|  |
| --- |
| **Рекомендация МСЭ-R TF.2018**  **(08/2012)** |
| **Релятивистская передача сигналов времени вблизи Земли и  в Солнечной системе** |
| **Серия TF**  **Передача сигналов времени и эталонных частот** |

**Предисловие**

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.

**Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)**

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-Т/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Приложении 1 к Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-Т/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

|  |  |
| --- | --- |
| **Серии Рекомендаций МСЭ-R**  (Представлены также в онлайновой форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>.) | |
| **Серия** | **Название** |
| **BO** | Спутниковое радиовещание |
| **BR** | Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения |
| **BS** | Радиовещательная служба (звуковая) |
| **BT** | Радиовещательная служба (телевизионная) |
| **F** | Фиксированная служба |
| **M** | Подвижная спутниковая служба, спутниковая служба радиоопределения, любительская спутниковая служба и относящиеся к ним спутниковые службы |
| **P** | Распространение радиоволн |
| **RA** | Радиоастрономия |
| **RS** | Системы дистанционного зондирования |
| **S** | Фиксированная спутниковая служба |
| **SA** | Космические применения и метеорология |
| **SF** | Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы |
| **SM** | Управление использованием спектра |
| **SNG** | Спутниковый сбор новостей |
| **TF** | **Передача сигналов времени и эталонных частот** |
| **V** | Словарь и связанные с ним вопросы |

|  |
| --- |
| ***Примечание****. – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.* |

*Электронная публикация*Женева, 2013 г.

© ITU 2013

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R TF.2018

Релятивистская передача сигналов времени вблизи Земли   
и в Солнечной системе

(2012)

Сфера применения

Цель настоящей Рекомендации заключается в том, чтобы установить общие типовые алгоритмы и процедуры, которые должны использоваться при сравнении значений времени, зарегистрированных на поверхности Земли и на платформах, расположенных далеко от Земли, но в пределах Солнечной системы. Эти выражения четко определены в общей теории относительности, принятой в настоящее время для формирования основы опорных пространственно-временных систем. Предполагается, что эти алгоритмы и процедуры были бы полезны для сравнения значений времени на спутниках Земли, межпланетных космических аппаратах и на поверхности тел Солнечной системы.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

a) что желательно обеспечить координацию стандартного времени и стандартной частоты на платформах, работающих вблизи Земли и в Солнечной системе;

b) что для удовлетворения будущих потребностей хранения времени, навигации, науки и систем связи требуются точные средства передачи сигналов времени и частоты вблизи Земли и в Солнечной системе;

c) что часы, вследствие их движения и влияния гравитационного потенциала, в котором они работают, подвержены колебаниям времени и частоты, зависящим от траектории;

d) что следует четко изложить концептуальные основы передачи сигналов времени и частоты;

e) что в процедурах передачи сигналов времени и частоты вблизи Земли, а также на небесные тела и космические аппараты в Солнечной системе требуется использовать математические алгоритмы, учитывающие релятивистские эффекты;

f) что требования по прецизионности и точности для передачи сигналов времени и частоты вблизи Земли и в Солнечной системе зависят от конкретного применения,

рекомендует,

чтобы в надлежащих случаях использовались приведенные в Приложении 1 математические алгоритмы, учитывающие релятивистские эффекты при передаче сигналов времени и частоты.

Приложение 1

Задача

Цель настоящей Рекомендации заключается в том, чтобы повысить уровень осведомленности о необходимости учета релятивистских эффектов для хранения времени, навигации, науки и систем связи. В Рекомендации приводятся для напоминания базовые принципы и процедуры, которые следует применять при проведении анализа таких систем. Не делается попыток детального описания какой-либо конкретной системы. Задача, скорее, заключается в том, чтобы представленная ниже информация могла служить удобным справочным материалом и отправной точкой для конкретных применений.

