

**НАПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ИЗМЕРЕНИЙ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ
МАТЕРИАЛОВ 20-й СЕССИИ КОНСУЛЬТАТИВНОГО
КОМИТЕТА ПО ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЕ 2015**

Н.Б. Кошеляевский, Ю.С. Домнин

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
nkoshelyevsky@vniiftri.ru, ydomnin@vniiftri.ru*

Освещается обсуждение 20-й сессией Консультативного Комитета по времени и частоте направлений и перспектив развития измерений времени и частоты и рекомендаций для МКМВ по их реализации.

The article describes discussions held at the 20th meeting of the Consultative Committee for Time and Frequency on the directions and prospects for development of time and frequency measurements and the corresponding recommendations to the CIPM.

Ключевые слова: время и частота, измерения, рекомендации, направления.

Введение

Сессии ККВЧ происходят обычно раз в три года в Международном бюро мер и весов (МБМВ) в Севре. Участники сессии ККВЧ - это делегаты и эксперты лабораторий, направляемые учреждениями-вкладчиками в формирование шкалы Международного атомного времени (ТАИ), а также по должности представители таких научных союзов, как Международный астрономический союз (IAU), Международная ГНСС Служба (IGS), Сектор радиосвязи Международного союза электросвязи (ITU-R), Международный союз геодезии и геофизики (IUGG), Международный научный радиосоюз (URSI).

Заседания собственно ККВЧ обычно продолжаются два рабочих дня, но им предшествуют заседания Рабочих групп (РГ) ККВЧ, на которых специалистами лабораторий обсуждаются конкретные практические вопросы совершенствования времени, частоты и подготавливаются проекты Рекомендаций для МКМВ, утверждаемые затем на заседании ККВЧ. Перечень РГ довольно обширен и состоит из 9 РГ и покрывает основные направления деятельности ККВЧ:

1. Форум лабораторий по TAI	LF onTAI
2. Рабочая группа по алгоритмам шкал времени	WG on Algorithm
3. Рабочая группа по первичным и вторичным стандартам частоты	WG on PSFS
4. Рабочая группа по ГНСС	WG GNSS
5. Рабочая группа по дуплексным каналам сличений	WG TWSTFT
6. Рабочая группа по передовым методам сличений шкал времени	WG ATFT
7. Рабочая группа по Договоренности о взаимном признании	WG MRA
8. Рабочая группа по стратегическому планированию	WG SP
9. Объединённая Рабочая группа Консультативных Комитетов по длине и по времени и частоте по стандартам частоты	CCL-CCTF FS WG

20th meeting of the CCTF and satellite meetings
BIPM, 7 to 18 September 2015

Session	Meeting	Meeting	Meeting
Afternoon	WG TWSTFT		
All day	WG TWSTFT		
All day	Tutorials on algorithms		
All day	Time Scale Algorithms Symposium		
All day	Time Scale Algorithms Symposium		
Morning	CCL/CCTF FS WG	WGs Meetings (MRA)	
Afternoon	CCL/CCTF FS WG	WGs Meetings (GNSS)	
Morning	WGs Meetings (SP)		
Afternoon	WGs Meetings (ATFT)	WGs Meetings (PSFS)	
Wednesday 16	Morning	Meeting of TAI contributing labs	
	Afternoon	Meeting of TAI contributing labs	
Thursday 17	All day	20th CCTF	
Friday 18	All day	20th CCTF	

Version of 09/02/2015

Рис. 1

Заседания 20 сессии ККВЧ, а также сопутствующие заседания, продолжались с 7 по 18 сентября 2015 г. В это же время был проведен и Симпозиум по алгоритмам шкал времени (TSAS). Несмотря на длительный

период мероприятий, можно считать оправданным временное совмещение сессии ККВЧ с Tutorial и TSAS – трудно отдельно собрать ведущих специалистов мира для проведения лекционных курсов.

Далее мы рассмотрим основные моменты заседаний РГ ККВЧ в порядке их проведения в соответствии с приложенным графиком работы, а затем коснемся собственно сессии ККВЧ. В то же время мы не станем касаться материалов Tutorial и TSAS, которые представлены в [1].

Рабочая Группа по дуплексным каналам сличений

23 заседание Рабочей Группы по дуплексной спутниковой передаче времени и частоты (WG TWSTFT) ККВЧ проходило 7-8 сентября под председательством Dr. Dirk Piester из PTB.



