|  |
| --- |
| **Рекомендация МСЭ-R TF.2118-0**  **(12/2018)** |
| **Релятивистская передача  сигналов времени** |
| **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 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** | Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская 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, 2019 г.

© ITU 2019

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.2118-0

Релятивистская передача сигналов времени

(2018)

Сфера применения

Настоящая Рекомендации устанавливает 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 определяются 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.

Ключевые слова

Теория относительности, передача сигналов времени, распространение сигнала, часы, система координат

Соответствующие Рекомендации и Отчеты

Рекомендации МСЭ-R TF.1011-1, МСЭ-R TF.767-2, МСЭ-R TF.374-5

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 систем связи, навигации и науки 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 I математические алгоритмы, учитывающие релятивистские эффекты при передаче сигналов времени и частоты.

Приложение I

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

[Сфера применения 1](#_Toc5714866)

[Ключевые слова 1](#_Toc5714867)

[Соответствующие Рекомендации и Отчеты 1](#_Toc5714868)

[1 Цель 3](#_Toc5714869)

[2 Релятивистская основа 3](#_Toc5714870)

[3 Шкалы времени 4](#_Toc5714871)

[4 Сравнение показаний часов 5](#_Toc5714872)

[5 Геоцентрическая система координат, жестко связанная с Землей (ECEF) 7](#_Toc5714873)

[6 Барицентрическая система координат 8](#_Toc5714874)

[7 Распространение электромагнитного сигнала 9](#_Toc5714875)

[8 Примеры 10](#_Toc5714876)

[9 Глоссарий 11](#_Toc5714877)

[Справочные документы 13](#_Toc5714878)

# 1 Цель

Цель Приложения I – изложить основные концепции и процедуры, которые должны применяться для учета релятивистских эффектов при хранении времени, а также для навигации, науки и систем связи. Настоящее Приложение может служить удобным справочным руководством для конкретных применений, в частности для сравнения 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. В его основу положены материалы Конвенций IERS (2010 год), Справочника МСЭ-R по спутниковой передаче сигналов времени и частоты и их распространению (2010 год), Nelson, Metrologia (2011) и Petit and Wolf, Metrologia (2005). Для получения более подробной информации пользователи могут обратиться к этим указанным публикациям и справочным документам.

# 2 Релятивистская основа

Опорная система координат – это математическая конструкция, используемая для определения пространственно-временных событий, описываемых посредством четырех координат   
*x* *=* (*x*0, *xi*)*=*(*x*0, *x*1, *x*2, *x*3). Индексы, записываемые греческими буквами, принимают значения 0, 1, 2 и 3, а записываемые латинскими буквами – 1, 2 и 3. Повторяющийся индекс подразумевает суммирование по этому индексу. Индекс 0 соответствует временно́й переменной, а индексы 1, 2 и 3 – трем пространственным координатам. Система отсчета является реализацией опорной системы координат, обычно в виде каталога положений и перемещений объектов или эфемериды.

Опорная система привязана к своему метрическому тензору *g*(*t*, *xi*), что позволяет вычислить пространственно-временной интервал между двумя событиями *x*и *x* + *dx*:

 (1)

где *c* – скорость света.

Резолюциями международных научных организаций определены конкретные опорные системы. К наиболее важным из этих Резолюций относятся следующие:

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

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

Если говорить коротко, BCRS – это система пространственно-временных координат солнечной системы с началом отсчета в барицентре солнечной системы и определяемая метрическим тензором, который задается Резолюцией B1.3 IAU 2000 (см. [https://www.iau.org/administration/resolutions/  
general\_assemblies/](https://www.iau.org/administration/resolutions/general_assemblies/)). GCRS – это геоцентрическая инерциальная система (ECI) пространственно-временных координат, метрический тензор которой также задается Резолюцией B1.3 IAU 2000. Эта система определяется таким образом, что преобразование пространственных координат между BCRS и GCRS не содержит вращательной компоненты, поэтому с точки зрения кинематики GCRS не вращается относительно BCRS. Геоцентрическая земная опорная система (GTRS) представляет собой геоцентрическую систему координат, жестко связанную с Землей (ECEF).

