

## VI. Измерительные средства для сличений удаленных часов и стандартов частоты

Перевозимые часы  
 Радио и оптические средства  
 Передача сигнала для неопределенного круга лиц  
 NTP сервера  
 Дифференциальные методы  
 Дуплексные методы

### Перевозимые часы

#### *Идея и воплощение*

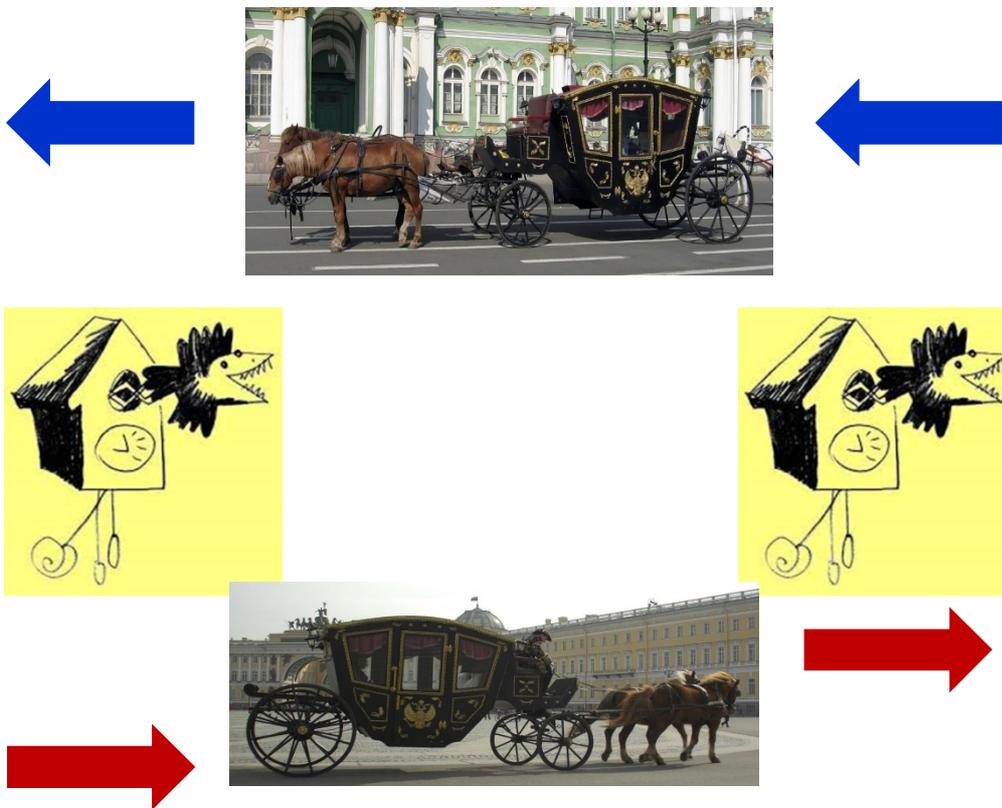


Рис. 50

## **Перевозимые часы** *Проблемы*

Основная проблема сличений с помощью перевозимых часов – невозможность одновременных измерений локальных и удалённых часов по отношению к транспортируемым часам. Отсюда необходимость прогнозирования поведения перевозимых часов относительно опорных. Если планируемый срок обращения (отъезд-возвращение) перевозимых часов – сутки, то для построения заслуживающего доверия прогноза необходимо ~10 суток. То есть темп поступления измерительной информации менее темпа, обеспечиваемого МБМВ посредством бюллетеней с UTC и UTCr.

Ниоткуда не следует, что прогноз для перевозимых часов в стационарных лабораторных условиях будет адекватен их поведению в условиях транспортирования.

Ниоткуда не следует, что по дороге от опорных часов до удаленных или на обратном пути не случилось потери шкалы времени перевозимых часов. Для того чтобы в этом убедиться, необходимо часы вернуть назад в исходный пункт.

На протяжении всего времени транспортирования часы должны быть обеспечены бесперебойным электропитанием.

И, наконец, при транспортировании, особенно на большие расстояния и при долгом пребывании у удаленных часов, должно вести детальное документирование условий транспортировки, включая трехмерный маршрут и скорость, для учета релятивистских эффектов.

### **(Рекомендация ITU-R TF.1010-1 Релятивистские эффекты в координированной временной системе в непосредственной близости к Земле)**

*Ассамблея радиосвязи Международного союза радиосвязи, учитывая,*

- что атомные часы испытывают зависящие от пути перемещения сдвиги частоты второго порядка, связанные с движением, и гравитационные сдвиги частоты, связанные с местоположением;
- что ККВЧ сознает необходимость в ясно определенной процедуре по учету релятивистских эффектов во временных системах и системах сличения времени;
- что поскольку сличение времени в неинерциальных системах требует специального рассмотрения, и ККВЧ рекомендовал соответствующий набор уравнений, которые обеспечивают согласованные измерения UTC в окрестности Земли;

что атомные часы испытывают зависящие от пути перемещения сдвиги частоты второго порядка, связанные с движением, и гравитационные сдвиги частоты, связанные с местоположением;

что ККВЧ сознает необходимость в ясно определенной процедуре по учету релятивистских эффектов во временных системах и системах сличения времени;

что поскольку сличение времени в неинерциальных системах требует специального рассмотрения, и ККВЧ рекомендовал соответствующий набор уравнений, которые обеспечивают согласованные измерения UTC в окрестности Земли, рекомендует:

### *Транспортирование часов во вращающейся опорной системе*

Если часы перемещаются из точки P в точку Q, то накопленное координатное время составляет:

$$\Delta t = \int_P^Q ds \left[ 1 + \frac{\Delta U(\vec{r})}{c^2} + \frac{V^2}{2c^2} \right] + \frac{2\omega}{c^2} A_E.$$

Для вычисления интервала координатного времени в окрестности Земли (по крайней мере, в пределах геостационарного радиуса) при точности порядка 1 нс могут быть использованы следующие определения, основанные на первом порядке разложения полных общих релятивистских выражений

где:

- $c$  — скорость света;
- $\omega$  — угловая скорость вращения Земли;
- $V$  — скорость часов по отношению к Земле;
- $r$  — радиус-вектор с началом в центре Земли, чей конец перемещается с часами из P в Q;
- $\Delta U(r)$  — разность гравитационных потенциалов (включая центробежный) между часами в положении  $r$  и геоидом при оценке в связанной с Землей системой координат в соответствии с соглашением (Резолюция А4 IAU, 1992,  $\Delta U(r)$  отрицательна, если часы над геоидом);
- $ds$  — приращение истинного времени, накопленного перевозимыми часами. Приращение истинного времени является временем, накопленным часами, измеренным в «неподвижной системе», т.е. в системе движущейся совместно с часами.