Рис. 2. Заседание рабочей группы

Основные вопросы повестки дня:

- Состояние каналов сличений.
- Наставление по калибровке TWSTFT аппаратуры V 3.0.
- Новые разработки.

Основная озабоченность в части каналов сличений - отсутствие прямого канала Европа-Азия вследствие прекращения работы спутника АМ2. Был проявлен интерес к спутнику АМ22, несмотря на негарантированный характер услуги, основной мотив – финансовые соображения.

Наставлению по калибровке TWSTFT аппаратуры V 3.0 сопутствовали два Приложения: «Калибровка TWSTFT канала с использованием мобильной станции» и «Калибровка TWSTFT канала с использованием GPS.» Фактически эти документы приняты в рамках общей кампании Отделения времени МБМВ по совершенствованию каналов сличений шкал времени удаленных лабораторий в рамках формирования TAI.

В разделе «Новые разработки» внимание было сосредоточено на двух моментах:

- Оценки возможности широкополосного канала – 20 Mchip/s, обработка фазы несущей, возможности дуплексной передачи по оптоволоконной линии с использованием имеющихся модемов SATRE.
- Перспективы использования приемника TWSTFT с цифровой обработкой (Software Defined Receiver). Это крайне перспективное направление, не требующее больших капитальных вложений и обещающее устранить суточную компоненту в приемной аппаратуре. Фактически это аналог того, что используется в современной приемной аппаратуре ГНСС.

Экскурсия по лабораториям МБМВ

По завершении работы WG TWSTFT была проведена экскурсия по лабораториям МБМВ. Наибольший интерес представляли работы в русле Резолюций 1 24 заседания Генеральной Конференции по мерам и весам (ГКМВ) (2011) и 1 25 заседания ГКМВ (2014), связанных с переопределением основных единиц системы СИ на основе мировых констант. Так, в частности, была продемонстрирована установка по реализации единицы массы СИ – килограмма и установка для воспроизведения единицы СИ электрической величины на основе расчетного конденсатора.

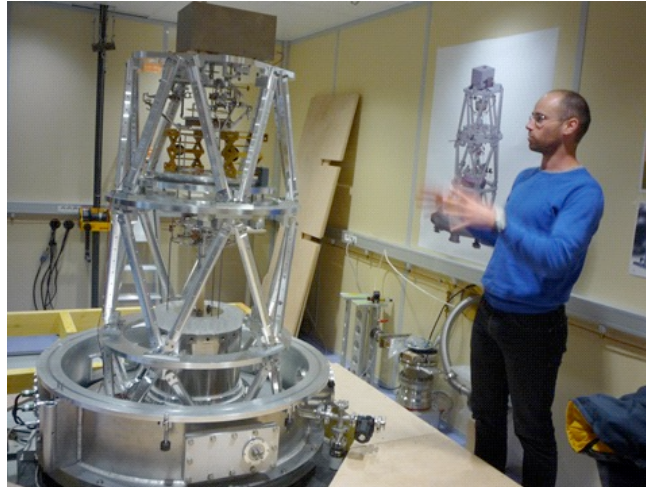


Рис. 3. Установка по реализации единицы массы СИ - килограмма



Рис. 4. Установка для воспроизведения единицы СИ электрической величины на основе расчётного конденсатора

После завершения TSAS 14 сентября продолжились заседания Рабочих групп. Это был самый напряженный рабочий день, поскольку проходили параллельно заседания трех Рабочих групп.

