интерполяции для дат по стандартам TAI (измененный юлианский день, заканчивающийся на 4 и 9). Данные по методу одновременного наблюдения GPS были рассчитаны при помощи точных эфемерид IGS и ионосферных карт IGS, которые прошли процедуры сглаживания и интерполяции для стандартных дат. В течение периода сравнения каких-либо отклонений или сезонных воздействий не наблюдалось. Среднеквадратическое значение разности между двумя методами на период сравнения составляет 2,1 нс.

Оценочное значение погрешности линии TWSTFT составляет менее 1 нс, а линии GPS – 2,5 нс. Именно поэтому считается, что большая часть шума, наблюдаемого в значениях разности между двумя методами, относится к методу одновременного наблюдения GPS. Это подтверждается анализом стабильности частоты [UTC (NPL) – UTC (NIST)], приведенным на Рисунке 14-6.

РИСУНОК 14-6

Модифицированная девиация Аллана отображает стабильность частоты двух методов – одновременного наблюдения GPS (верхняя кривая) и TWSTFT (нижняя кривая)



Результаты метода одновременного наблюдения GPS демонстрируют наличие белого фазового шума, обусловленного методом сравнения, вплоть до периодов усреднения, равных 20 дням. Результаты метода TWSTFT демонстрируют наличие белого частотного шума, характерного в работе часов уже для периодов времени усреднения, равных 5 дням. Это означает, что для периодов усреднения, равных 5 дням, не существует шума, присущего методу TWSTFT. Другими словами, двое часов, расположенных на станциях NPL и NIST, находящихся на расстоянии 8000 км, могут сравниваться методом TWSTFT без наличия шума, присущего передаче сигналов времени, для периодов усреднения, равных 5 дням. Данные метода GPS отображают шум, присущий данному методу. Метод TWSTFT отображает шум часов.

14.10 Заключение

Полученные результаты позволяют считать, что метод TWSTFT может использоваться в качестве метода, обладающего высокой прецизионностью (точностью) при сравнении показаний часов и частоты. Несмотря на то что первоначальные расходы при развертывании метода TWSTFT были достаточно велики, простота обработки данных делает его привлекательной альтернативой другим методам. Поскольку возможности данного метода в настоящее время расширяются, включая эксперименты с отслеживанием фазы несущей, то в будущем можно ожидать появления новых улучшенных характеристик метода TWSTFT.

ССЫЛКИ

- ASHBY N. and ALLAN D.W. [1979] Practical Implications of Relativity for a Global Coordinate Time Scale. *Radio Science*, **14**, p. 649-669.
- 20th BIPM TWSTFT Report (http://www.bipm.fr/pdf/cctf/wg_twstft.html).
- De JONG G. *et al.* [1995] Results of the Calibration of the Delays of Earth Stations for TWSTFT using the VSL Satellite Simulator Method. *Proceedings of the 27th Annual PTI Meeting*, p. 359-372.
- De JONG G. and POLDERMAN M.C. [1994] Automated Delay Measurement System for an Earth Station for Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer. *Proceedings of the 26th Annual PTI Meeting*, December 6-8, Reston, Virginia, USA, p. 305-317.
- De JONG G. and VAN BEMMELEN R. [2001] Evaluation and Improvement of the Calibration of a TWSTFT Station Using SATSIM. *Proceedings of the 33rd Annual PTI Meeting*, p. 256-262.
- FLOCK W.L., SLOBIN, S.D. and SMITH, E. K. [1982] Propagation effects on radio range and noise in earth-space telecommunications. *Radio Science*, **17**, No. 6, 1982, p. 1411.
- HARTL Ph., GIESCHEN N., MOSSNER K.M., SCHAFFERW. and WENDE C.M. [1983] High Accuracy Global Time Transfer via Geosynchronous Telecommunication Satellites with MITREX. *Journal of Flight Sciences and Space Research*, **7**, p. 335-342.
- JESPERSEN J. [May 31-June 2, 1989] Impact of Atmospheric Non-reciprocity on Satellite Two-Way Time Transfers. *Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control*, Denver, Colorado, USA, p. 186-192.
- KIRCHNER D. [1991] Two-Way Time Transfer via Communication Satellites, *Proceedings of the IEEE (Special Issue on Time and Frequency)*, **79**, p. 186-192.
- KIRCHNER D., RESSLER H., GRUDLER P., BAUMONT F., VEILLET Ch., LEWANDOWSKI W., HANSON W., KLEPCZYNSKI W. and UHRICH P. [1993] Comparison of GPS Common-View and Two-Way Satellite Time Transfer over a Baseline of 800 km.
- KIRCHNER D., RESSLER H., HETZEL P., SORING A. and LEWANDOWSKI W. [1998] Calibration of Three European TWSTFT Stations using a Portable Station and Comparison of TWSTFT and GPS Common-View Measurement Results. *Proceedings of the 30th PTI Meeting*, p. 365-375.
- KIRCHNER D. [1999] Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT): Principle, Implementation and Current Performance. *Review of Radio Science 1996-1999*, Oxford University Press.
- KLEPCZYNSKI W. [1995] Two Way Satellite Time Transfer, Tutorial at PTI Meeting.
- PETIT G. and WOLF P. [1993] Relativistic Theory for Picosecond Time Transfer in the Vicinity of the Earth. *Proceedings of the 25th Annual PTI Meeting*, p. 205-214.
- VEENSTRA L. B. [1990] International Two-Way Satellite Time Transfers Using INTELSAT Space Segments and Small Earth Stations. *Proceedings of the 22nd Annual PTI Meeting*, December 4-6, 1990, Vienna, Virginia, USA, p. 383-398.