### Примеры

Из-за релятивистских эффектов при подъеме часов

их частота повышается на величину  $-\Delta U/c^2$ ,

где  $\Delta U$  - разность гравитационных потенциалов (включая центростремительный);

$c$  – скорость света.

Вблизи уровня моря это превращается в  $-g(\phi) \cdot h/c^2$ ,

где:  $\phi$  - географическая широта;

$g(\phi)$  – полное ускорение на уровне моря  $g(\phi) = (9.780 + 0.052 \sin^2(\phi)) m/s^2$

(гравитационное и центростремительное);

$h$  – высота над уровнем моря.

Подобные оценки используются, например, при сравнении первичных  $C_s$  стандартов. На широте  $40^\circ$  ход часов изменяется на  $+1.091 \cdot 10^{-13}$  на км высоты над вращающимся геоидом.

### Примеры



Рис. 51

Если часы движутся над поверхностью Земли со скоростью  $V$ , которая имеет компоненту  $VE$  в восточном направлении, то разность частоты движущихся часов относительно неподвижных на уровне моря в этом случае имеет вид:

$$-\frac{V^2}{2c^2} + \frac{(g(\phi) \times h)}{c^2} - \frac{(\omega \times r \times \cos(\phi) \times V_E)}{c^2},$$

где:

$\omega$  – угловая скорость вращения Земли,  $\omega = 7.292 \cdot 10^{-5}$  rad/s;

$r$  – расстояние часов от центра Земли (экваториальный радиус Земли 6 378 136 m);

$c$  – скорость света  $c = 2.99792458 \cdot 10^8$  m/s;

$\phi$  – geographical latitude.

Например, если часы летят на восток по 40 параллели со скоростью 270 м/с на высоте 9 000 м, разность частоты движущихся часов относительно неподвижных на уровне моря в этом случае имеет вид:

$-4.06 \cdot 10^{-13} + 9.82 \cdot 10^{-13} - 1.072 \cdot 10^{-12} = -4.96 \cdot 10^{-13}$  (18 нс за 10 часов полёта!).

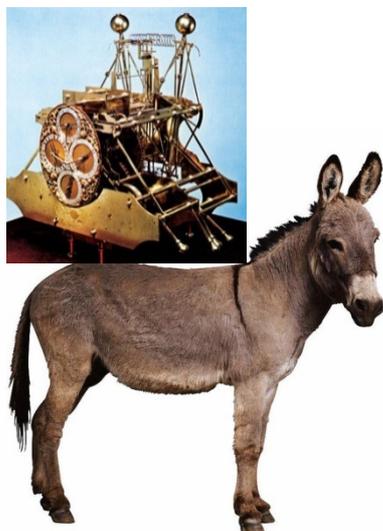


Рис. 52

Положим, часы транспортируются по поверхности геоида с бесконечно малой скоростью из точки А в точку В и затем возвращаются в точку А, но уже по другому пути. При этом их показания будут отличаться от часов, которые не покидали точки А на:

$$\Delta t = \frac{2\omega \cdot A_E}{c^2},$$

где  $A_E$  – площадь проекции замкнутого пути часов на экваториальную плоскость Земли. Знак  $A_E$  считается положительным, если путь часов направлен по часовой стрелке при взгляде на него с Южного полюса.

Поскольку  $\frac{2\omega}{n_2} = 1.62 \cdot 10^{-6} \text{ ns / km}^2$ , то при транспортировке часов вокруг Земли по экватору с бесконечно малой скоростью в восточном направлении они бы по сравнению с часами, находящимися в покое в исходной точке, показали бы разность шкал -207.4 нс.

### *Передача сигнала для неопределенного круга лиц*

- Сигналы поверки времени.
- Эталонные сигналы частоты и времени специализированных радиостанций.
- Эталонные сигналы частоты и времени наземного телевидения.
- Эталонные сигналы времени через NTP протокол.
- Сигналы частоты и времени глобальных навигационных спутниковых систем.

Таблица 7

#### Излучение сигналов эталонных частот и времени

	В реальном времени	Апостериорно
	$u_A$ $u_B$	$u_A$ $u_B$
Сигналы поверки времени	нерегламентировано	
ЭСЧВ специализированных радиостанций	Бюллетень В	Бюллетень Д
ЭСЧВ наземного телевидения	Бюллетень В	Бюллетень З
ЭСЧВ через NTP протокол	Бюллетень В	Не контролируется
Сигналы времени ГНСС	ГЛОНАСС, ИКД навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2 (редакция 5.1)	Бюллетень З

**Эталонные сигналы частоты и времени  
специализированных радиостанций  
рекомендация ITU-R TF.460-6**

***Излучение сигналов эталонных частот и времени***

Ассамблея радиосвязи МСЭ,  
*принимая во внимание:*

- желательность поддержания согласованных передач эталонных частот и времени во всемирном масштабе;
- необходимость распространения эталонных частот и сигналов времени в соответствии с секундой, определенной на 13 ГКМВ (1967);
- постоянную потребность в незамедлительном доступе к всемирному времени (UT) с неопределенностью 0.1с,