Одним из важных применений настоящей Рекомендации является сравнение значений времени, зарегистрированных часами на вращающемся по орбите вокруг Земли космическом аппарате в межпланетном пространстве и на поверхности планет, со значениями времени, зарегистрированными часами на поверхности Земли. Надлежащей шкалой времени для наземных измерений является всемирное координированное время (UTC). Таким образом, задача может заключаться в соотнесении значений времени, зарегистрированных часами в любом месте вблизи Земли и в Солнечной системе, со значениями времени, зарегистрированными часами на Земле, которые отсчитывают UTC.

Нижеследующее изложение основано на материалах *Конвенций* *IERS (2010 г.)*, Справочника МСЭ-R по спутниковой передаче сигналов времени и частоты и их распространению (2010 г.), Nelson, *Metrologia* (2011) и Petit and Wolf, *Metrologia* (2005). Для получения более подробной информации пользователи могут обратиться к этим публикациям и справочным документам, приведенным в настоящем документе.

Релятивистская основа

Релятивистская основа для опорных пространственно-временных систем определена в резолюциях международных научных организаций. К наиболее важным относятся следующие:

1) Резолюция A4 (1991 г.) Международного астрономического союза (МАС) определяет геоцентрическую небесную опорную систему (GCRS) и барицентрическую небесную опорную систему (BCRS) и их координаты времени. В резолюции B1 (2000 г.) Международного астрономического союза далее уточняется определение BCRS.

2) Резолюция 2 (2007 г.) Международного геодезического и географического союза (МГГС) определяет геоцентрическую земную опорную систему (GTRS), а также международную земную опорную систему (ITRS).

Используемая в настоящем документе терминология соответствует принятой в прошлых Рекомендациях МСЭ-R и может быть соотнесена с основой МАС/МГГС следующим образом: в настоящей Рекомендации GCRS означает геоцентрическую инерциальную (ECI) систему координат, GTRS (на практике – ITRS) означает геоцентрическую связанную с Землей (ECEF) систему координат, и BCRS означает барицентрическую систему координат.

Определения

Собственное время

Собственное время τ – это реальное показание часов или местное время в собственной системе отсчета часов.

Координированное время

Координированное время *t* – это независимая переменная в уравнениях движения физических тел и в уравнениях распространения электромагнитных волн. Это математическая координата в четырехмерной пространственно-временной системе координат. Для данного события координатное время имеет то же значение в любой точке. Значения координатного времени не измеряются, они, скорее, вычисляются по собственному времени часов.

Пространственно-временной интервал

Отношение между координатным временем и собственным временем зависит от местоположения часов и состояния движения в их гравитационной среде и выводится путем интегрирования пространственно-временного интервала. При сравнении значений собственного времени двух часов координатное время в конце концов сокращается. Таким образом, релятивистская передача времени между часами является независимой от системы координат. Система координат может быть выбрана произвольно исходя из соображений удобства.

В общем случае пространственно-временной интервал описывается следующим уравнением:

, (1)

где:

*g*μ*ν*: компоненты метрики.

В случае обозначенных греческими буквами индексов предполагается диапазон 0, 1, 2, 3, в случае латинских индексов – диапазон 1, 2, 3. Повторяющийся индекс подразумевает суммирование по этому индексу. Метрика зависит от гравитационных потенциалов и от угловой скорости и линейного ускорения системы отсчета. После преобразования координат пространственно-временной интервал остается инвариантным. Таким образом, метрика *g*μ*ν* преобразуется как ковариантный тензор второго порядка.

Общее выражение соотношения собственного времени τ и координат выбранной системы координат, включая координатное время *x*0 ≡ *ct* и пространственные координаты *xi*, имеет следующий вид:

, (2)

где:

τ : собственное время.

Таким образом, *dt* = *d*τ для часов в состоянии покоя в инерциальной системе отсчета, где *dxi*= 0 и −*g*00 = 1, *g*0*j* = 0 и *gi j* = δ*i j*. Истекшее координатное время, соответствующее измеренному собственному времени, зарегистрированному часами на трассе между точками *A* и *B*, составляет:

. (3)

Для электромагнитного сигнала интервал пространство-время определяется как:

. (4)

В каждой инерциальной системе отсчета скорость света обозначается как *c*. Истекшее координатное время распространения по трассе между точками *A* и *B* составляет:

. (5)

Выражение γ*i j* ≡ *gi j*+*g*0*i* *g*0*j*/ (–*g*00) представляет метрику трехмерного пространства, а  представляет приращение трехмерного расстояния.

