



Международное бюро мер и весов

Реализация и поддержание UTC

Элиса Фелиситас Ариас



Развитие радиосвязи в свете решения ВКР-12
Санкт-Петербург, 6–8 июня 2012 года

Международное бюро мер и весов



Шкалы времени, которые поддерживаются в BIPM

Международное атомное время (TAI)

- ✓ Непрерывная шкала
- ✓ Единицей измерения интервала времени является секунда системы СИ
- ✓ Рассчитывается ежемесячно в BIPM
- ✓ Не воспроизводится генераторами, не транслируется

Всемирное координированное время (UTC)

- ✓ Нарушения непрерывности шкалы со скачком в 1 секунду
- ✓ Единицей измерения интервала времени является секунда системы СИ
- ✓ Рассчитывается ежемесячно в BIPM на основе TAI
- ✓ Воспроизводится генераторами UTC(k), транслируется

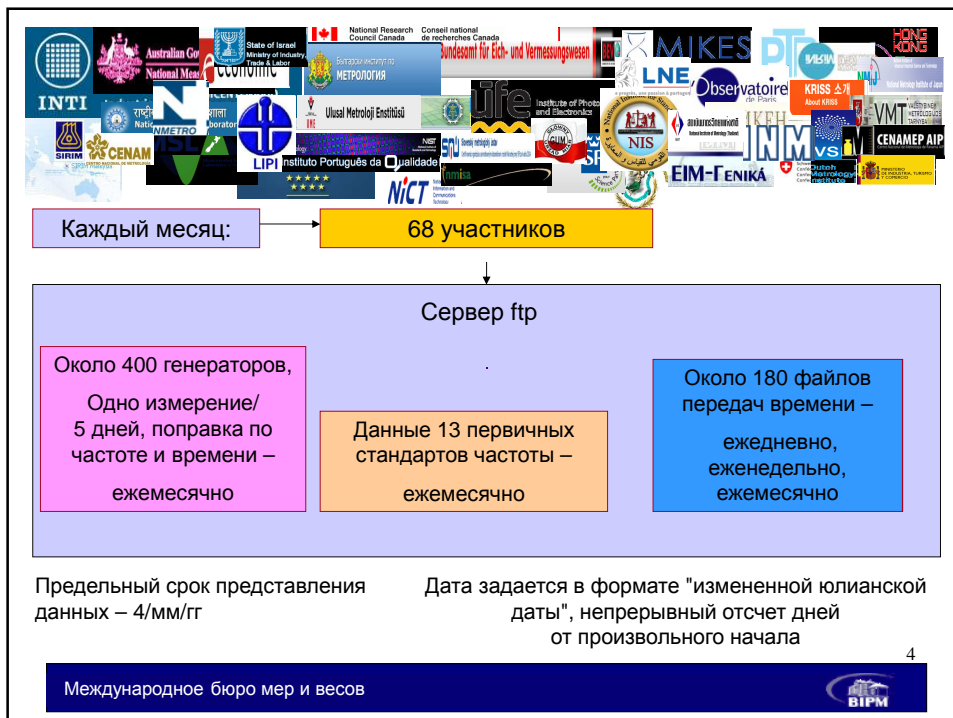
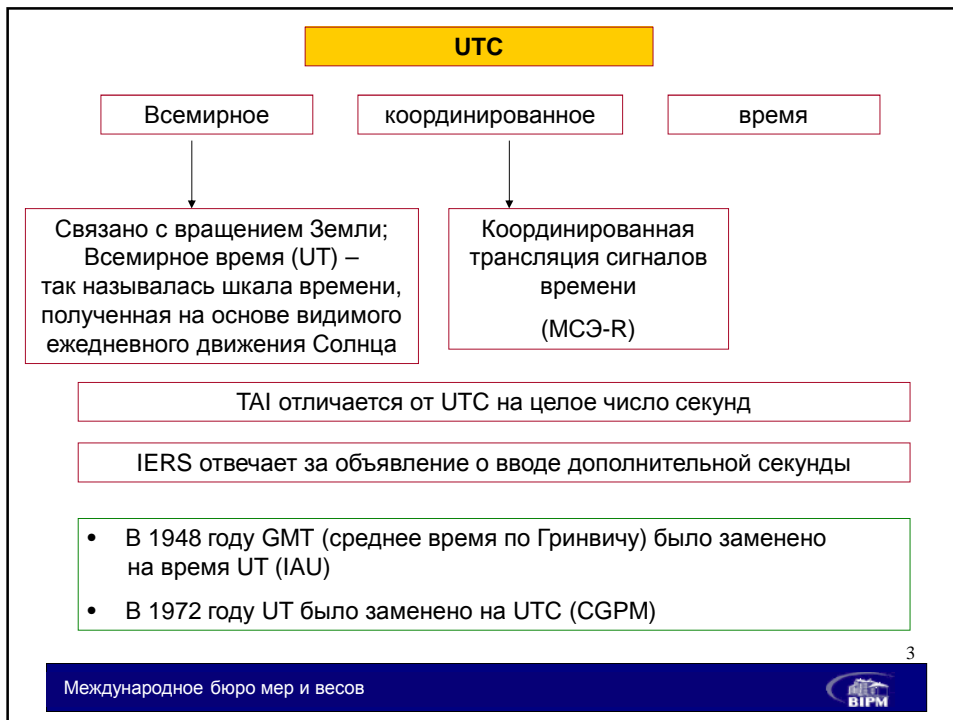
Земное время (TT(BIPM))