**Объединённая Рабочая группа Консультативных комитетов
по длине и по времени и частоте, по стандартам частоты**

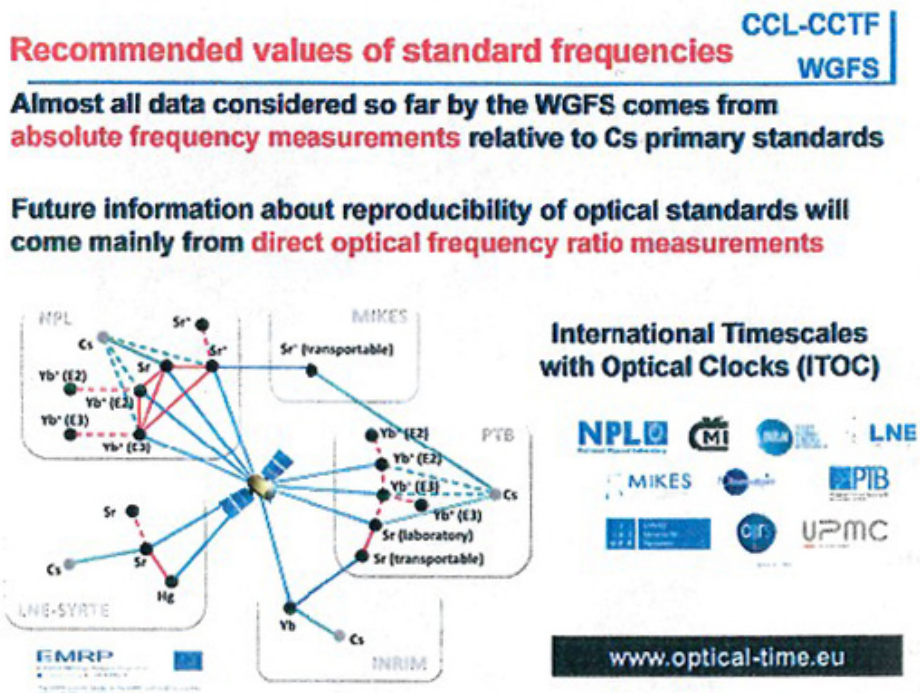


Рис. 5

Заседания объединенной WG CCL/CCTF проходили под председательством Dr. F.Riehle, PTB, и Dr. P.Gill, NPL, основная задача которой - актуализация списка рекомендованных частот (LoR - List of Recommended Frequencies) для вторичного представления секунды и практической реализации единицы длины метра. Это очень ответственная и щепетильная работа, требующая большого внимания и аккуратности.

Основные выводы:

- LoR не расширяется, но будут рассмотрены предложения CCL;
- уточнены величины частот в LoR ($^{171}\text{Yb}^+$ octupole, $^{171}\text{Yb}^+$ quadrupole, $^{88}\text{Sr}^+$, $^{40}\text{Ca}^+$, ^{87}Sr , ^{171}Yb , ^{199}Hg , ^1H , ^{87}Rb microwave);
- уточнены величины частот и неопределенности для вторичной реализации секунды СИ (^{87}Sr , ^{171}Yb , ^{199}Hg , $^{171}\text{Yb}^+$ octupole, $^{171}\text{Yb}^+$ quadrupole, $^{88}\text{Sr}^+$, ^{87}Rb microwave).

Следует подчеркнуть, что приведенные в LoR значения частот стандартов
Альманах современной метрологии, 2016, №7

базируются на измерениях абсолютных частот относительно первичных цезиевых стандартов частоты. Анализ воспроизводимости оптических стандартов частоты в будущем будет основан, в основном, на данных прямых измерений отношений оптических частот. Обновленный LoR приведен полностью в Рекомендации объединенной WG CCL/CCTF 2015.

Ниже приведены извлечения из LoR в части фонтанного стандарта частоты ^{87}Sr в радиодиапазоне и ^{87}Sr в оптической решетке. Обращает на себя внимание, что рекомендованные уровни неопределенности стандартов вплотную приближаются к характеристикам лучших первичных стандартов частоты на основе фонтана ^{133}Cs ($1.5 - 2 \cdot 10^{-16}$).