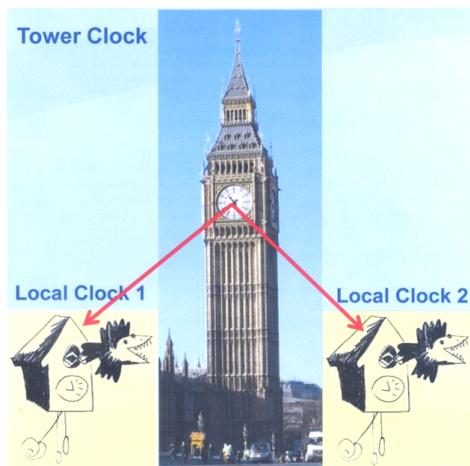
*рекомендует:*

1. Чтобы все сигналы эталонных частот и времени были возможно более близко согласованы с Всемирным координированным временем (UTC), сигналы времени не уклонялись более чем на 1 мс, а сигналы эталонных частот не отклонялись более чем на  $1 \cdot 10^{-10}$ , также чтобы сигналы времени, излученные каждой станцией, содержали информацию о фазе несущей.

2. Чтобы передача эталонных частот и сигналов времени, а также других сигналов времени для научных целей (с возможным исключением некоторых специальных систем), содержала информацию о UT1 - UTC и TAI - UTC.

***Дифференциальные методы***

*Идея*

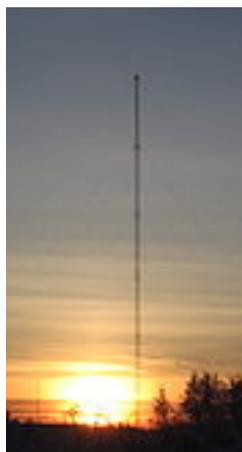


$$\begin{aligned} \text{ОТСЧЕТ 1} &= \text{TC} - \text{LC1} \\ \text{ОТСЧЕТ 2} &= \text{TC} - \text{LC2} \end{aligned}$$

$$\text{LC1} - \text{LC2} = \text{ОТСЧЕТ 2} - \text{ОТСЧЕТ 1}$$

Рис. 53

**Дифференциальные методы.**  
*Воплощение*



Loran C



ТВ Останкино



GALILEO, GLONASS, GPS

Рис. 54

***Что было, то и будет; и что делалось,  
то и будет делаться,  
и нет ничего нового под солнцем.***

***Книга Екклесиаста 1:9***

**Дифференциальные методы**

*Проблемы*

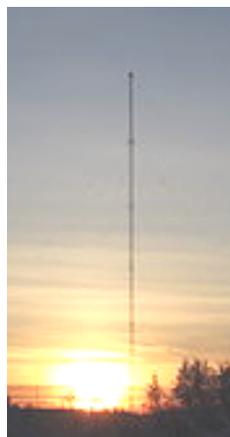


Рис. 55

**Loran C**

Покрытие: 1500 – 2000 км

Проблемы: приземная и  
отраженная волны

день/ночь

Точность: ~ 1 мкс

Период работы: 1970 – 1990





### ТВ Останкино

Покрытие: в пределах прямой видимости

Проблемы: калибровка канала сличений,  
вариации задержки приемника

Точность:  $\sim 10$  нс.

Период работы: 1970 – по настоящее время.



Рис. 56



### GALILEO, GLONASS, GPS

*Самое массовое средство*

Покрытие: в пределах прямой видимости  $\pm 7\,400$  км от подспутниковой точки при высоте спутника  $10^0$ .

Проблемы: дифференциальная калибровка приемной аппаратуры, эфемериды спутника, многолуче-  
вость, вариации задержки приемника.

Точность  $\sim 2$  нс.

Период работы 1985 г. - по настоящее время.



Рис. 57

**Рекомендация S6 (1993):*****Консультативный Комитет по определению секунды,***

*учитывая,*

что дифференциальный метод наблюдения спутников глобальной системы позиционирования (GPS) является наиболее точным и правильным методом сличения шкал времени удаленных часов на Земле и в её окрестностях,

что потенциально достижимая правильность этого метода может приближаться к 1 нс,

что существует необходимость подавления эффекта селективного доступа (SA),

что существует недостаток стандартизации в GPS временном оборудовании,

что существует необходимость в абсолютной, а равно дифференциальной, калибровке GPS временного оборудования,

*рекомендует:*

чтобы производители GPS временного оборудования предприняли меры по внедрению технических директив, разработанных Группой по стандартизации GPS передачи времени;

чтобы были разработаны и внедрены методы частой и систематической калибровки GPS временного оборудования.

**Технические директивы по стандартизации программной поддержки GPS временных приемников, которые должны быть внедрены для совершенствования точности сличений common-view методом**

(Разработаны Группой по стандартизации сличений времени с использованием GPS, рабочей подгруппой Рабочей Группы ККОС по совершенствованию TAI)

**9 Директив + 3 Приложения****Директива 1**

Единственной опорной шкалой времени, используемой для мониторинга сигналов GPS спутников, является шкала Всемирного координированного времени UTC формируемая и распространяемая МБМВ.

**Директива 2**

Каждый сеанс приемов сигналов GPS спутников характеризуется датой первого отсчета, выражаемой модифицированной юлианской датой вместе с  
*Альманах современной метрологии, 2017, № 10*

временем UTC в часах, минутах и секундах. Продолжительность каждого сеанса соответствует записи 780 оригинальных последовательных отсчетов с интервалом 1 с, так как это описано в Приложении I.

#### **Директива 3**

Время сеанса, определяемое регулярно издаваемым МБМВ Международным расписанием GPS сеансов, соответствует первому отсчету.

#### **Директива 4**

Единственный признанный метод обработки исходных данных детально описан в Приложении II.

#### **Директива 5**

Все модели процедур, параметры и константы, необходимые для обработки исходных данных, заимствуются из информации, представляемой Интерфейсным контрольным документом Министерства обороны США или Соглашения по стандартизации НАТО (STANAG). Эти документы обновляются при каждом новом издании.

#### **Директива 6**

Программное обеспечение приемника должно обеспечивать ввод координат антенны в виде X, Y и Z.