Шкалы времени

Шкалы атомного времени

Основной шкалой времени, базирующейся на атомных часах, является международная шкала атомного времени (TAI), которое рассчитывается Международным бюро мер и весов (BIPM) по взвешенным средним значениям атомных часов в лабораториях времени, рассредоточенных по всему миру. Это – непрерывная опорная шкала времени без скачков.

Шкала атомного времени для хранения времени гражданского назначения называется всемирным координированным временем (UTC), которое отличается от TAI на целое число секунд. В 2011 году UTC = TAI – 34 с. Каждый месяц BIPM распространяет UTC в "Циркуляре Т" BIPM в форме значений разницы конкретных лабораторий времени UTC(*k*).

Шкалы координатного времени

Геоцентрическое координатное время (TCG) – это координатное время в системе координат, центр которой находится в центре Земли (ECI или ECEF).

Земное время (TT) – это еще одно координатное время, которое выводится решкалированием TCG таким образом, что оно имеет примерно ту же скорость хода, что и собственное время часов, покоящихся на поверхности геоида. Геоид – это поверхность с постоянным гравитационным потенциалом, наиболее близко аппроксимирующая уровень моря. Соотношение между TCG и TT определяется как *d*TT/*d*TCG ≡ 1 – *LG*, где *LG* ≡ 6,969 290 134 × 10−10 ≈ 60,2 мкс/день, что рассматривается ниже после уравнения (18). Значение *LG* – это заданная константа. Следовательно,



, (6)

где:

*TCG*0 и *TT*0: соответствуют JD 2443144,5 TAI (1 января 1977 г., 0 час.). Практическая реализация *TT* представляет собой:

*TT* = *TAI* + 32,184 с. (7)

Барицентрическое координатное время (TCB) – это координатное время в системе координат с началом в барицентре Солнечной системы. Разница координатного времени между *TCB* и *TCG* является преобразованием, которое зависит и от времени, и от местоположения. Для приведения к порядку 1 / *c*2:

, (8)

где:

**R**(*t*) = : являющийся функцией времени вектор положения относительно геоцентра;

**x**: барицентрическое положение наблюдателя, а **x**e и **v**e обозначают барицентрическое положение и скорость центра массы Земли.

Это уравнение можно привести к следующей форме:

, (9)

где:

*LC* = 1,480 826 867 41 × 10−8≈ 1,28 мс/день.

В этом выражении *P* представляет серию периодических членов. Последний член является суточным на поверхности Земли, его амплитуда составляет менее 2,1 мкс.

Альтернативная форма уравнения (9) имеет следующий вид (*Конвенции* *IERS (2010 г.)*, Глава 10):

, (10)

где:

TT и *LB* ≡ 1,550 519 768 × 10−8 ≈ 1,34 мс/день  – временной аргумент.

Значение *LB*  – заданная константа.

Периодические члены, обозначенные как *P*(*TT*), имеют максимальную амплитуду примерно 1,6 мс и могут быть рассчитаны с помощью аналитической модели "FB" (Fairhead and Bretagnon, 1990). Иначе, *P*(*TT*) − *P*(*TT*0) может быть обеспечено числовыми временными данными эфемерид, например TE405 (Irwin and Fukushima, 1999), в которых содержатся значения, характеризующиеся точностью ± 0,1 нс, за период 1600–2200 гг. Серия HF2002, обеспечивающая значение *L*C (*TT* − *TT*0) + *P*(*TT*) − *P*(*TT*0) как функцию *TT* за период 1600–2200 гг., была приведена (Harada and Fukushima, 2003) к TE405. Это совпадение отличается от TE405 менее чем на 3 нс за период 1600–2200 гг., и среднеквадратичная ошибка составляет ± 0,5 нс.