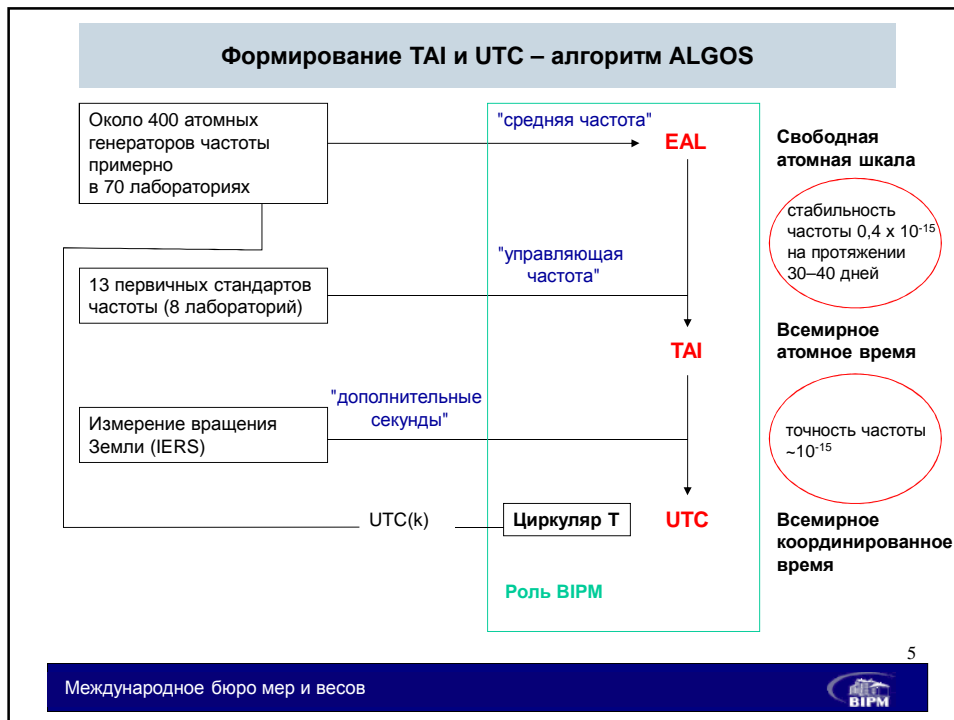
- ✓ Непрерывная шкала
- ✓ Единицей измерения интервала времени является секунда системы СИ
- ✓ Рассчитывается ежегодно в BIPM
- ✓ Ежемесячные предсказания
- ✓ Не воспроизводится генераторами, не транслируется

2

Международное бюро мер и весов







Первый этап: от показаний генераторов до отличий в генераторах

- Дистанционное сравнение генераторов с помощью методов передачи сигналов времени

- Глобальные навигационные спутниковые системы
 - GPS (настоящее время)
 - ГЛОНАСС (настоящее время)
 - Galileo, BeiDou (будущее)

Видимые спутники = 12

- Двухсторонняя спутниковая передача сигналов времени и частоты

6

Международное бюро мер и весов

Измерение общего внешнего сигнала с помощью каждого генератора: ГНСС

На каждой станции производится измерение

- (Локальный генератор – спутниковый генератор)

Далее существует два решения

- Работа по общему видимому (common-view)

$$UTC(PTB) - UTC(NICT) = [UTC(PTB) - Sat1] - [UTC(NICT) - Sat1]$$

• Работа по всем видимым (all-in-view)

$$UTC(PTB) - UTC(AUS) = [UTC(PTB) - Sat1] - [UTC(AUS) - Sat2] + [Sat1 - Sat2]$$

при этом значение $[Sat1 - Sat2]$ определяется с помощью внешнего глобального анализа

7

Международное бюро мер и весов

Передача сигналов времени в ГНСС

- Калиброванные приемники
- Работа по общему видимому/ работа по всем видимым
- Поправка на движение спутника по орбите
- Задержки распространения сигнала
 - в ионосфере
 - в тропосфере
- Квазинепрерывные наблюдения
- Условия окружающей среды ограничивают показатели работы многоканальных приемников