#### **Директива 7**

Возможности работы приёмника должны обеспечивать: получение исходных данных каждую секунду, данные, являющиеся результатом стандартной обработки блока из 15-секундных исходных данных, описанных в Приложении II, параметров и констант, используемых программным обеспечением GPS временного приемника по выбору конкретного пользователя.

#### **Директива 8**

GPS временной приемник должен обеспечивать непрерывную работу в течение 24 часов в сутки по расписанию без каких-либо искусственных ограничений.

#### **Директива 9**

GPS данные записываются и передаются в файл, организованный в соответствии с Приложением III, который, в частности, содержит:

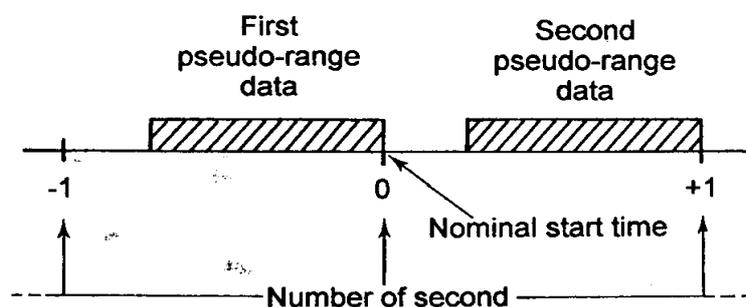
- а) заголовок файла с детальной информацией о работе приемника;
- б) контрольную сумму каждой строки данных для минимизации ошибок при передаче данных;
- в) большинство приведенных величин соответствуют их значениям на середину сеанса;
- г) дополнительные колонки данных, не включенных в величину контрольной суммы, для возможных комментариев и вспомогательных данных.

Каждая строка данных завершается символами «перевод каретки» и «новая строка». Для многоканальных GPS временных приемников выходной файл формируется для каждого канала.

### Структура исходных данных

GPS исходными данными являются отсчеты псевдодальности, получаемые каждую секунду. Данные псевдодальности являются результатом измерений положения лабораторного 1 pps сигнала относительно 1 pps сигнала, принятого со спутника. Каждое измеренное значение псевдодальности включает в себя усредненное, в зависимости от аппаратной реализации приемника, значение принятого сигнала. Время усреднения должно быть 1 с или менее.

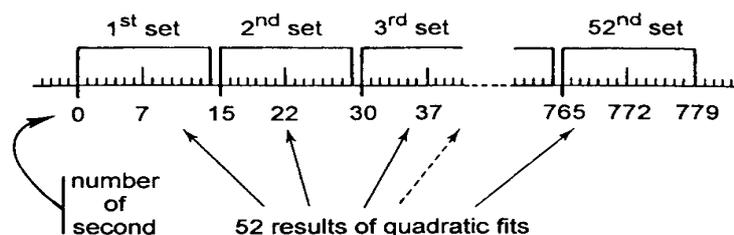
В дальнейшем каждое измерение псевдодальности будет связано с меткой времени MJD и UTC, соответствующей эпохе лабораторного 1 pps сигнала.



**Figure AI.1.** Successive pseudo-range data.

Рис. 58

Таким образом, время начала сеанса, задаваемое Международным расписанием GPS сеансов, является эпохой первого отсчета псевдодальности, который, на самом деле представляет сигнал, усредненный на интервале времени, заканчивающемся на указанный момент.



**Figure AI.2.** First dates of quadratic fits and dates of the results of quadratic fits.

Рис. 59

В соответствии с Приложением II полученные данные псевдодальности вначале сглаживаются кривой второго порядка блоками по 15 последовательных и неперекрывающихся отсчетов. Первый блок данных включает отсчеты в секунды 0,1,...,14, и результат приводится к середине интервала, т.е. к секунде 7. Второй включает отсчеты в секунды 15,16,..., 29 и приводится к секунде 22. Таким образом, каждый отсчет псевдодальности используется только единожды.

В результате в соответствии с Директивой 2 каждый полный сеанс включает 780 отсчетов псевдодальности 0 до 779 секунды, которые затем группируются в 52 блока по 15 отсчетов, сглаживаются кривой второго порядка, результаты приводятся на 7, 22, ..., 772 секунды. К блоку 52 отсчетов применяется затем линейное сглаживание, Приложение II.

## Приложение II

### Обработка исходных данных, полученных на сеансе в целом

Обработка выполняется следующим образом:

Исходные данные псевдодальностей датируются в виде последовательного ряда отсчетов с интервалом 1 с. Эпоха первого отсчета – номинальное значение начала сеанса. Она датируется в UTC и находится в выходном файле под аббревиатурой MJD и STTIME.

- i. Затем блоки по 15 последовательных и неперекрывающихся данных псевдодальностей сглаживаются кривой 2 порядка методом наименьших квадратов и датируются в соответствии с Приложением I.
- ii. Вычисляются перечисленные ниже поправки на моменты, соответствующие результатам (ii), и добавляются к этим результатам:
- iii-1 геометрическая задержка на основе координат антенны и передаваемых эфемерид;
- iii-2 ионосферная задержка на основе передаваемых параметров;
- iii-3 тропосферная задержка;
- iii-4 поправка на эффект Саньяка;
- iii-5 периодическая релятивистская поправка, связанная с эксцентриситетом орбиты GPS спутника;
- iii-6 L1-L2 передаваемая поправка;
- iii-7 задержка приемника;
- iii-8 задержки в антенном кабеле и кабеле местных часов.
- iv. Поправки часов для доступа к системному времени GPS, полученные на основе полинома второго порядка (обычно записываемого в виде  $a_0+a_1t+a_2t^2$ ), коэффициенты которого содержатся в навигационном сообщении GPS, вычисляются на моменты, соответствующие результатам (ii)