^{87}Sr transition (SRS; lattice clock; update)			CCL-CCTF WGFS	^{87}Rb microwave transition (update)			CCL-CCTF WGFS
$5s^2 \ ^1S_0 - 5s5p \ ^3P_0$ transition				CIPM2013 6 834 682 610.904 312 Hz (1.3×10^{-15})			
CIPM2013	429 228 004 229 873.4 Hz	(1×10^{-15})					
429 228 004 229 873.65 Hz	0.37 Hz	G.K. Campbell et al, Metrologia 45, 539 (2008)					
429 228 004 229 873.6	1.1	X. Baillard et al, Eur. Phys. J. D 48, 11 (2006)					
429 228 004 229 874.1	2.4	F.-L. Hong et al, Opt. Lett. 34, 592 (2009)					
429 228 004 229 872.9	0.5	S. Falke et al, Metrologia 48, 399 (2011)					
429 228 004 229 873.9	1.4	A. Yamaguchi et al, Appl. Phys. Expr. 5, 022701 (2012)					
429 228 004 229 873.10	0.13	Le Targat et al, Nature Com. 4, 2109 (2013)					
429 228 004 229 873.13	0.17	S. Falke et al, New J. Phys. 16, 073023 (2014)					
429 228 004 229 873.60	0.71	H. Hachisu et al, Opt. Lett. 39, 4072 (2014) *					
429 228 004 229 872.0	1.6	D. Akamatsu et al, Appl. Phys. Expr. 7, 012401 (2014)					
429 228 004 229 873.56	0.49	T. Tanabe et al, Journal: J. Phys. Soc. Jpn., accepted					
429 228 004 229 873.7	1.4	Y.-G. Lin et al, Chin. Phys. Lett. 32, 090601 (2015)					
429 228 004 229 872.85	0.47	H. Hachisu and T. Ido, Jap. J. Appl. Phys. accepted					
Recommended value (weighted mean): $f_{^{87}\text{Sr}} = 429\ 228\ 004\ 229\ 873.2$ Hz (5×10^{-16}) (uncertainty limited essentially by Cs clock)				Recommended value: $f = 6\ 834\ 682\ 610.904\ 310$ Hz (7×10^{-15}) (uncertainty expanded 2 times and rounded)			
* Removed because based on value of S. Falke et al (correlation)							

Рис. 6

Рабочая Группа по договоренности о взаимном признании

Заседание WG MRA проходило в первой половине дня под председательством J. Maurício López-Romero, CENAM, и рассмотрело, в основном, следующие вопросы:

- О новой версии Наставления «Прогнозирование неопределенности».
- Наставление об участии в Циркуляре Т не национальных метрологических учреждений.
- О новых публикациях ключевых сличений CCTF-K001.UTC в МБМВ базе данных ключевых сличений.
- Критерии ККВЧ по прослеживаемости в области измерений времени и частоты.
- Предложения о возможных региональных сличениях и проектах.
- Действия WG MRA в свете решений ККВЧ по стратегическому

планированию.

- Технические критерии по анализу СМС и их периодическая оценка.

Рабочая Группа по ГНСС

Заседание WG GNSS проходило под председательством P. Defraigne, ORB, во второй половине дня и рассмотрело, в основном, следующие вопросы:

- Проект Рекомендации о расширении стандарта CGGTTS до версии V2E.
- Проект Рекомендации о наставлениях МБМВ по калибровке ГНСС аппаратуры.
- Проект Рекомендации о конструкции ГНСС приемной аппаратуры для сличения шкал времени.

По первому пункту со ссылкой на опубликованные в Metrologia 2015, 52 G1 документы рассмотрен проект расширения стандарта CGGTTS (CGGTTS – технические директивы для обеспечения работы специализированной временной приемной аппаратуры ГНСС в дифференциальном режиме) с учетом существования ГНСС систем GPS и GLONASS, а также развертывания GALILEO (Европа), BeiDou (Китай) и QZSS (Япония). Его суть сводится к рекомендациям производителям специализированной временной приемной аппаратуры ГНСС модифицировать программную поддержку аппаратуры до уровня соответствующего CGGTTS V2E; лабораториям времени предоставлять в МБМВ файлы измерительной информации в формате CGGTTS V2E и разработчику ПО модифицировать R2CGGTTS для поддержки версии CGGTTS V2E.

По второму пункту основная цель проекта Рекомендации о наставлениях МБМВ по калибровке ГНСС аппаратуры: наладить более конкретное и продуктивное взаимодействие между ВРМ RMO для:

- обеспечения калиброванности аппаратуры, используемой лабораториями-вкладчиками в UTC;
- поддержания точности каналов сличений в UTC путем регулярных калибровок;
- снижения u_B путем оценивания стабильности калибровок.

Для этого предложена следующая организация калибровок:

- МБМВ организует калибровки с некоторыми лабораториями (группа 1) в

каждой RMO;

RMO совместно с группой 1 организует калибровочную кампанию других лабораторий (группа 2) в своем регионе.