↓

Уменьшается погрешность

Одноканальная
одноточастотная передача

Многоканальная
одноточастотная передача

Многоканальная
двухчастотная передача


8

Международное бюро мер и весов

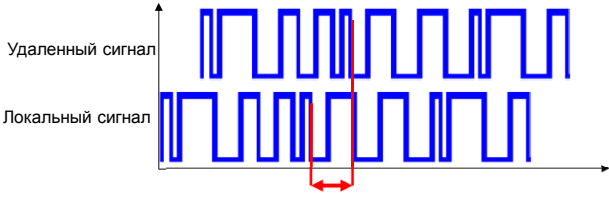
Сравнение времени путем корреляции: пример кодового сигнала ГНСС

Типовая погрешность

- $\sigma_c \approx k/(B/SNR)$, где B – ширина полосы передаваемого сигнала, т. е. $1/B$ – это длина чипа
- GPS: $B = 1/10$ МГц $\Rightarrow \sigma_c \approx 10/1$ нс

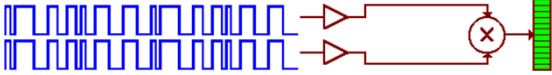


Удаленный сигнал




Локальный сигнал

GPS/GLONASS
SC, MC, P3



9

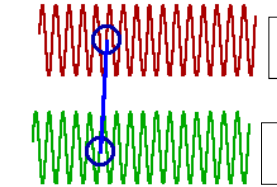
Международное бюро мер и весов 

Сравнение частоты: пример фазы сигнала ГНСС

Непрерывное сведение удаленного и локального сигналов

- Погрешность фазы $\sigma_\phi \approx 1/(f/SNR)$, где f – частота передачи
- GPS: $f = 1,5$ ГГц $\Rightarrow \sigma_\phi \approx 1$ пс

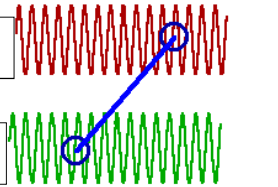
Помеченные циклы в момент времени А




Удаленный сигнал

Локальный сигнал

Помеченные циклы в момент времени В



10

Международное бюро мер и весов 

Двухсторонняя спутниковая передача сигналов времени и частоты (TWSTFT)

- Простое вычисление сдвигов тактовой частоты генераторов
- Прямая связь между генераторами
- Нет необходимости в моделях
- Эффекты в генераторах можно отделить от других эффектов
- Калиброванные приемо-передающие станции
- Спутник связи
 - На борту спутника не используется генератор
 - Геостационарная орбита



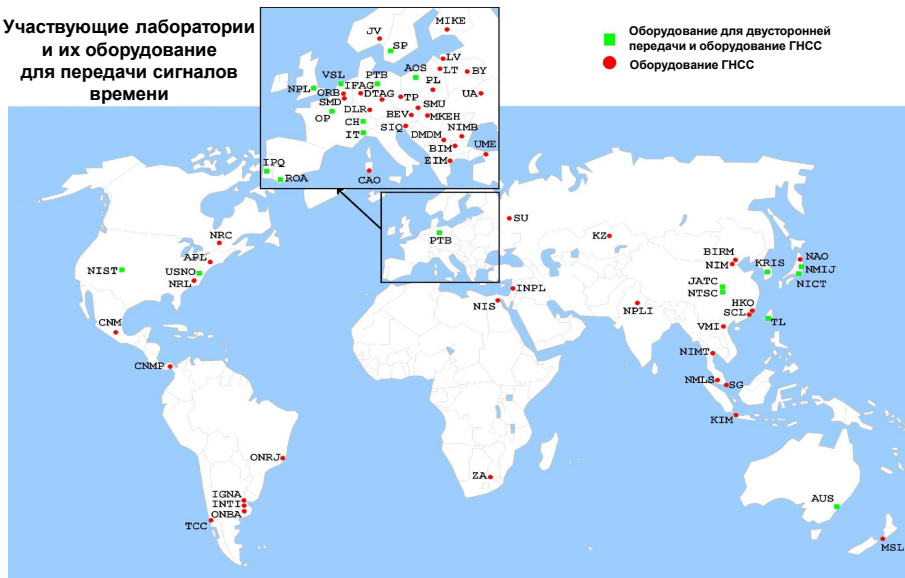
TWSTFT, TWPPP

Метод измерения, используемый для сравнения двух генераторов, расположенных в удаленных точках.

11



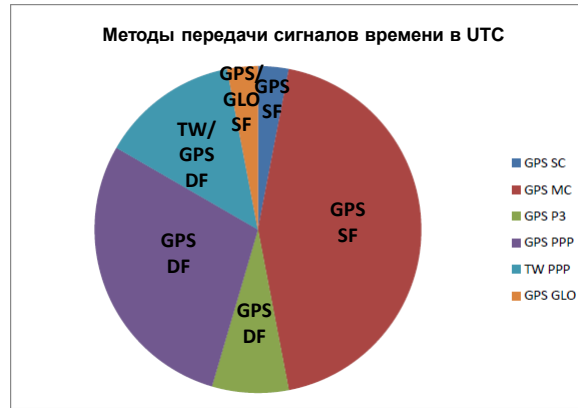
Участвующие лаборатории и их оборудование для передачи сигналов времени



12



Методы передачи сигналов времени в UTC (октябрь 2011 г.)