В общей теории относительности собственное время  – это реальное показание часов или местное время в собственной системе отсчета часов. Координатное время *t* – независимая переменная в уравнениях движения физических тел и уравнениях распространения электромагнитных волн. Это математическая координата в четырехмерной пространственно-временной системе координат. Для данного события координатное время имеет одно и то же значение в любой точке. Значения координатного времени не измеряются, а вычисляются по собственному времени часов. Соотношение между координатным и собственным временем зависит от местоположения и состояния движения часов в их гравитационной среде и выводится путем интегрирования пространственно-временного интервала. При сравнении значений собственного времени двух часов координатное время в конечном счете сокращается. Таким образом релятивистская передача сигналов времени между часами не зависит от системы координат. Система координат может быть выбрана произвольно исходя из соображений удобства.

Для перемещаемых часов пространственно-временной интервал определяется как

 (2)

Таким образом *dt* = *d*τ для часов в состоянии покоя в инерциальной системе отсчета, где *dxi* = 0,   
−*g*00 = 1, *g*0*j* = 0 и *gij* = δ*ij*. Истекшее координатное время, соответствующее измеренному собственному времени при перемещении часов между точками *A* и *B*, составляет

 (3)

Для электромагнитного сигнала пространственно-временной интервал определяется как

 (4)

Скорость света равна *c* в любой инерциальной системе отсчета. Истекшее координатное время распространения сигнала между точками *A* и *B* составляет

 (5)

# 3 Шкалы времени

*Шкалы координатного времени*

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

Земное время (TT) – это координатное время в инерциальной системе координат ECI, получаемое путем такого изменения шкалы времени TCG, при котором оно имеет примерно ту же скорость хода, что и собственное время часов, покоящихся на поверхности геоида. Соотношение между TCG и TT определяется как *d*TT/*d*TCG ≡ 1 – *LG*, где *L*G ≡ 6,969290134 × 10−10 ≈ 60,2 мкс/сутки. Значение *L*G – это заданная константа. Следовательно,

TT = (1 – *L*G) TCG, (6)

или

 (7)

Барицентрическое координатное время (TCB) – это координатное время в системе координат с началом отсчета в барицентре Солнечной системы. Разность между TCB и TCG имеет вид:

 (8)

где *Lc*= 1 – 〈*d*TCG/*d*TCB〉, 〈*d*TCG/*d*TCB〉 – среднее смещение скорости хода, *P*(*t*) – ряд с периодическими членами, **v***E*(*t*) – барицентрическая скорость центра массы Земли, а **R**(*t*) – зависимый от времени вектор положения относительно центра массы Земли.

Полное преобразование из TCB в TT характеризуется средним смещением скорости хода:

〈*d*TT/*d*TCB〉 = (*d*TT/*d*TCG)〈*d*TCG/*d*TCB〉 = (1 – *LG*)(1 – *LC*) ≡ 1 – *LB*, (9)

где *L*G ≡ 6,969290134 × 10−10 ≈ 60,2 мкс/сутки, *LC* = 1,48082686741 × 10−8 ≈ 1,28 мс/сутки, а *LB* = 1,55051976772 × 10−8 ≈ 1,34 мс/сутки. Разность между TCB и TT равна

 (10)

Началу отсчета TT, TCG и TCB соответствует время TAI 0 ч32,184 с 1 января 1977 года (юлианская дата 2 443 144,5003725).

Барицентрическое динамическое время (TDB) – это шкала времени, полученная из TCB путем изменения шкалы по формуле TDB ≡ (1 – *LB*)TCB + TDB0, где *LB* ≡ 1,550519768 × 10−8 и   
TDB0 ≡ −65,5 мкс служат определяющими константами. Скорость хода TDB такая же, как и у TT.