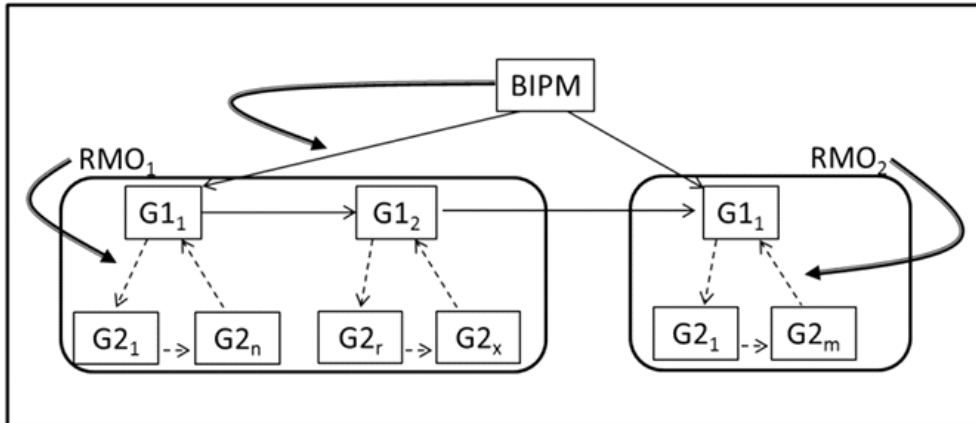


Рис. 7

Эта процедура основана на принципе дифференциальной калибровки с замыканием поездок к опорным величинам, обеспечиваемых наборами аппаратуры в избранных лабораториях.

Неопределенность калибровки uCAL0 (Cal_Id) будет приписываться каждой калибровочной поездке МБМВ после предоставления материалов по калибровке.

Группа 1 лабораторий в соответствующих RMO:

EURAMET: OP, PTB, ROA;

SIM: NIST, USNO;

ARMP: NICT, NIM, TL;

COOMET: SU.

Наставления по калибровке, стандартизованный процесс обработки данных и бланки отчетов подготовлены и доступны на <ftp://tai.bipm.org/TFG/GNSS-Calibration-Results/Guidelines>

По третьему пункту отмечая, что совместное использование кодовой и фазовой измерительной информации приемной ГНСС аппаратуры позволяет достичь субнаносекундной разрешающей способности, что является исключительно важным для сличений удаленных стандартов частоты оптического диапазона и первичных стандартов фонтанного типа, а также исходя из того факта, что подобная обработка корректна лишь при точной

Альманах современной метрологии, 2016, №7

временной связи кодовой и фазовой информации, рекомендует производителям будущей приемной аппаратуры и её ПО усовершенствовать временную увязку результатов кодовых и фазовых измерений в выходном файле приемника до уровня менее 100 нс, принимая во внимание существенные внутренние задержки в приемной аппаратуре, и включать эту информацию в спецификацию приемника.

Рабочая Группа по стратегическому планированию

В утренней сессии 15 сентября провела заседание Рабочая группа по стратегическому планированию. По должности её возглавляет председатель ККВЧ, в настоящее время L.Egard, а в её состав входят по должности председатели Рабочих групп ККВЧ.