Разница между *TCB* и *TT* выражается следующим образом:

. (11)

Преобразование из *TCB* в *TCG* содержит среднее смещение по скорости хода 〈*dTCG*/*dTCB*〉 ≡ 1 − *LC* и периодические члены. Преобразование из *TCG* в *TT* является чистым смещением скорости хода *dTT*/*dTCG* ≡ 1 − *LG*. Таким образом, преобразование из *TCB* в *TT* имеет следующее среднее смещение скорости хода:

〈*dTT*/*dTCB*〉 = (*dTT*/*dTCG*)〈*dTCG*/*dTCB*〉 = (1 – *LG*)(1 – *LC*). (12)

Исходя из определения *LB* (1 – *LG*)(1 – *LC*) ≈ (1 – *LB*), следовательно, уравнение (12) может принять форму 〈*dTT*/*dTCB*〉 = (1 – *LB*) с точностью до нескольких единиц/1018.

Аналогично TT барицентрическое динамическое время (TDB) является еще одним координатным временем в барицентрической системе, решкалированным для получения примерно той же скорости хода, что и *TT*. Соотношение между *TCB* и *TDB* определяется равенством *dTDB*/*dTCB* ≡ 1 – *LB*.

Релятивистские эффекты, воздействующие на часы

Далее рассматривается преобразование между собственным временем идеальных часов (точно реализующих секунду в системе СИ) и координатным временем в геоцентрической и барицентрической системах координат.

Геоцентрическая инерциальная система координат

Координатное время, связанное с геоцентрической инерциальной (ECI) системой координат является геоцентрическим координатным временем (TCG). При выражении через члены порядка 1 / *c*2 компоненты метрического тензора в этой системе координат имеют вид −*g*00 = 1 – 2 *U* / *c*2, *g*0*j* = 0 и *gi j* = (1 + 2 *U* / *c*2) δ *i j* , где *U –* гравитационный потенциал. Истекшее время TCG в ECI системе координат, соответствующее истекшему собственному времени, зарегистрированному часами, движущимися вдоль трассы между точками *A* и *B* со скоростью *v*, определяется следующим образом:

. (13)

Потенциал Земли на расстоянии по радиусу *r*, геоцентрические широта φ и долгота  λ могут быть описаны как расширение в сферических гармониках:



, (14)

где:

*GM*: гравитационная постоянная Земли;

*RE*: экваториальный радиус Земли.

Коэффициенты *Pn*(sin φ): полиномы Лежандра степени *n.*

Коэффициенты *Pnm*(sin φ): присоединенные функции Лежандра степени *n* и порядка *m*.

Геоцентрическая широта φ соотносится с географической широтой ϕ по tan φ = (1 – *f*2) tan ϕ, где *f –*сглаживание.

Для практических применений может оказаться достаточным включение только первой коррекции сплющенности и аппроксимация гравитационного потенциала следующим образом:

. (15)

1) Часы, покоящиеся на поверхности геоида

В случае часов, покоящихся на поверхности вращающейся Земли, необходимо учитывать скорость движения часов **v** = **ω** × **r** в ECI системе координат, где **ω**– угловая скорость Земли, а **r** – местоположение часов. Таким образом, *TCG*, истекшее пока часы регистрируют собственное время Δτ, составляет:

, (16)

где:

: гравитационный потенциал.

Поскольку гравитационный потенциал *W*0 на поверхности геоида является постоянным, он может быть получен на экваторе и приблизительно определяется следующим образом:

. (17)

Наилучшая современная оценка *W*0 составляет 6,2636856 × 107 м2/с2. В соответствии с уравнением (16) TCG в ECI системе координат, которое соответствует собственному времени Δτ0, измеренному покоящимися на поверхности геоида часами, имеет вид:

Δ*t* ≡ *TCG* = (1 + *W*0 / *c*2) Δτ0 ≅ (1 + *LG*) Δτ0 , (18)

где:

*LG* ≡ 6,969 290 134 × 10−10.