*Шкалы атомного времени*

Международное атомное время (TAI) – основная шкала времени, которая базируется на атомных часах и рассчитывается Международным бюро мер и весов (BIPM) по средневзвешенным показаниям атомных часов в лабораториях времени, рассредоточенных по всему миру. Этот процесс состоит из двух этапов: 1) на основании сравнения показаний часов рассчитывается свободная шкала атомного времени (Echelle Atomique Libre, EAL); 2) к EAL применяются частотные поправки на основании показаний первичных стандартов частоты, работающих в нескольких лабораториях, с уменьшением на релятивистские поправки к определяемому обычным образом геоиду. TAI – это непрерывная опорная шкала времени, не корректируемая по рассылке. Хотя TT представляет собой теоретическую однородную шкалу времени, а TAI получается статистическими методами, практическая реализация TT имеет следующий вид: TT = TAI + 32,184 с.

Всемирное координированное время(UTC) – это атомная шкала для хранения времени в гражданских целях, отличающаяся от TAI на целое число секунд. Каждый месяц UTC рассылается посредством "Циркуляра T" BIPM в форме значений разности от реализаций этой шкалы UTC(*k*) в отдельных лабораториях, где *k* обозначает соответствующая участвующая лаборатория.

# 4 Сравнение показаний часов

*Геоцентрическая инерциальная (ECI)* *система координат*

Координатное время, связанное с геоцентрической инерциальной (ECI) системой координат, например GCRS, – это геоцентрическое координатное время (TCG). При использовании членов 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 *gij* = (1 + 2 *U*/*c*2) δ*ij*, где *U* – это гравитационный потенциал.

Истекшее время TCG в системе координат ECI, соответствующее истекшему собственному времени при перемещении часов между точками *A* и *B*, определяется как

 (11)

где *U* – гравитационный потенциал Земли в месте расположения часов за вычетом центробежного потенциала, а *v* – скорость движения часов относительно геоида. Значение *U* на расстоянии по радиусу *r* на геоцентрической широте φ и долготе λ можно выразить в виде разложения по сферическим функциям:

 (12)

где *GM*E – гравитационная постоянная Земли, а *RE* – экваториальный радиус Земли. Коэффициенты *Pn*(sin φ) представляют собой полиномы Лежандра степени *n*, а коэффициенты *Pnm*(sin φ) – присоединенные функции Лежандра степени *n* и порядка *m*. Геоцентрическая широта φ*c* связана с географической широтой *g* соотношением tan φ*c* = (1 – *f* 2) tan *g*, где *f –* сплюснутость.

*Часы, покоящиеся на поверхности геоида*

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

 (13)

где *W*0 – это гравитационный потенциал, равный сумме гравитационного потенциала *U* и вращательного потенциала ½(**ω**× **r**)2. Поскольку гравитационный потенциал *W*0 постоянен на поверхности геоида, можно оценить его на экваторе и выразить приблизительной формулой:

. (14)

*Передача сигналов времени*

При передаче сигналов времени из точки *P* в точку *Q*, осуществляемой посредством часов, координатное время, истекшее, пока часы перемещались, равно

 (15)

где *U*(**r**) – гравитационный потенциал в месте расположения часов за вычетом центробежного потенциала, **v**(**r**) – скорость перемещения часов, наблюдаемая в невращающейся геоцентрической системе отсчета, а Ug – потенциал на поверхности геоида.

*Часы на спутнике, вращающемся вокруг Земли*

В случае часов на спутнике, вращающемся вокруг Земли, орбиту можно в первом приближении считать кеплеровской (невозмущенной). Потенциал на расстоянии *r* от центра Земли определяется формулой *U* = *GME*/*r*, а координатное время (TCG), истекшее, пока часы регистрируют собственное время Δτ, приблизительно равно

 (16)

где *E* – эксцентрическая аномалия, определяемая из средней аномалии по уравнению Кеплера   
*M* ≡ *n*Δ*t* = *E* – *e* sin *E*, *n* – среднее движение, заданное формулой , *T* – период обращения по орбите, а *a* – большая полуось орбиты.