- и добавляются к этим результатам (iii).
- v. Номинальная продолжительность сеанса соответствует записи 780 исходных измерений. Число последовательных и неперекрывающихся блоков данных, трактуемых в соответствии (ii), (iii) и (iv), тогда равно 52 (Приложение I). Для полного сеанса его продолжительность, аббревиатура (TRKL) тогда равна 780 с (Приложение I).
  - vi. В завершение сеанса производится несколько оценок линий регрессии первого порядка.
    - vi-a. Линия с использованием результатов (iii), которая дает оценку измеряемой величины, REFSV, на середину сеанса и наклон этой линии SRSV.
    - vi-b. Линия с использованием результатов (iv), которая дает оценку измеряемой величины, REFGPS, на середину сеанса, наклон этой линии SRGPS и рассеяние (rms) конкретных отсчетов DSG относительно линии.
    - vi-c. Линия с использованием результатов (iii-2), которая дает оценку величины моделируемой ионосферной задержки, MDIO, на середину сеанса и наклон этой линии SMDI.
    - vi-d. Линия с использованием результатов (iii-3), которая дает оценку величины моделируемой тропосферной задержки, MDTR, на середину сеанса и наклон этой линии SMDT.
    - vi-e. Линия, которая проводится с использованием результатов ионосферной измерительной системы на даты, соответствующие результатам (ii), если таковая имеется, и дает оценку величины измеренной ионосферной задержки, MSIO, на середину сеанса, наклон этой линии SMSI и рассеяние (rms) конкретных отсчетов ISG относительно линии.

### Приложение III

#### **CGGTTS GPS формат файла данных версия 01**

Формат файла данных, версия 01 состоит:

- i. заголовок файла с детальной информацией о GPS оборудовании (строки 1-16);
- ii. пустая строка (строка 17);
- iii. заголовочная строка с аббревиатурами используемых величин (строка 18);
- iv. строка с описанием единиц приведенных величин (строка 19);
- v. последовательность строк данных (строки 20, 21, 22, ... (n-1), n, и т.д.); каждая строка соответствует одному сеансу. Сеансы выстраиваются в хронологической последовательности, сеанс в строке n происходит после сеанса в строке (n-1). Каждая строка ограничена 128 символами и заканчивается символами «возврат каретки» и «перевод строки».

```

CGTTS GPS DATA FORMAT VERSION = 01
REV DATE = 2002-08-07
RCVR = AOS SRC TTS-2 014 1999 VERSION 3
CH = 08
IMS = 99999
LAB = USNO
X = +1112161.10 m
Y = -4842855.43 m
Z = +3985494.35 m
FRAME = ITRF97
COMMENTS = NO COMMENTS
INT DLY = -55.1 ns
CAB DLY = 172.0 ns
REF DLY = 0.0 ns
REF = UTC(USNO)
CKSUM = 1B

FRN CL MJD STTIME TRKL ELV AZTH REFSV SRSV REFGPS SRGPS DSG IOE MDTR SMDT MDIO SMDI MSIO SMSI ISG CK
      hhmsss s .ldg .ldg .lns .lps/s .lns .lps/s .lns .lns.lps/s.lns.lps/s.lns.lps/s.lns
3 FF 53945 000600 780 316 505 -1993473 +110 -19 +292 21 203 155 +30 88 +10 9999 9999 999 CF 3
8 FF 53945 000600 780 410 3136 +739425 +39 -75 +51 17 219 124 -18 80 -10 9999 9999 999 B9 5
11 FF 53945 000600 780 307 1608 -3419318 -37 -65 -59 17 214 159 -32 102 -15 9999 9999 999 F3 1
13 FF 53945 000600 780 249 2119 -810191 -51 -59 -81 20 37 193 +49 122 +20 9999 9999 999 C6 2
19 FF 53945 000600 780 648 533 -37528 -66 -29 -92 16 26 90 +5 60 +3 9999 9999 999 70 4
27 FF 53945 000600 780 693 2987 -602049 -45 -108 -63 15 13 87 -4 58 -2 9999 9999 999 AD 6
28 FF 53945 000600 780 210 2820 -221656 -14 +23 -6 21 105 227 -50 129 -16 9999 9999 999 B5 8
3 FF 53945 003400 780 206 529 -1993136 +165 +12 +346 24 203 231 +67 107 +15 9999 9999 999 E6 3
8 FF 53945 003400 780 532 3093 +739488 +39 -30 +51 18 219 102 -9 63 -6 9999 9999 999 A4 5
11 FF 53945 003400 780 424 1531 -3419347 -11 -58 -33 17 214 121 -16 76 -9 9999 9999 999 C7 1
    
```