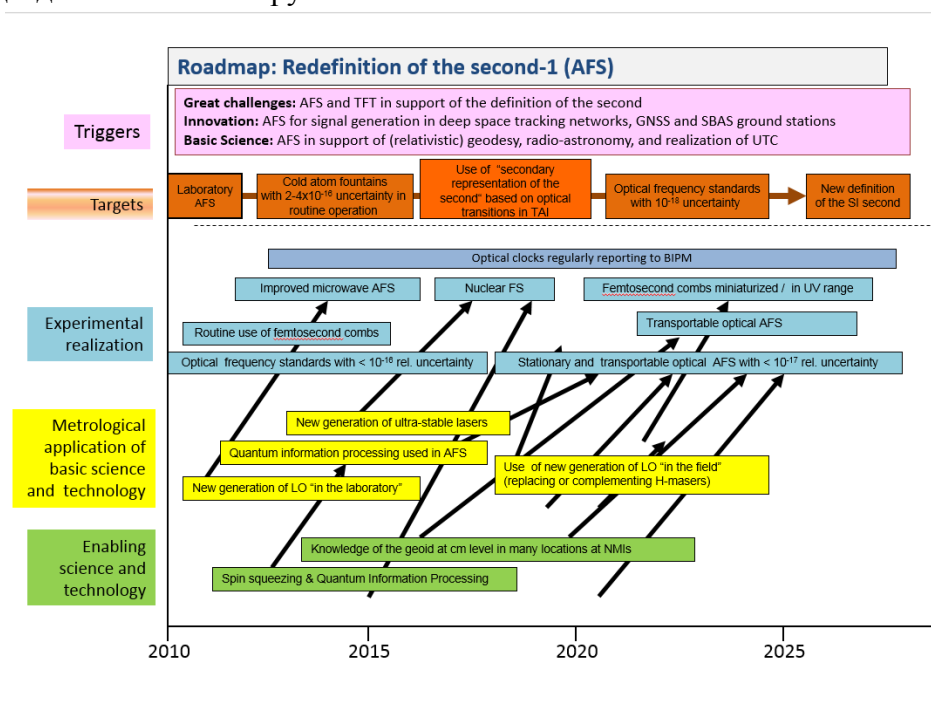


Рис. 8

Основной документ WG SP - Документ по Стратегии ККВЧ. В настоящее время действующая окончательная версия – первое издание 11 февраля 2013. Новая версия будет разработана с учетом запросов и предложений членов Рабочих групп ККВЧ и предложена к утверждению на следующем

заседании WG SP в 2016 г. во время EFTF 2016 (4th - 7th April 2016, York, United Kingdom).

Был также рассмотрен вопрос о дорожной карте переопределения единицы времени СИ-секунды. В основу положена дорожная карта Euramet/NPL.

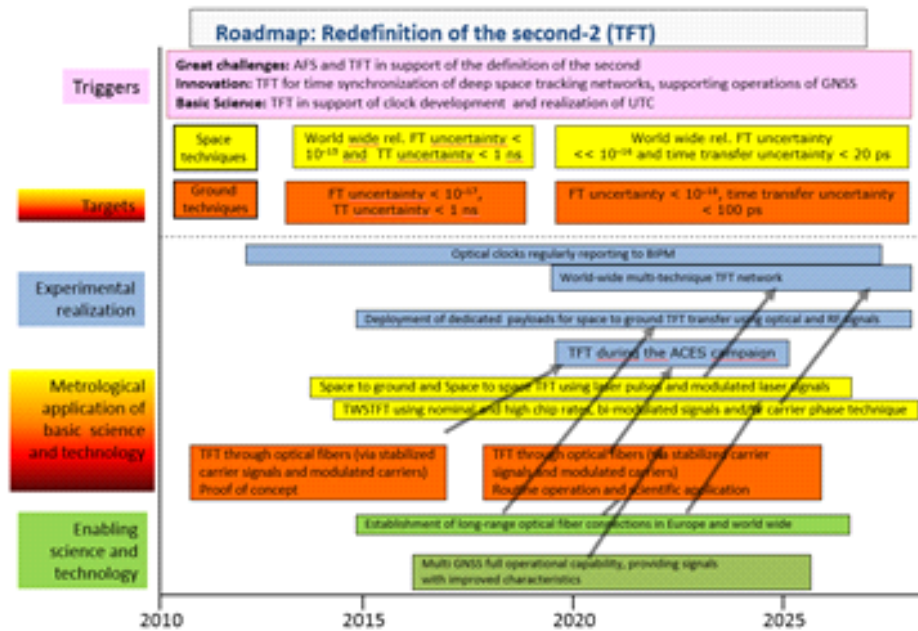


Рис. 9

Это очень ответственный проект, учитывая выделенное положение единицы времени СИ «секунды» с точки зрения неопределенности её реализации и значимости для системы СИ в целом. С одной стороны, по своим точностным характеристикам секунда СИ превосходит все остальные базовые единицы СИ: килограмм (kg), метр (m), ампер (A), моль (mol), кельвин (K) и кандела (cd) по меньшей мере в 10 000 000 раз, а с другой, она входит в предлагаемое новое определение таких базовых единиц СИ, как: килограмм (kg), метр (m), ампер (A), кельвин (K) и кандела (cd) [2].