Для сравнения собственного времени часов на спутнике, вращающемся вокруг Земли, с собственным временем часов, покоящихся на поверхности геоида, необходимо выполнить преобразование к шкале TT. Таким образом интервал собственного времени, зарегистрированный часами в состоянии покоя на поверхности геоида, который соответствует интервалу собственного времени, зарегистрированному часами на спутнике, можно представить формулой

 (17)

где *J*2 – коэффициент второй степени сжатия Земли. Второй член представляет собой поправку на непостоянство скорости и потенциала, обусловленное эксцентриситетом орбиты.

На субнаносекундном уровне точности 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 порождает изменения **r** и **v**, вызывающие дополнительные периодические воздействия величиной порядка 0,1 нс. Поэтому чтобы полностью учесть возмущение *J*2, необходимо численно проинтегрировать орбиту и уравнение (16). Кроме того, следует учесть приливно-отливные воздействия Луны и Солнца и давление солнечного излучения.

В случае низких околоземных орбит значимы и зональные, и тессеральные гармоники гравитационного потенциала. Обычная поправка на эксцентриситет к уравнению (16) более не обеспечивает требуемой точности. В этом случае предпочтительно выполнить интегрирование орбиты и интегрирование уравнения (16) в численной форме с учетом гармоник гравитационного потенциала Земли более высокого порядка.

# 5 Геоцентрическая система координат, жестко связанная с Землей (ECEF)

При использовании членов порядка 1/*c*2 метрические компоненты имеют вид: −*g*00 = 1–2 *U*/*c*2 –   
– (**ω** × **r**)2/*c*2 = 1–2*W*0/*c*2, *g* 0*j* = (**ω** × **r**)*j*/*c* и *gij* = *δij*. Во вращающейся геоцентрической системе координат, жестко связанной с Землей (ECEF), координатное время равно земному времени (TT), а координатное время, истекшее за период перемещения часов, составляет

 (18)

где *U*(**r**) – разность гравитационных потенциалов (включая центробежный потенциал) между местом расположения часов **r** и поверхностью геоида, наблюдаемая из жестко связанной с Землей системы координат, в соответствии с принятым соглашением (Резолюция A4 Генеральной ассамблеи МАС, 1992 год) о том, что *U*(**r**) отрицательно, когда часы находятся над поверхностью геоида. При высоте часов *h* над поверхностью геоида менее 24 км значение *U*(**r**) можно аппроксимировать как *gh*, где *g* – полное гравитационное ускорение (с учетом вращательного ускорения Земли), определяемое на поверхности геоида. Эта аппроксимация применима ко всем случаям передачи сигналов времени с движением по аэродинамической траектории и в направлении к Земле. При значениях *h*, превышающих 24 км, разность потенциалов *U*(**r**) можно вычислить с большей точностью по следующей формуле:

 (19)

Для передачи сигналов времени с точностью на уровне 1 нс эту формулу не следует применять на расстояниях свыше 50 000 км от центра Земли.

Посредством второго интеграла в формуле (18) учитывается эффект Саньяка для перемещаемых часов. Его можно выразить следующим образом:

 (20)

где *R* – радиус Земли,  – широта, ** – долгота, а *AE* – площадь проекции на экваториальную плоскость области, охватываемой вектором местоположения относительно центра Земли (с положительным знаком в случае движения на восток и с отрицательным в случае движения на запад). Поправка положительна для часов, перемещающихся на восток, и отрицательна для часов, перемещающихся на запад.