## CGGTTS GPS формат файла данных версия 02

```

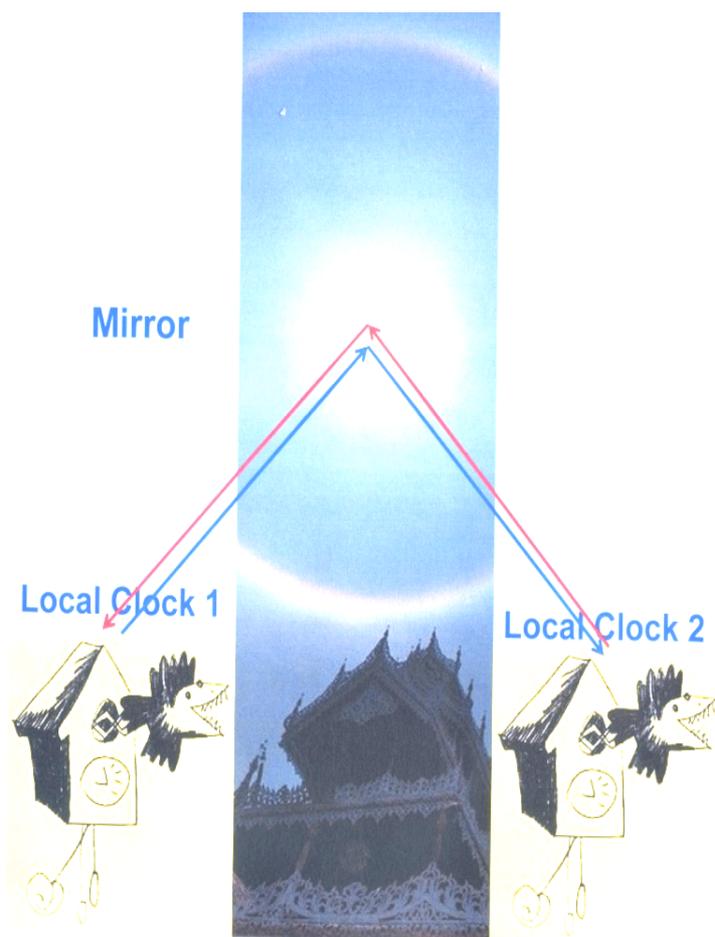
CGTTS GPS/GLONASS DATA FORMAT VERSION = 02
REV DATE = 1996-10-20
RCVR = SRC AOS TTS-3, SN:0026, 2004, HW:80.5, SW:1.129 2011/09/26
CH = 20 (dual frequency, GPS+GLONASS)
IMS = SRC AOS TTS-3, SN:0026, 2004, HW:80.5, SW:1.129 2011/09/26
LAB = SU
X = +2845462.99 m (GPS, GLONASS)
Y = +2160954.22 m (GPS, GLONASS)
Z = +5265990.78 m (GPS, GLONASS)
FRAME = ITRF, PZ-90->ITRF Dx = 0.0 m, Dy = 0.0 m, Dz = 2.0 m, ds = 0.0, Rx = 0.0, Ry = 0.0, Rz = -0.000002
COMMENTS = EXTRA:1, NO COMMENTS
INT DLY = -24.40 ns (GPS), -128.20 ns (GLONASS)
CAB DLY = 142.80 ns (GPS), 142.80 ns (GLONASS)
REF DLY = 186.60 ns
REF = 110
CKSUM = D1

SAT CL MJD STTIME TRKL ELV AZTH REFSV SRSV REFSYS SRSYS DSG IOE MDTR SMDT MDIO SMDI MSIO SMSI ISG FR HC FRC CK REFUTC DUTC
      hhmsss s .ldg .ldg .lns .lps/s .lns .lps/s .lns .lns.lps/s.lns.lps/s.lns.lps/s.lns
29 FF 57097 000200 780 79 1305 -6000950 -33 -19717 -58 10 66 562 435 142 21 196 19 26 0 0 LIC 43 -19729 -12
7 FF 57097 000200 780 95 3319 -4499714 -31 -19845 -60 14 81 463 58 137 4 61 -14 36 0 0 LIC 16 -19857 -12
13 FF 57097 000200 780 213 484 949634 42 -19808 76 9 34 217 2 106 1 83 -10 29 0 0 LIC B8 -19820 -12
27 FF 57097 000200 780 426 2961 -601185 0 -19767 -26 8 6 117 -16 70 -8 196 0 27 0 0 LIC D2 -19779 -12
    
```

Формат файла данных, версия 02 состоит:

- i. заголовок файла с детальной информацией о GPS оборудовании (строки 1-16);
- ii. пустая строка (строка 17);
- iii. заголовочная строка с аббревиатурами используемых величин (строка 18);
- iv. строка с описанием единиц приведенных величин (строка 19);
- v. последовательность строк данных (строки 20, 21, 22, ... (n-1), n, и т.д.); каждая строка соответствует одному сеансу. Сеансы выстраиваются в хронологической последовательности, сеанс в строке n происходит после сеанса в строке (n-1). Каждая строка ограничена 128 символами и заканчивается символами «возврат каретки» и «перевод строки».

**Дуплексные методы**  
*Идея*



*Бывает нечто, о чем говорят: "смотри, вот это новое"; но это было уже в веках, бывших прежде нас.*

*Книга Екклесиаста 1:10*

Рис. 60

$$\text{ОТСЧЕТ 1} = \text{LC1} - \text{LC2} - \tau_2$$

$$\text{ОТСЧЕТ 2} = \text{LC2} - \text{LC1} - \tau_1$$

$$\text{LC1} - \text{LC2} = \frac{1}{2}[(\text{ОТСЧЕТ 1} - \text{ОТСЧЕТ 2}) - (\tau_1 - \tau_2)]$$

**Дуплексные методы. Более подробно.**

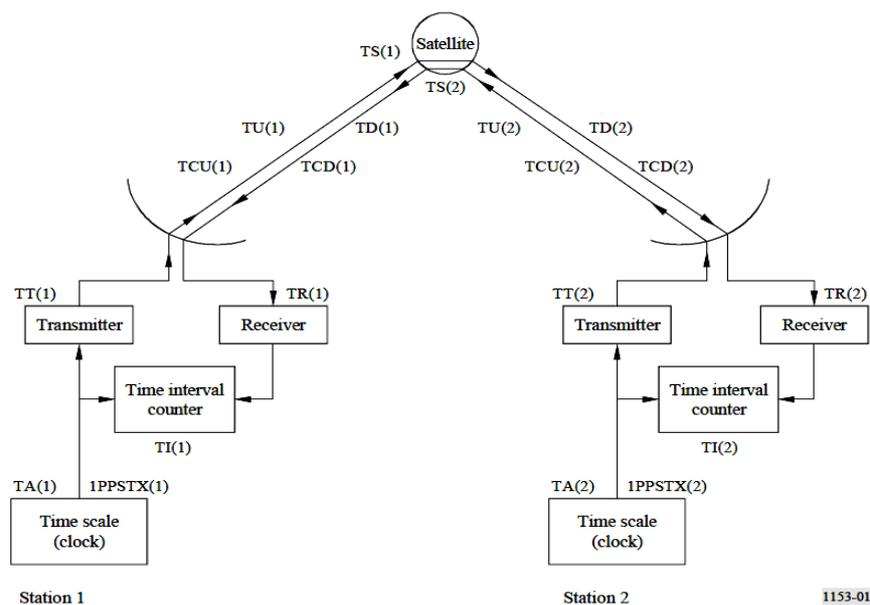


Рис. 61

TA(k): шкала времени сигнала 1PPSTX в опорной точке станции k, k = 1/2 соответственно:

П(k): отсчет на измерителе интервалов времени.