ГЛАВА 15

**КРАТКИЙ ОБЗОР РАСПРОСТРАНЕНИЯ
СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ**

Сигналы времени и частоты могут передаваться при помощи нескольких методов, выбор которых зависит от требуемой точности. Основным средством точной передачи сигналов времени является система глобального определения местоположения (GPS). GPS использует группировку спутников, на каждом из которых установлены атомные часы. Атомные часы на борту космических аппаратов в совокупности с цезиевыми стандартами станций слежения формируют время GPS – время синхронизации системы. Применение системы GPS для распространения сигналов времени и частоты зависит от стабильности и прецизионности времени GPS, используемого для определения местоположения. Для одновременного пассивного приема сигналов нескольких спутников GPS необходима точная синхронизация спутников с погрешностью, меньшей, чем ожидаемая при измерении псевдодальности отдельного спутника с помощью пользовательского приемника. Стабильность часов отдельного спутника в промежутках между обновлениями или повторной синхронизацией с временем GPS определяет погрешность синхронизации системы. Другими факторами, определяющими точность пассивной передачи сигналов времени пользователям, являются: распространение сигналов GPS, приемное оборудование, погрешность местоположения пользователя и корректирующее сообщение спутника UTC (USNO). Существует два вида передачи сигналов времени при помощи GPS:

- 1) пассивная передача сигналов времени, используемая преимущественно пользователями радиосвязи;
- 2) передача сигналов времени методом одновременного наблюдения, в том числе с использованием фазы несущей, применяемая в научных и международных работах, связанных со шкалами времени.

Пассивный метод передачи сигналов времени является основным для подавляющего большинства пользователей. Поскольку GPS является пассивной службой, то ее передачи в вещательном режиме доступны на обширной территории независимо от местоположения пользователя, принимающего сигнал. Информация о синхронизации определяется наряду с местоположением и скоростью в расчетах, выполняемых пользователем во время полета или других процедур, связанных с перемещением. Следовательно, оценочные значения точности при передаче сигналов времени зависят от погрешности определения местоположения пользователя в процессе навигации. Для фиксированных станций, местоположение которых точно известно, можно ожидать практически оптимальных результатов – менее чем 10 нс, 1 σ . Эффективное применение этой возможности в мобильных платформах зависит от оборудования пользователя и возможности использования точной информации о синхронизации.

Для передачи сигналов времени при помощи GPS между мировыми центрами отсчета времени и научно-исследовательскими организациями применяется другой метод, известный под названием метода одновременного наблюдения, а также его вариант с использованием фазы несущей. В методе одновременного наблюдения используется технология передачи из пункта в пункт вместо широковещательной передачи, применяемой в методе пассивного приема, описанном выше. Две станции, которым необходима передача сигналов времени, обмениваются результатами измерений, полученными от отдельных спутников GPS. Результатом вычисления разностей данных слежения является точное сравнение показаний местных часов на двух станциях. Измерения фазы несущей увеличивают точность измерения дальности или расстояния между приемником и отдельным спутником. Повышенная точность является результатом измерения неоднозначной фазы несущей РЧ, а не однозначной модуляции кодом PRN. Неоднозначность непрерывного сигнала РЧ дает точный результат измерения частоты, а не измерения времени. Разработку методов использования в работе фазы несущей GPS выполняет Международная служба ГНСС (IGS). Участвующим станциям и аналитическим центрам IGS удалось провести процедуры сравнения частоты в пределах сети станций с прецизионностью менее наносекунды. На сегодняшний день результаты показывают, что для достижения максимальных возможностей данного метода необходимо разработать технологию калибровки приемных систем на уровне пикосекунд. В лаборатории NRL ведется разработка методов калибровки геодезических систем при помощи системных имитаторов GPS. Этот метод, обеспечивающий полный контроль над всеми условиями приема сигналов, предлагает

потенциальную возможность абсолютной калибровки для определения параметров передачи сигналов временных эпох.