Условно считается, что *LG* – заданная константа. Она представляет наилучшее имевшееся значение *W*0 / *c*2 на момент ее определения в 2000 году. Значение TT получено путем решкалирования TCG с коэффициентом 1 – *LG* . Таким образом:

Δ*t*′ ≡ TT = (1 – *LG*) TCG. (19)

Из этого следует, что TT = (1 – *LG*)(1 + *LG*) Δτ0 ≅ Δτ0 с точностью до нескольких единиц/1018.

2) Часы на спутнике

В случае часов, находящихся на вращающемся вокруг Земли спутнике, орбита может рассматриваться в первом приближении как кеплеровская (невозмущенная) орбита. Потенциал на расстоянии *r* от центра Земли приблизительно определяется как *U* = *GM* / *r*. Таким образом, приращение *TCG* составляет:

. (20)

Скорость спутника *v* определяется сохранением энергии на единицу массы ε:

, (21)

где:

*a*: орбитальная главная полуось.

Следовательно, для данного порядка истекшее координатное время составляет:

. (22)

Во втором интеграле *d*τ заменяется на *dt,* поскольку этот член представляет собой релятивистскую коррекцию порядка 1/*c*2. В случае кеплеровской орбиты расстояние по радиусу *r* = *a* (1 – *e* cos *E*), где *e* – эксцентриситет орбиты, а *E* – эксцентрическая аномалия. Эксцентрическая аномалия определяется по средней аномалии с помощью уравнения Кеплера, *M* ≡ *n* Δ*t* = *E* – *e* sin *E*, где среднее движение описывается как , а *T –* период обращения по орбите. Следовательно, TCG, истекшее пока часы регистрируют собственное время Δτ, приблизительно составляет:

. (23)

Второй член является периодической коррекцией, обусловленной эксцентриситетом орбиты, который вызывает остаточные изменения расстояния и скорости, определяемое следующим образом:

. (24)

В этом выражении предполагается, что используются кеплеровские (невозмущенные) элементы.

Для сравнения собственного времени часов на спутнике с собственным временем покоящихся на поверхности геноида часов, необходимо выполнить преобразование из *TCG* в *TT*. Используя уравнения (19) и (20), получаем (*TT*):

. (25)

Таким образом, поскольку , то интервал собственного времени, зарегистрированный покоящимися на поверхности геноида часами, соответствующий интервалу собственного времени, зарегистрированному на спутнике, составляет:

, (26)

где:

*GM*: гравитационная постоянная Земли;

*RE*: экваториальный радиус Земли.

На уровне точности, выражаемом в субнаносекундах, необходимо учитывать возмущение орбиты, обусловливаемое гармониками гравитационного потенциала Земли, приливно-отливные воздействия Луны и Солнца, а также давление солнечного излучения. На этом уровне точности возмущение *J*2 вызывает изменение **r** и **v**, результатом чего является дополнительные периодические воздействия порядка 0,1 нс.

Для полного учета возмущения *J*2 в потенциале в уравнении (15) необходимо выполнить численное интегрирование орбиты и численное интегрирование уравнения (20). Также следует учесть приливно-отливные воздействия Луны и Солнца и давление солнечного излучения.

В случае низких околоземных орбит важными являются и зональные, и тессеральные гармоники. Обычная коррекция эксцентриситета по уравнению (24) более не обеспечивает точности. В этом случае предпочтительно выполнить интегрирование орбиты и интегрирование уравнения (20) в численной форме, включая гармоники более высокого порядка гравитационного потенциала Земли.

Геоцентрическая, связанная с Землей система координат

При использовании членов порядка 1 / *c*2 метрические компоненты имеют следующий вид:   
−*g*00 = 1 – 2 *U* / *c*2 – (**ω** × **r**)2 / *c*2 = 1 − 2*W* / *c*2, *g*0*j* = (**ω** × **r**)*j*/ *c* и *gi j* = δ*i j*. Во вращающейся геоцентрической связанной с Землей (ECEF) системе координат, в которой используется координатное время *TT*, истекшее координатное время составляет:

, (27)

где:

*h*: высота над геоидом;

*g*: местное гравитационное ускорение;

*v*′: скорость движения часов относительно геоида.