TT(k): задержка передатчика, включая модем.

TR(k): задержка приемника, включая модем.

TU(k): задержка распространения вверх.

TD(k): задержка распространения вниз.

TS(k): задержка на спутнике.

TCU(k): Саньяк эффект вверх.

TCD(k): Саньяк эффект вниз.

Разность шкал времени TA(1) - TA(2) между станциями 1 и 2 определяется следующим образом.

Отсчет TIC станции 1:

$$П(1) = TA(1) - TA(2) + TT(2) + TU(2) + TCU(2) + TS(2) + TD(1) + TCD(1) + TR(1).$$

Отсчет TIC станции 2:

$$П(2) = TA(2) - TA(1) + TT(1) + TU(1) + TCU(1) + TS(1) + TD(2) + TCD(2) + TR(2).$$

Вычитая отсчеты ПИС станции ПИ(2) из аналогичных ПИ(1), получим:  
 $PI(1)-PI(2) = 2 \times TA(1) - 2 \times TA(2) + TT(2) - TT(1) + TU(2) - TU(1) + TS(2) - TS(1) + TD(1) - TD(2) + TR(1) - TR(2) + TCD(1) - TCU(1) - TCD(2) + TCU(2)$ .

Тогда разность шкал:  $TA(1) - TA(2) =$

$\frac{1}{2} \{ [PI(1) - PI(2)] \}$  (разность отсчетов ПИС).

$+ [TS(1) - TS(2)]$  (разность задержек спутника).

$+ [TU(1) - TD(1)]$  (разность задержек вверх/вниз станции 1).

$- [TU(2) - TD(2)]$  (разность задержек вверх/вниз станции 2).

$+ [TT(1) - TR(1)]$  (разность задержек передача/приём станции 1).

$- [TT(2) - TR(2)]$  (разность задержек передача/приём станции 2).

$- [TCD(1) - TCU(1)]$  (поправка на эффект Саньяка станции 1).

$+ [TCD(2) - TCU(2)]$  (поправка на эффект Саньяка станции 2).

Последние семь членов являются поправками на невязность. Поправки должны быть определены и сгруппированы на каждой станции. Каждая станция обменивается с партнером отсчетами ПИ(k) и оценками поправок.

Невязные факторы будут рассмотрены отдельно.

### Эффекты невязности

#### *Невязность спутника*

Если приёмно/передающая антенна и канал приёмно/передающего устройства являются общими для обоих сигналов, – задержки равны, т.е.  $TS(1) = TS(2)$ . Если это не так: разные частоты вверх и вниз, разные приёмно/передающие устройства или разные зоны покрытия, в этом случае по меньшей мере  $TS(1) - TS(2)$  должна быть определена тем или иным образом.

#### *Эффект Саньяка*

Вследствие движения наземных станций и спутника, а равно сигналов в неинерциальной системе вращающейся Земли должны быть учтены релятивистские эффекты. Оценка поправки для однонаправленного распространения сигнала от спутника s до станции k на Земле дается выражением:

$$TCD(k) = (\Omega/c^2) \times [Y(k) \times X(s) - X(k) \cdot Y(s)],$$

где:

$\Omega$  - скорость вращения Земли =  $7.2921 \cdot 10^{-5}$  rad/s,

c - скорость света = 299 792 458 m/s,

X(k) - геоцентрическая X-координата станции,

$k(m) = r \cos[LA(k)] \cdot \cos[LO(k)],$

X(s) - геоцентрическая X-координата спутника,

$s(m) = R \cos[LA(s)] \cdot \cos[LO(s)],$

$Y(k)$  - геоцентрическая  $Y$ -координата станции,

$$k(m) = r \cos[LA(k)] \cdot \sin[LO(k)],$$

$Y(s)$  - геоцентрическая  $Y$ -координата спутника,

$$s(m) = R \cos[LA(s)] \cdot \sin[LO(s)],$$

$r$  - радиус Земли = 6 378 140 м,

$R$  - радиус орбиты спутника = 42 164 000 м,

$LA$  – широта,

$LO$  - долгота.

Поскольку для геостационарного спутника  $LA(s) = 0$ ,

$$\text{то } TCD(k) = (\Omega/c^2) \cdot R \cdot r \cdot \cos[LA(k)] \cdot \sin[LO(k) - LO(s)].$$

Тогда полная поправка для опорных часов 1 относительно удаленных 2:

$$TC(12) = \frac{1}{2} \{TCU(1) + TCD(2) - [TCU(2) + TCD(1)]\}.$$

Поскольку знак поправки зависит от направления распространения сигнала вверх/вниз, то:  $TCU(k) = -TCD(k)$  и соответственно

$$TC(12) = -TCD(1) + TCD(2).$$

Численный пример канала Европа (VSL)-США(USNO) спутник на долготе  $307^\circ E$ :

VSL: *NMi Van Swinden Laboratory, Delft, the Netherlands,*

$LA(VSL) = 52^\circ N$ ,  $LO(VSL) = 4^\circ E$ ,  $LO(s) = 307^\circ E$ , разность долгот

$LO = 57^\circ$ ,

$TCD(VSL) = +112.42 \text{ ns}$ ,

USNO: *US Naval Observatory, Washington DC, United States of America,*

$LA(USNO) = 39^\circ N$ ,  $LO(USNO) = 283^\circ E$ ,  $LO(s) = 307^\circ E$ , разность долгот  $LO = -24^\circ$ ,

$TCD(USNO) = -68.83 \text{ ns}$ ,

**$TC(VSL \rightarrow USNO): -TCD(VSL) + TCD(USNO) = -181.25 \text{ ns}$ ,**

**$TC(USNO \rightarrow VSL): -TCD(USNO) + TCD(VSL) = +181.25 \text{ ns}$ .**

*Невзаимность, связанная с движением спутника относительно Земли*

Пути распространения сигналов  $1 \rightarrow 2$  и  $1 \leftarrow 2$  могут быть несколько невзаимными из-за остаточного движения спутника относительно Земли или неодномоментности прихода сигналов на спутник из-за несимметричного расположения станций. Последнее может быть скомпенсировано путем ввода дополнительной задержки ( $< 17 \text{ ns}$ ) в момент выхода сигнала с антенны передатчика. Если это не сделано, то из-за невзаимности ошибка может достигать  $1 \text{ ns}$  и должна быть учтена при обработке.