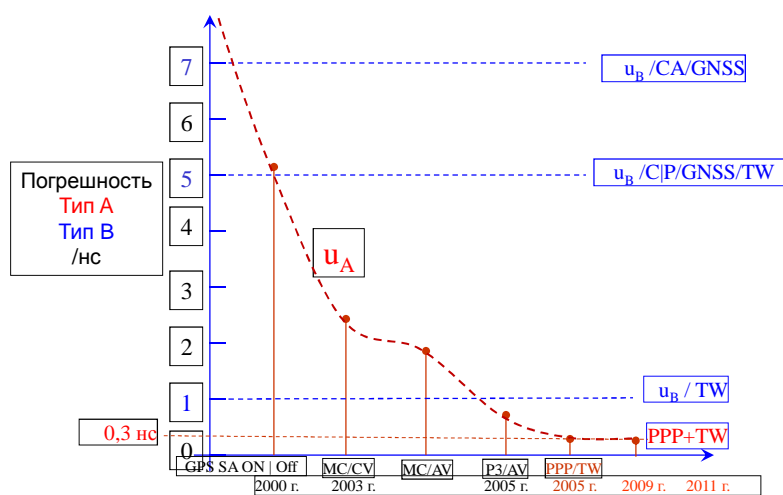


13

Международное бюро мер и весов



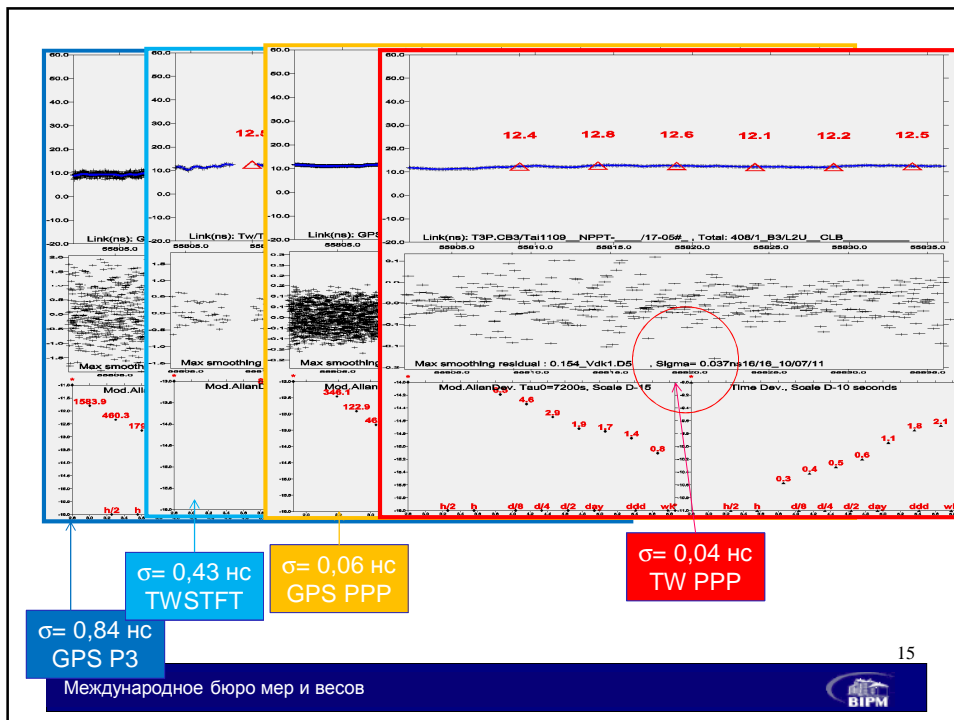
Погрешность передачи сигналов времени в UTC



14

Международное бюро мер и весов





15

Генераторы в системе UTC

Стабильность 7×10^{-16} (1 день)

Алгоритм поддержания стабильности

Стабильность 1×10^{-14} (1 день)
Точность 5×10^{-13}

Точность порядка 10^{-16}

Алгоритм поддержания точности

16

Международное бюро мер и весов

Алгоритм поддержания стабильности

В идеальной ситуации:

- одновременные показания генераторов x_i ;
- фиксированный набор задействованных генераторов;
- непрерывная работа генераторов

Следовательно, $EAL(t) = \{x_i\}(t)$ (взвешенное среднее)

В реальной ситуации:

- меняются весовые коэффициенты;
- прерывается работа генераторов, происходит изменение частоты генераторов;
- появляются новые генераторы

Следовательно, $EAL(t) = \{x_i\}(t) + A + B(t-t_0)$

17

Международное бюро мер и весов



EAL: Алгоритм взвешивания

Вес, присваиваемый тому или иному генератору, отражает его долговременную стабильность, поскольку цель состоит в получении взвешенного среднего, которое более стабильно в долговременной перспективе, чем каждый из задействованных элементов.