Принимается, что значение *h* невелико. Для высокой точности следует учитывать отклонение *g* в зависимости от широты и угла места.

Второй интеграл – это эффект Саньяка для переносимых часов. Он может иметь следующий вид:

 (28)

или:

, (29)

где:

*R*: радиус Земли;

φ: широта;

λ: долгота;

: направленный на восток компонент скорости;

*A*: проекция на экваториальную плоскость, пробегаемую вектором местоположения относительно центра Земли (положительный в случае направления движения на восток и отрицательный в случае направления движения на запад).

Коррекция является положительной для часов, перемещающихся на восток, и отрицательной для часов, перемещающихся на запад.

Барицентрическая система координат

Интервал барицентрического координатного времени (TCB), соответствующий интервалу собственного времени Δτ = τ − τ0 , составляет:

, (30)

где:

*UE*(**r**): ньютонов потенциал Земли;

*U*ext(**r**): внешний ньютонов потенциал всех тел Солнечной системы за исключением Земли.

Система координат тел Солнечной системы

Для сравнения часов, проводимого между телом М Солнечной системы и Землей, требуется ряд преобразований. Значения собственного времени часов должно быть преобразовано в *TT* для часов, связанных с Землей, и в *TM* для часов, связанных сM. Далее первое преобразование – из *TT* в *TCB* и второе – соответствующее преобразование из *TCB* в *TM*. Координатное преобразование записывается следующим образом:

*TCB* – *TT* = (*LC* + *LG*) *TCB* + *P* + **v**E ⋅ **R** / *c*2 (31)

и

*TCB* – *TM* = (*LCM* + *LM*) *TCB* + *P* + **v**M ⋅ **R** / *c*2. (32)

В этих уравнениях периодические члены *P* и положение вектора *R* – каждый – применяются к Земле и планетному телу M, соответственно. Разница между *TM* и *TT* составляет:

*TM* – *TT* = (*TCB* – *TT*) – (*TCB* – *TM*). (33)

В качестве примера: в случае Марса *LCM* = 0,972 × 10−8≈ 0,84 мс/день, *LM =*1,403 × 10−10≈ 12,1 мкс/день. Скорость дрейфа составляет 0,49 мс/день. Амплитуды периодических членов составляют 1,7 мс в орбитальном периоде Земли (365,2422 дней) и 11,4 мс в орбитальном периоде Марса (687 дней).

Распространение электромагнитного сигнала

В данном разделе рассматривается процесс вычисления координатного времени распространения электромагнитного сигнала, когда местоположение передатчика и приемника – оба – заданы и выражены в ECI, ECEF и барицентрических координатных системах.

Эти уравнения применяются во всех случаях. В частности, они должны использоваться при установке параметров часов на спутнике, которые наведены на часы на Земле.

Геоцентрическая инерциальная система координат

При планировании расчета в геоцентрической инерциальной (ECI) системе координат координатное время распространения (TCG) может рассматриваться как сумма геометрической части и гравитационной части. Геометрическая часть описывается как:

 , (34)

где:

g*i j* ≈ δ *i j*; и

ρ: геометрическая длина трассы.

Если сигнал передается в координатное время *tT* и принимается в координатное время *tR*, то TCG распространения по трассе составляет:

 , (35)

где, **r***T* – местоположение передатчика, **r***R* – местоположение приемника, **v**R – скорость движения приемника, а Δ**r** ≡ **r***R*(*tT*) – **r***T*(*tT*) – разница между местоположением приемника и передатчика в координатное время передачи *tT*. Коррекция координатного времени для учета скорости движения приемника имеет вид:

 . (36)

Следует отметить, что на дополнительные члены порядка 1/*c*3 может приходиться несколько пикосекунд, в зависимости от конфигурации.

При рассмотрении воздействия гравитационного потенциала на электромагнитный сигнал необходимо включить потенциал в обе – пространственную и временную – части метрики. Метрические компоненты имеют следующий вид: –*g*00 = 1 − 2 *U* / *c*2, *g*0*j* = 0 и *gi j* = (1 + 2 *U* / *c*2) δ*i j*. Следовательно, истекшее TCG составляет:

. (37)

Гравитационное замедление времени составляет:

 , (38)

где:

*R* и *r*: расстояния от центра земного шара до передатчика и приемника, соответственно.