*Передача сигналов времени*

При передаче сигналов времени из точки *A* в точку *B*, осуществляемой посредством переносных часов, координатное время, истекшее, пока часы перемещались, составляет

 (21)

где *AE* измеряется в системе координат, жестко связанной с Землей. Охватываемая площадь *AE* берется с положительным знаком, когда проекция траектории часов на экваториальную плоскость движется на восток. Для передачи сигналов времени с точностью на уровне 1 нс эту формулу не следует применять на расстояниях свыше 50 000 км от центра Земли. На бо́льших расстояниях расчеты для передачи сигналов времени следует выполнять в барицентрической системе координат.

# 6 Барицентрическая система координат

Интервал барицентрического координатного времени (TCB), соответствующий интервалу собственного времени, равен

 (22)

где **R** – положение часов в геоцентрической системе координат, **r*E*** – положение центра массы Земли в барицентрической системе координат, *UE*(**R**) – ньютонов потенциал Земли, *U*ext(**R**) – внешний ньютонов потенциал всех тел Солнечной системы, за исключением Земли, определяемый в месте нахождения часов, а **v***E* – скорость центра массы Земли в барицентрической системе координат. Формула (22) действительна для часов, находящихся в любой точке в окрестности Земли, в том числе на спутнике или на земной поверхности. Для часов, покоящихся на поверхности геоида, первый член соответствует TCG. Поэтому если ограничиться членами порядка 1/*c*2, разность значений координатного времени между TCB и TCG равна

 (23)

Для передачи сигналов времени между телом в Солнечной системе и Землей требуются два преобразования: сначала из TT в TCB, а затем из TCB во время TSSB на этом теле Солнечной системы. Так как TCB является общим для этих преобразований, при вычислении разности TSSB – TT оно сокращается. Преобразование из TCB в TT имеет вид:

 (24)

Аналогичным образом преобразование из барицентрического координатного времени (TCB) в TSSB дается формулой

 (25)

В случае Марса *LCSSB*= *LCM* = 0,972 × 10−8 ≈ 0,84 мс/сутки, а *LSSB = LM*≡ *W*0*M*/*c*2 = 1,403 × 10−10 ≈ ≈ 12,1 мкс/сутки, где *W*0*M* – значение гравитационного потенциала на Марсе.

# 7 Распространение электромагнитного сигнала

*Геоцентрическая инерциальная (ECI) система координат*

Для электромагнитного сигнала, распространяющегося в системе координат ECI, координатное время распространения (TCG) составляет

 (26)

В первом приближении гравитационным потенциалом можно пренебречь. Тогда компоненты метрического тензора имеют вид: –*g*00 ≈ 1, *g*0*j* = 0 и *gij* ≈ *ij*, а координатное время (TT) равно   
(1 – *LG*) Δ*t*. Правая часть уравнения (26) – это просто /*c*, где  – евклидова длина трассы в системе ECI.

Если сигнал передается в момент *tT* координатного времени и принимается в момент *tR* координатного времени, то координатное время (TCG) распространения сигнала по трассе составляет

 (27)

где **r***T* – местоположение передатчика, **r***R* – местоположение приемника, **v***R* – скорость движения приемника, а Δ**r** ≡ **r***R*(*tT*) – **r***T*(*tT*) – это разность местоположений приемника и передатчика при передаче сигнала, то есть в момент координатного времени *tT*. Поправка к координатному времени для учета скорости движения приемника имеет вид

 (28)

Чтобы учесть влияние гравитационного потенциала на электромагнитный сигнал, необходимо включить потенциал в обе части метрики – пространственную и временную. Гравитационная задержка времени составляет

 (29)

где *R* и *r* – расстояние по радиусу в геоцентрической системе координат до передатчика и приемника соответственно. Координатное время распространения (TT), соответствующее интервалу собственного времени, зарегистрированному часами в состоянии покоя на поверхности геоида, составляет

 (30)

*Геоцентрическая система координат, жестко связанная с Землей (ECEF)*

Для электромагнитного сигнала, распространяющегося в системе координат (ECEF), координатное время распространения (TCG) составляет

 (31)