В алгоритмах формирования шкал времени весовые коэффициенты генераторов, как правило, выбираются обратно пропорциональными статистическим величинам, которые характеризуют их стабильность частоты, таким как дисперсия частоты (классическая дисперсия, дисперсия Аллана, ...)

EAL: Алгоритм с предсказанием

При формировании шкалы времени важную роль играет предсказание поведения атомных генераторов.

Предсказание помогает избежать скачков частоты в шкале времени или свести их к минимуму, в случае если один из генераторов добавляется в ансамбль или удаляется из него, либо если меняется весовой коэффициент этого генератора.

18

Международное бюро мер и весов



..... EAL (продолжение)

Система уравнений, решаемых в алгоритме ALGOS:

где $x_i(t) = EAL(t) - h_i(t)$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N w_i x_i(t) = \sum_{i=1}^N w_i h_i'(t) \\ x_i(t) - x_j(t) = x_{i,j}(t) \end{cases}$$

- N – число атомных генераторов
- w_i – относительный весовой коэффициент генератора H_i
- $h_i(t)$ – показание генератора H_i в момент времени t
- $h_i'(t)$ – предсказание показания генератора H_i

$$\sum_{i=1}^N w_i = 1$$

Решение имеет вид:

$$x_j(t) = EAL - h_j = \sum_{i=1}^N w_i [h_i'(t) - x_{i,j}(t)]$$

Вес

Предсказание

19



..... Алгоритм взвешивания

Весовой коэффициент, присваиваемый генератору H_i , обратно пропорционален отдельной классической дисперсии σ_i^2

$$\omega_i = \frac{1/\sigma_i^2}{\sum_{i=1}^N 1/\sigma_i^2}$$

$$\text{Верхний лимит} \Rightarrow \omega_{\max} = \frac{A}{N}$$

$A = 2,5$ – эмпирическая константа

$$\sum_{i=1}^N w_i = 1$$

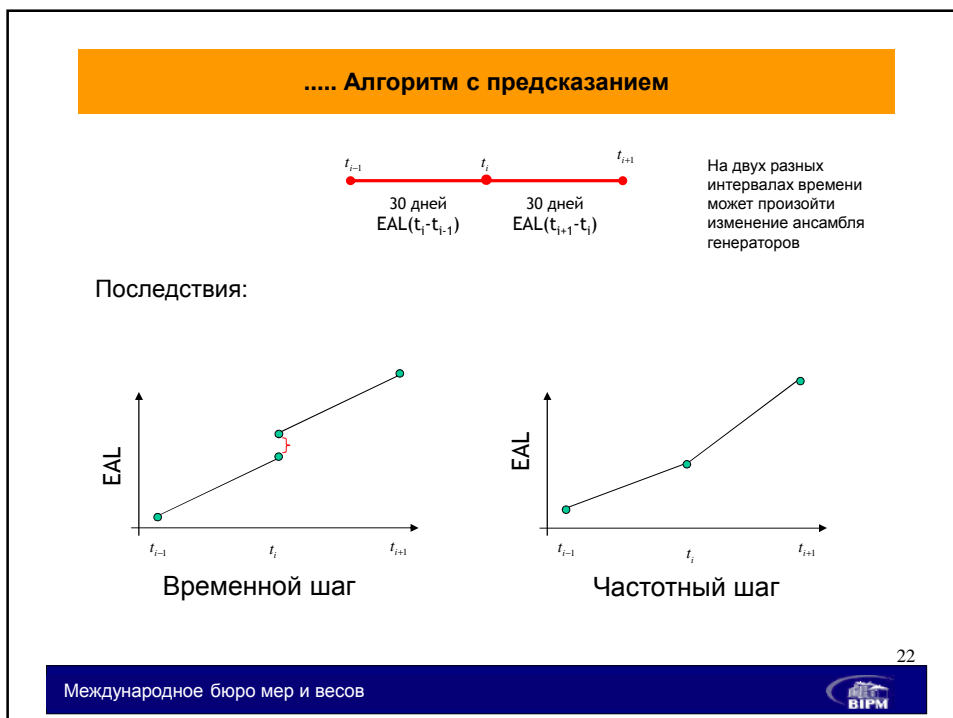
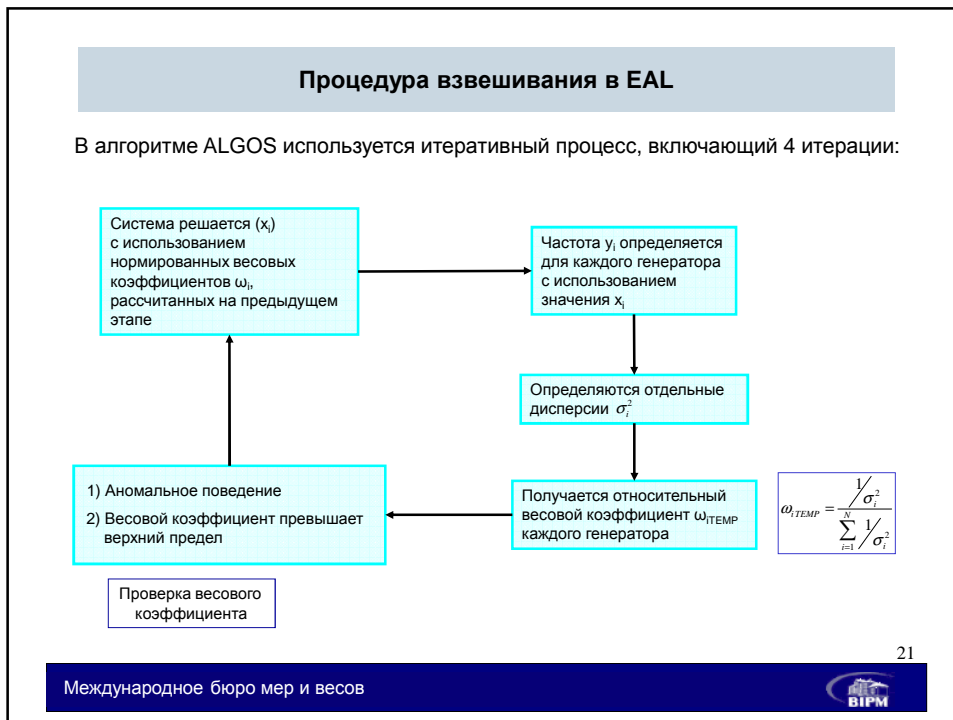
Проверяются две конкретные ситуации:

- 1) Имеет место аномальное поведение генератора H_i .
- 2) Весовой коэффициент превышает значение верхнего предела, установленного для того, чтобы не допустить преобладающего влияния того или иного генератора.

Весовой коэффициент, присваиваемый генератору H_i , вычисляется относительно EAL на основе значений частот этого генератора, определяемых в течение текущего интервала продолжительностью 30 дней, а также в течение пяти прошедших последовательных интервалов продолжительностью 30 дней. Таким образом, при определении весовых коэффициентов используются результаты измерения генераторов, охватывающие период продолжительностью один год.

20





Поведение генератора

Для атомных генераторов характерно различие в поведении:

- 1) Детерминистское поведение
 - Линейное – цезиевые генераторы
 - Квадратичное – водородный мазер (генератор)
- 2) Стохастическое поведение

В качестве статистического метода определения нестабильностей, вносимых стохастической составляющей, используется:

дисперсия Аллана

23

Алгоритм с предсказанием в EAL

Поправочный член $h_i'(t)$ для генератора H_i равен:

Поправка по времени

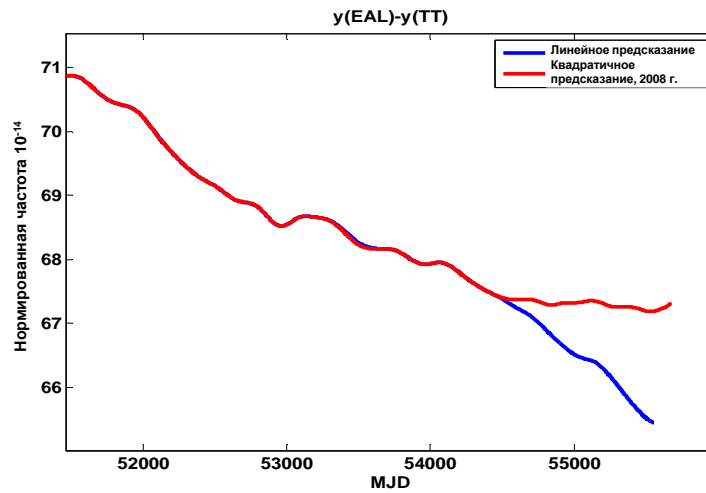
Частота

$$h_i'(t) = a_i(t_i) + B_{ip}(t)(t - t_i)$$

- $a_i(t_i)$ – оценка поправки по времени для генератора H_i относительно EAL на дату t_i
- $B_{ip}(t)$ – оценка частоты генератора H_i относительно EAL, предсказанная на период $[t_i, t]$
- $C_{ip}(t)$ – оценка ухода частоты генератора H_i относительно опорной частоты, предсказанная на период $[t_i, t]$

24

Время EAL изменилось относительно ТТ (BIPM) на величину ухода порядка 4×10^{-16} /месяц. В новой модели с предсказанием частоты прекращается уход частоты и повышается стабильность EAL.