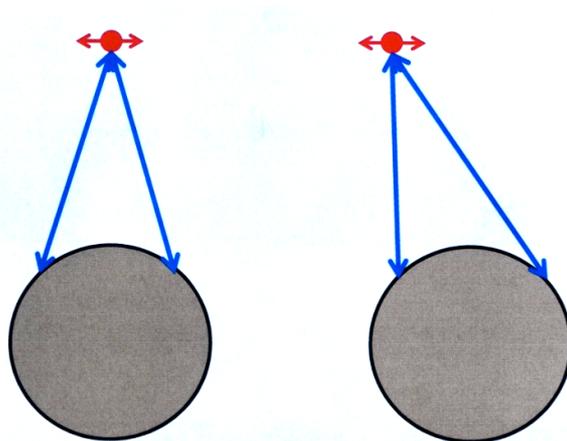


Рис. 62

### *Влияние ионосферы*

Поскольку несущие частоты сигналов вверх и вниз отличаются, они испытают различные задержки в ионосфере:

$$40.3 \times (TEC/c) \times (1/f_d^2 - 1/f_u^2),$$

где:

TEC - полное число электронов по пути сигнала,

c - скорость света.

Численный пример:

для большого количества электронов  $TEC \sim 10^{18}$  electrons/m<sup>2</sup> и частот  $f_u = 14.5$  ГГц и  $f_d = 12.5$  ГГц величина этой задержки равна  $0.859$  нс -  $0.639$  нс =  $0.220$  нс. Таким образом, величина поправки  $\frac{1}{2}[TU(k) - TD(k)]$  менее -  $0.11$  ns.

### *Влияние тропосферы*

Тропосферные задержки зависят от высоты спутника над горизонтом, относительной влажности, давления и температуры, но для частот до 20 ГГц эта задержка не зависит от частоты, а потому равна для сигналов вверх/вниз, что не требует введения поправки.

## **Измерение задержек в наземных станциях**

В каждой станции должны быть определены разности задержек приёма/передачи  $[TT(k) - TR(k)]$ , включая смесители вверх/вниз, а также модуля-

торы/демодуляторы (модемы), фидеры и т.д. Это может быть сделано путем:

- совмещения обеих станций;
- поочередного совмещения станций 1 и 2 с транспортируемой станцией;
- использования имитатора сигнала спутника и набора калиброванных кабелей.

Последнее решение наиболее дешевое и может использоваться часто. Суть его в калибровке вспомогательных фидеров, измерении суммарных задержек приёма/передачи, измерения задержек суммарных задержек вспомогательных фидеров и получения задержек приёма/передачи на основании этих измерений и вычислений.

Также должны быть определены задержки на приём/передачу для модема. Это может быть проведено разными способами:

- совмещения обоих модемов и измерения суммарных задержек на передачу одного модема и на прием другого;
- измерения суммарной задержки на приём/передачу путём подачи ПЧ выходного сигнала на ПЧ вход. Задержка передачи может быть измерена между 1 pps передаваемым сигналом и соответствующей инверсией фазы ПЧ выхода модема с помощью осциллографа. Задержка приёма затем может быть вычислена по разности измеренных суммарной задержки и задержки передачи.



Рис. 63

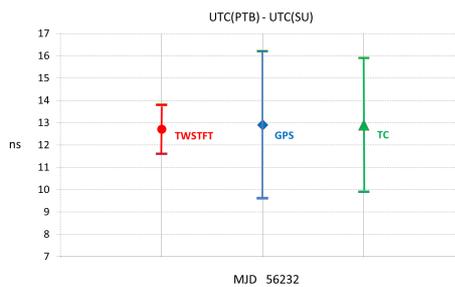


Рис. 64

### Обработка данных

Для получения разности между UTC(k) участвующих лабораторий следует внимательнейшим образом измерить и документировать задержки в сигнальных цепях лабораторий. В ряде лабораторий UTC(k) является расчетной шкалой времени. Во всех лабораториях имеются ведущие часы (master clock, clock(k)), которые представляют физическую реализацию шкалы времени. И на сигналы которых формируется система поправок [UTC(k)-clock(k)], которые обеспечивают связь ведущих часов с UTC(k). Вместе с тем есть задержка [clock(k)-ref(k)], связанная с длиной фидеров между модемом и clock(k). Модем, в свою очередь, генерирует свою внутреннюю шкалу времени 1PPSTX, которая связана с излучаемым сигналом, поправка на которую [ref(k)-1PPSTX(k)] относительно ref(k) также должна быть измерена.

Таким образом, для определения разности UTC(k) участвующих лабораторий следует принять во внимание следующие соотношения между [TA(1)-TA(2)]:

$$\begin{aligned} \text{UTC}(1)-\text{UTC}(2) &= \text{TA}(1)-\text{TA}(2) - \\ &- [\text{UTC}(1)-\text{clock}(1)]- [\text{clock}(1)-\text{ref}(1)]- [\text{ref}(1)-1\text{PPSTX}(1)] \\ &+ [\text{UTC}(2)-\text{clock}(2)]+[\text{clock}(2)-\text{ref}(2)]+[\text{ref}(2)-1\text{PPSTX}(2)]. \end{aligned}$$

#### О точности и стабильности результатов

Для корректного оценивания точности и стабильности результатов по сравнению удаленных часов с помощью дуплексных методов следует руководствоваться Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008, а также Рекомендацией ITU-R TF.538 «Measures for random instabilities in frequency and time (phase)».