Метрические компоненты имеют вид: −*g*00 = 1–2*U*/*c*2, *g*0*j* = (**ω** × **r**)*j*/*c* и *gij* ≈ δ*ij*, где **r** – местоположение точки на трассе распространения сигнала. Координатное время (TT) равно (1 – *LG*)Δ*t.* Тогда координатное время, прошедшее от момента излучения до момента приема электромагнитного сигнала, составляет

 (32)

где *dr* – приращение стандартной длины или собственная длина вдоль трассы передачи сигнала, *U*(**r**) – потенциал в точке **r** на трассе передачи сигнала за вычетом потенциала на поверхности геоида (см. формулу (19)), наблюдаемый из жестко связанной с Землей системы координат.

Если пренебречь *U*(**r**), первым членом уравнения (32) будет ρ*′*/*c*, где ρ*′* – евклидова длина трассы в системе координат ECEF. Если **r***T* – местоположение передатчика, **r***R* – местоположение приемника, а **v**′*R* – скорость движения приемника, то тогда

 (33)

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

Второй член уравнения (32) выражает эффект Саньяка:

 (34)

где *AE* – площадь проекции на экваториальную плоскость области, образуемой центром вращения и конечными точками трассы сигнала. Эта площадь берется с положительным знаком, когда у трассы распространения сигнала имеется компонента, направленная на восток.

*Барицентрическая система координат*

Если электромагнитный сигнал посылается в барицентрической системе координат с декартовыми координатами (*x*, *y*, *z*) от передатчика из точки (−*aT*, *b*, 0) к приемнику в точке (*aR*, *b*, 0) вдоль приближенно прямой трассы *y* = *b* (пренебрегая гравитационным отклонением), где *b* – расстояние наибольшего сближения с Солнцем, то координатное время распространения (TCB) составляет:  (35)

где *US* – гравитационный потенциал Солнца. Следовательно,

 (36)

Масштабируя это к земному времени (TT) распространения, зарегистрированному часами на поверхности геоида, получим

 (37)

# 8 Примеры

Из-за релятивистских эффектов часы, расположенные на высоте, будут показывать более высокую частоту, а приведенная скорость хода будет отличаться от приведенной скорости хода TAI на −*U*/*c*2. Вблизи уровня моря это описывается выражением −*g*()*h*/*c*2, где ** – географическая широта,   
*g*()  (9,780  0,052 sin2 ) м/с2 – полное ускорение (гравитационное и центробежное) на уровне моря, а *h*– высота над уровнем моря.

Если часы перемещаются относительно поверхности Земли со скоростью *V*, которая может иметь компоненту *VE* в восточном направлении, приведенная разность частот перемещаемых часов относительно покоящихся на уровне моря составляет

 (38)

где *r –* расстояние до часов от центра Земли.

Выбор системы отсчета чисто произволен, но для определения координатного времени необходимо выбрать конкретную систему. Для наземного использования рекомендуется выбирать систему отсчета, жестко связанную с Землей. В этой системе отсчета, когда часы *B* синхронизируются с часами *A* (те и другие покоятся на поверхности Земли) по радиосигналу, передаваемому из точки *A* в точку *B*, то разность координатного времени между двумя этими часами равна

 (39)

где  – широта,  – восточная долгота, а path – трасса, по которой радиосигнал проходит из точки *A* в точку *B*.

Если же двое часов синхронизируются посредством переносных часов, разность координатного времени между ними составит

 (40)

где *V* – скорость хода переносных часов на поверхности Земли, а path – трасса, по которой проходят часы при перемещении из точки *A* в точку *B*.