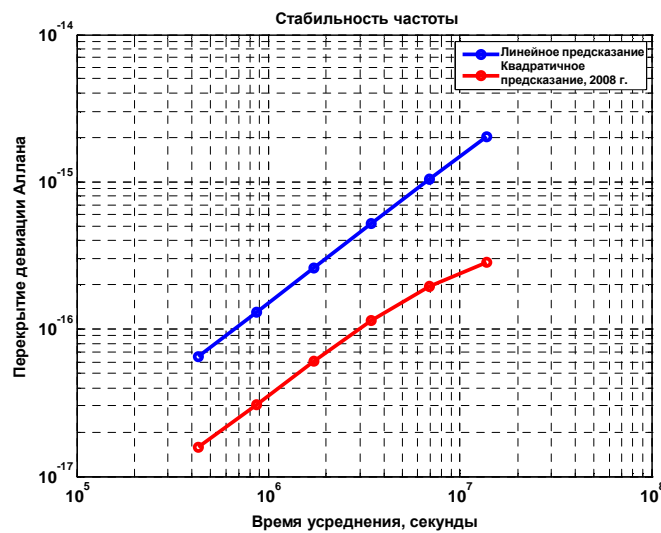


25

Международное бюро мер и весов



Повышение стабильности частоты в EAL с помощью новой модели с предсказанием частоты генератора (начиная с июля 2011 г.)



26

Международное бюро мер и весов



Переход от EAL к TAI

EAL – это автономная шкала атомного времени, оптимизированная для использования в качестве стабильной шкалы времени в долгосрочной перспективе.

Оценка частоты в EAL ($f(\text{EAL})$) осуществляется с помощью первичных стандартов частоты (PFS).

Предполагается, что в TAI будет обеспечена стабильность (за счет EAL) и точность (за счет PFS).

Точность достигается за счет управления частотой:

$$f(\text{TAI}) = f(\text{EAL}) + \text{управляющая частота}$$

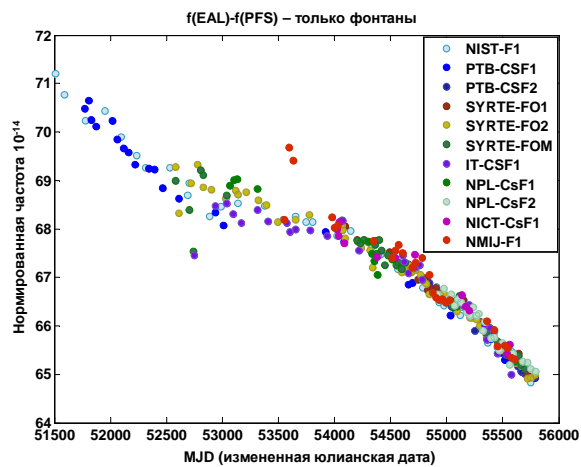
27

Международное бюро мер и весов



Первичные стандарты частоты

Первичные стандарты частоты – 13 в течение последних пяти лет (KRISS, INRIM, LNE-SYRTE, NICT, NIST, NMIJ, NPL, PTB), 11 являются цезиевыми фонтанами



28

Международное бюро мер и весов



ТТ(BIPM)

BIPM вычисляет не в реальном времени время ТТ(BIPM), которое базируется на взвешенном среднем оценок частоты TAI, полученных с помощью PFS.

ТТ(BIPM) вычисляется не в реальном времени и уточняется каждый год.

Предсказания ТТ(BIPM) вычисляются ежемесячно.

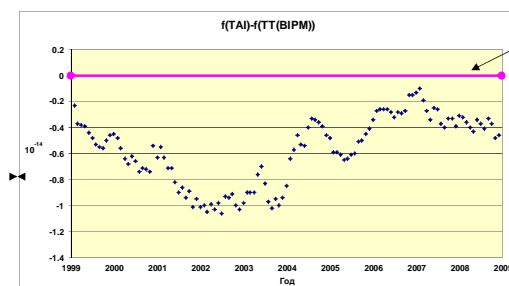
Тот же самый алгоритм используется для оценки $f(EAL)$, но в режиме постобработки.

Мы считаем ТТ(BIPM) опорной частотой для оценки:

- 1) показателей $f(EAL)$
- 2) показателей $f(TAI)$
- 3) показателей PFS

29

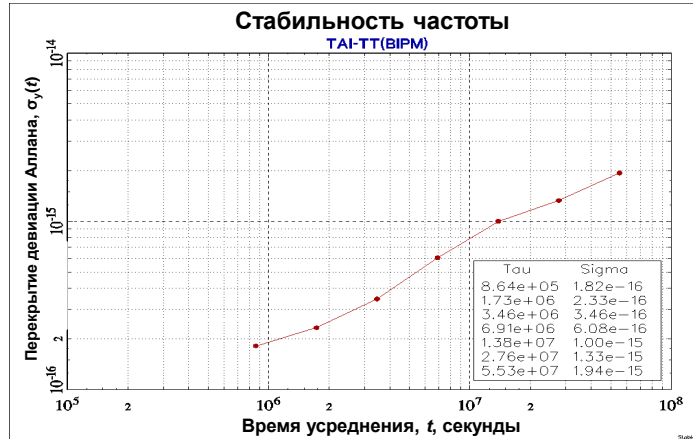
$f(TAI) - f(ТТ(BIPM))$



TAI приближается к своему определению ($< 5 \times 10^{-15}$ за последние два года), однако все еще не соответствует ему.