Гравитационное замедление для трассы между спутником и Землей составляет, как правило, несколько десятков пикосекунд. Общее TCG является суммой членов уравнений (35) и (38).

Координатное время распространения (TT) составляет:

. (39)

Это – интервал времени, который будет измеряться часами на геоиде.

Например, для сигнала, направленного от геостационарного спутника с орбитальным радиусом 42 164 км на часы, находящиеся на экваторе на той же долготе, замедление на трассе составит −27 пс. Для спутника GPS с углом места 40° второй и третий члены практически сокращаются, и замедление на трассе составляет −3 пс.

Геоцентрическая, связанная с Землей система координат

При планировании расчета в ECEF системе координат геометрическая часть TCG составляет:

 . (40)

Метрические компоненты имеют следующий вид: –*g*00≈ 1, *g*0*j* = (**ω** × **r**)*j*/ *c* и *gi j* ≈ δ *i j*, где **r** – вектор местоположения некой точки на трассе сигнала. Координатное время (TT) составляет Δ*t*′ = (1 – *LG*) Δ*t*.

Первым членом уравнения (40) является ρ*′* / *c*, где ρ*′* – эвклидова длина трассы в ECEF системе координат. Если **r***T* – местоположение передатчика, **r***R* – местоположение приемника, а **v**′*R* – скорость движения приемника, то

 , (41)

где:

Δ**r** ≡ **r***R*(*tT*) – **r***T*(*tT*).

Второй член уравнения (40) – это эффект Саньяка. Следовательно,

, (42)

где:

*A*: проекция на экваториальную плоскость области, образуемой центром вращения и конечными точками трассы сигнала.

Для расчета полного времени распространения должно учитываться также гравитационное замедление.

Барицентрическая система координат

Для описания распространения электромагнитного сигнала может использоваться барицентрическая система координат с декартовыми координатами (*x*, *y*, *z*).

Поскольку здесь учитывается только гравитационное воздействие Солнца, для удобства расчетов гравитационного замедления времени может использоваться пространственная сетка, в которой передатчик имеет местоположение (−*aT*, *b*, 0), а приемник имеет местоположение (*aR*, *b*, 0), и, таким образом, распространение осуществляется по приблизительно прямолинейной трассе *y* = *b* (пренебрегая гравитационным отклонением), где *b* – расстояние максимального приближения к Солнцу. Координатное время распространения (TCB) составляет:

, (43)

где *US* – гравитационный потенциал Солнца. Следовательно,

 . (44)

С учетом уровня аппроксимации, в зависимости от времени распространения, координатное время TT распространения может быть масштабировано из TCB следующим образом:

. (45)

Справочные документы

HARADA ,W. and FUKUSHIMA, T. [2003] Harmonic Decomposition of Time Ephemeris TE405. *Astron. J.* 126,2557–2561.

IRWIN, A.W. and FUKUSHIMA, T. [1999] A Numerical Time Ephemeris of the Earth. *Astron. Astrophys.* 348, 642–652.

FAIRHEAD,L.and BRETAGNON, P. [1990] An Analytic Formula for the Time Transformation *TB-TT*. *Astron. Astrophys.* 229,240–247.

McCARTHY, D.D. and SEIDELMANN, P. K. [2009] Time: From Earth Rotation to Atomic Physics (Wiley‑VCH, Weinheim).

NELSON, R.A. [2011] Relativistic Time Transfer in the Vicinity of the Earth and in the Solar System. *Metrologia* 48, S171–S180.

PETIT, G. and LUZUM, B. (editors) [2010] IERS Conventions (2010) (International Earth Rotation and Reference Systems Service).

PETIT, G., and WOLF, P. [2005] Relativistic Theory for Time Comparisons: A Review. *Metrologia* 42, S138–S144.

International Telecommunication Union, Geneva[2010] *Satellite Time and Frequency Transfer and Dissemination*.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_