# 9 Глоссарий

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *AE* |  | Площадь экваториальной проекции области, охватываемой концом вектора **r** в ходе передачи сигналов времени |
| BCRS | Barycentric Celestial Reference System | Барицентрическая небесная опорная система |
| *c* |  | скорость света, равная 2,99792458  108 м/с |
| ECEF | Earth-centred, Earth-fixed | Геоцентрическая система отсчета, жестко связанная с Землей |
| ECI | Earth centred inertial | Геоцентрическая инерциальная система |
| *f* |  | Сплюснутость Земли, равная 1/298,257223563 |
| GCRS | Geocentric celestial reference system, an ECI system of geocentric space-time coordinates | Геоцентрическая небесная опорная система, относится к системе ECI геоцентрических пространственно-временных координат |
| *GME* |  | Гравитационная постоянная Земли, равная 398 600 км3/с2 |
| GTRS | Geocentric terrestrial reference system, an ECEF coordinate system | Геоцентрическая земная опорная система, относится к системе координат ECEF |
| *Jmn* |  | Коэффициенты сферических гармоник, описывающие сжатие Земли. Наиболее значимым из них является коэффициент *J*2 (*m* = 2, *n* = 0), который можно определить через полярный (*C*) и экваториальный (*A*) моменты инерции Земли: , где *M* – масса Земли, а *R* – ее радиус. *J*2  1,083  10−3 |
| *LB* |  | 1 − (1 – *LG*)(1 – *LC*) |
| *Lc* |  | 1 − 〈*d*TCG/*d*TCB〉, где 〈*d*TCG/*d*TCB〉 – среднее смещение по скорости |
| *LG* |  | 1 – *d*TT/*d*TCG ≡ 6,969290134 × 10−10 (заданная константа) |
| **r** |  | Вектор с началом в центре Земли, конечная точка которого движется вместе с часами |
| *r* |  | Модуль вектора **r** |
| *RE* |  | Экваториальный радиус Земли, равный 6378136 км |
| *t* |  | Координатное время – независимая переменная в уравнениях движения физических тел и распространения электромагнитных волн |
| TAI | International atomic time | Международное атомное время |
| TCB | Barycentric coordinate time | Барицентрическое координатное время |
| TCG | Geocentric coordinate time | Геоцентрическое координатное время |
| TDB | Barycentric dynamical time | Барицентрическое динамическое время |
| TT | Terrestrial time | Земное время |
| UTC | Coordinated universal time | Всемирное координированное время |
| *U* |  | Гравитационный потенциал |
| *Ug* |  | Потенциал (гравитационный и центробежный) на поверхности геоида, равный 62 636,86 км2/с2 |
| *v* |  | Скорость движения часов относительно геоида |
| *W* |  | Гравитационный потенциал, состоящий из *U* и вращательного потенциала ½(**ω**× **r**)2 |
| s*i j* |  | Дельта-функция Кронекера: *ij* = 0 при *i*≠ *j*; *ij* = 1 при *i*= *j* |
| *U*(**r**) |  | Разность гравитационных потенциалов (включая центробежный потенциал) между местом расположения часов **r** и поверхностью геоида, наблюдаемая из жестко связанной с Землей системы координат, в соответствии с принятым соглашением (Резолюция A4 Генеральной ассамблеи МАС 1992 года) о том, что *U*(**r**) отрицательна, когда часы находятся над поверхностью геоида |
|  |  | Дополнение до широты |
|  |  | Долгота |
|  |  | Широта |
| φ*c* |  | Геоцентрическая широта |
| *g* |  | Географическая широта |
|  |  | Собственное время, измеренное в "покоящейся системе отсчета" часов, то есть в опорной системе, перемещающейся вместе с часами |
|  |  | Угловая скорость вращения Земли, равная  7,292115  10−5 рад/с |

Справочные документы

D. D. McCarthy and P. K. Seidelmann, *Time: From Earth Rotation to Atomic Physics* (Wiley-VCH, Weinheim, 2009)

R. A. Nelson, *Relativistic Time Transfer in the Vicinity of the Earth and in the Solar System*, Metrologia 48, S171 – S180 (2011)

G. Petit and B. Luzum (editors), IERS Conventions (2010) (International Earth Rotation and Reference Systems Service, 2010)