30

Стабильность TAI по отношению к TT(BIPM)



Долговременная нестабильность TAI составляет от 1×10^{-15} до 2×10^{-15} . Это показатель, который в два-три раза хуже, чем значение для TT(BIPM).

31



Прослеживаемость UTC(k) к UTC

CIRCULAR T 285
2011 OCTOBER 10, 15h UTC

ISSN 1143-1393

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

1 - Coordinated Universal Time UTC and its local realizations UTC(k). Computed values of [UTC-UTC(k)] and uncertainties valid for the period of this Circular. From 2009 January 1, 0h UTC, TAI-UTC = 34 s.

Date 2011	0h UTC	AUG 31	SEP 5	SEP 10	SEP 15	SEP 20	SEP 25	SEP 30	Uncertainty/ns	Notes	
Laboratory k	MJD	55804	55809	55814	55819	55824	55829	55834	u_k	u_c	
		[UTC-UTC(k)]/ns									
ADS (Borowiec)		3.6	5.6	5.5	8.2	8.4	6.7	5.4	0.4	5.2	5.2
APL (Laurel)		10.0	13.2	14.7	2.7	-2.5	-2.9	-5.6	1.5	5.1	5.3
AUS (Sydney)		944.8	923.8	910.9	897.1	901.4	898.8	889.5	0.4	5.2	5.2
BEV (Wien)		15.3	-0.5	0.2	5.5	8.2	6.5	5.4	1.5	3.3	3.6
BIM (Sofiya)		-5861.2	-5863.7	-5846.7	-5853.3	-5846.0	-5844.3	-5821.4	2.0	7.1	7.4
BIRM (Beijing)		-2408.8	-2470.8	-2682.8	-	-2405.1	-2379.0	-2335.6	2.0	20.1	20.2
BY (Minsk)		57.1	1.1	7.9	16.3	28.5	34.6	40.1	2.0	7.1	7.4 (1)
CAO (Cagliari)		-5726.2	-5730.3	-5736.2	-5760.2	-5792.2	-5805.9	-5825.4	1.5	7.1	7.3
CH (Bern)		8.4	5.4	3.1	2.4	-0.2	1.0	-0.5	0.4	1.8	1.8
CNM (Queretaro)		-1.4	-6.1	-9.4	-11.4	-0.3	-14.7	-14.3	2.5	5.2	5.8
CNMP (Panama)		-16.8	-1.7	21.8	16.3	12.9	21.2	15.1	3.0	5.2	6.0
DLR (Oberpfaffenhofen)		31.4	11.2	9.9	14.0	12.3	3.0	-2.0	0.4	5.2	5.2
DNDM (Belgrade)		-17.3	2.4	-6.1	-18.7	-18.4	-22.0	-16.2	2.0	7.1	7.4
DTAG (Frankfurt/M)		-24.2	-21.3	-19.0	-24.1	-14.8	-11.4	-11.4	0.4	10.1	10.1
EIM (Thessaloniki)		6.1	9.1	6.7	8.3	7.8	6.0	-	5.0	5.2	7.2
HKO (Hong Kong)		42.9	41.9	44.4	41.5	40.2	40.0	51.4	2.5	5.2	5.7
IFAG (Wetzell)		-424.5	-437.7	-440.2	-445.6	-447.6	-452.6	-459.5	0.4	5.1	5.1
IGMA (Buenos Aires)		4121.1	4188.5	4260.6	4326.3	4391.9	4463.9	4530.7	2.5	5.2	5.8
INPL (Jerusalem)		-255.7	-265.1	-269.5	-272.4	-276.6	-283.4	-291.8	1.5	20.0	20.1
INTI (Buenos Aires)		41.5	49.8	63.0	39.3	34.8	17.6	5.9	4.0	20.1	20.4

32



Совершенствование UTC для применений XXI века

- ✓ Улучшенные генераторы (в лабораториях)
- ✓ Новые PFS (в лабораториях)
 - ✓ Оптические стандарты частоты (в лабораториях)
 - Передача сигналов точного времени и частоты (лаборатории, BIPM)
- ✓ Улучшение сравнений генераторов за счет совершенствования передачи сигналов времени (лаборатории, BIPM)
- ✓ Улучшенные алгоритмы (лаборатории – для UTC(k), BIPM – для UTC)
- ✓ Более частое предоставление UTC (проект Rapid UTC BIPM)
 - ✓ Воздействие на UTC(k)
 - ✓ Воздействие на управляющие сигналы времени ГНСС для воспроизведения UTC
- ✓ Придание UTC непрерывного характера (МСЭ)
 - ✓ Преимущества показаны на этом собрании

33



**Большое спасибо
за внимание!**

34