Из распространенных методов передачи сигналов времени наиболее точным является метод TWSTFT. Этот метод использует двустороннюю связь – способность спутников связи передавать сигналы отсчета времени в обоих направлениях, что позволяет практически исключить задержки при передаче и общие задержки оборудования между участвующими станциями. Данный метод передачи от пункта к пункту используется главным образом между специально оборудованными центрами отсчета времени. Прецизионность отдельного измерения для одной двусторонней передачи равна примерно 10 пс. Суммарная точность зависит от невзаимных задержек в оборудовании и спутниковом ретрансляторе, а также от возможного перемещения спутника в процессе передачи. Значения точности передачи сигналов времени 100 пс теоретически возможны в том случае, если невзаимные ошибки могут быть значительно уменьшены.

Методы, рассмотренные выше, являются системами прямой передачи сигналов времени. Некоторые из них, такие как метод TWSTFT, были специально разработаны для передачи сигналов времени, а такие, как метод GPS, используют синхронизацию по времени в качестве основного рабочего инструмента. Другие локальные системы связи, которым необходима синхронизация для протоколов связи CDMA или TDMA и передачи данных, потенциально могут использоваться для распространения в локальной зоне обслуживания информации о синхронизации, полученной при помощи GPS или из других источников, в качестве альтернативного механизма передачи сигналов времени.

Сводная информация о характеристиках различных методов приведена ниже, в Таблицах 15-1 и 15-2. Эти данные представляют собой общий обзор методов и технологий, рассмотренных в настоящем Справочнике.

ТАБЛИЦА 15-1
Методы передачи сигналов времени при помощи ГНСС

Параметр	Пассивный метод GPS (SPS)	Пассивный метод GPS (PPS)	Метод одновременного наблюдения (короткая база)	Метод одновременного наблюдения (длинная база)	Усовершенствованный метод одновременного наблюдения	Фаза несущей	WAAS/GPS
Прецизионность (нс) г.м.с. (диапазон)	≤8 нс ^{(1), (2)} относительно UTC (USNO)	≤8 нс относительно UTC (USNO)	3–8 нс (пункт–пункт)	5–10 нс (пункт–пункт)	≤5 нс (пункт–пункт)	≤5–10 нс (пункт–пункт)	≤20 нс относительно UTC (USNO)
Основные источники ошибок	SA, многолучевость, часы, ионосфера, тропосфера, неиспр. ошибки (UE), PЧ, окр. среда, темп. (приемника и антенны)	Многолучевость, часы, неиспр. ошибки (UE), PЧ, окр. среда, темп. (приемника и антенны)	Неиспр. ошибки (UE), обратимость на трассе, эфемериды, окр. среда (темп.)			Неиспр. ошибки (UE), многолучевость, срывы слежения	Часы, эфемериды
Стабильность (среднее значение)	≤8 нс за 13 мин. ≈1 нс за 1 день	≤5 нс за 13 мин. ≈1 нс за 1 день	≤4 нс за 1 час ≤1 нс за 48 час	≤4 нс за 1 час ≤1 нс за 48 час	≤4 нс за 1 час ≤1 нс за 48 час	<<1 нс за 6 мин.	< Пассивная SPS
Калибруемость	3–5 нс относительно стандартного приемника					<<1 нс при абсолютной калибровке	3–5 нс относительно стандартного приемника
Периодичность выборки	1 раз в 13 мин.	1 раз в 5 мин. 1 раз в 13 мин.	1 раз в 13 мин.	≥1 раз в 13 мин. (с последующей обработкой)	1 раз в 5 мин. 1 раз в 13 мин.	Аналогично пассивным методам и методу одновременного наблюдения	TBD
Готовность	В реальном времени		По расписанию			По мере обработки	В реальном времени

(1) Фиксированное месторасположения с трехмерным положением, известным с точностью до >1 м, 3 D.

(2) Зависит от пользовательского оборудования.

TBD – подлежит определению.

ТАБЛИЦА 15-2

Методы двусторонней связи – спутниковый и наземный

Параметр	TWSTFT	Опволоконная сеть LAN – WAN	Опволоконная сеть большой протяженности	Двусторонняя связь (ОТА)
Точность (из пункта в пункт) (диапазон) (нс r.m.s.)	≈1 нс (диапазон Ku) ≈1 нс (диапазон X) ≈3 нс (диапазон C)	≤1 нс на 200 км	≤2 нс на 8 000 км	≤5 нс на 200 км
Основные источники ошибок	Взаимодействие на трассе, калибровка системы, окр. среда (темп.)	Взаимодействие на трассе Окр. среда (темп.)		Взаимодействие на трассе, калибровка системы, окр. среда (темп.)
Стабильность (значение и время усреднения)	200 пс за 1 час 100 пс за 12 час	100 пс скв	TBD	TBD
Калибруемость (уровень в нс)	≈1		≈2	≈3–5
Периодичность выборки	1 раз в 5 мин.	Непрерывный		
Охватываемый период	Почти в реальном времени			

ISBN 978-92-61-13304-7 SAP id



Отпечатано в Швейцарии
Женева, 2014 г.

Фотографии представлены: www.itu.int