Дорожная карта представлена в виде двух связанных проектов: собственно разработки новых квантовых стандартов частоты (в первую очередь в оптическом и УФ диапазонах) с уровнем $u_B \sim 10^{-18}$ и разработки средств сличения удаленных стандартов частоты с u_B по частоте $\sim 10^{18}$ и u_B по времени ≤ 100 пс. Теснейшая связь этих проектов состоит в том, *Альманах современной метрологии, 2016, №7*

что невозможно достоверное сличение стандартов частоты такого уровня, т.е. подтверждение уровня их u_B , без учета гравитационного потенциала Земли, которые могут быть оценены лишь с использованием перевозимых высокоточных стандартов частоты, точность которых подтверждается с помощью стационарных стандартов, и каналов сличения с u_B по частоте $\sim 10^{-18}$.

Вместе с тем, если переопределение некоторых единиц СИ рассматривается в рамках 26 ГКМВ (2018), то в соответствии с дорожной картой переопределения единицы времени СИ-секунды можно предполагать не ранее 2030 г.

Рабочая Группа по передовым методам сличений шкал времени



Рис. 10. Существующие (сплошные) и рассматриваемые (пунктирные) оптические каналы для обеспечения сличений по времени и частоте

Заседание Рабочей группы по совершенствованию каналов сличений по времени и частоте (WG ATFT) прошло под председательством F.-L. Hong. Основная задача WG ATFT – анализ состояния и ожидаемой эволюции характеристик стандартов частоты, шкал времени и каналов сличений, установление связей и облегчение консультаций с другими игроками, такими как IGS, IUGG, IVS, ITU и др., совместно с МБМВ стимулирование распространения информации по техническим достижениям, а также

предложение новых технологий сличений и организация кампаний по калибровке, включая разнородные технологии (такие как GNSS, TWSTFT, ACES microwave link, T2L2, fiber links).

На заседании основной темой были вопросы использования оптоволоконных линий и создания Европейской сети, которая послужила бы основой для регулярных, непрерывных сличений оптических стандартов частоты и фонтанных цезиевых реперов.

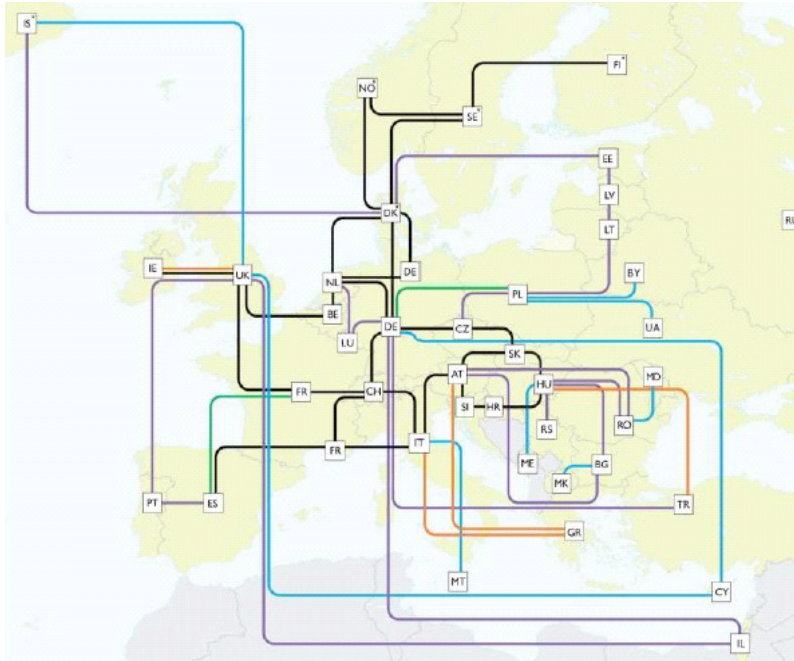


Рис. 11. Доступные волоконные линии в рамках академической сети Geant

В докладе INRIM были проанализированы уже реализованные оптические линии и рассмотрены находящиеся в стадии реализации, а также перспективные направления по созданию Евросети с использованием академической сети Geant.

INRIM была предложена следующая стартовая конфигурация и приведена оценка её реализации.

Затраты состоят из нескольких компонентов.

- разовые затраты на промежуточные усилительные станции ~ 700 к€4
- затраты на аренду волокна ~ 100 - 200 €/km/year, итого ~ 1М€/year;

- затраты на персонал из расчета один сотрудник на организацию, итого 8 человек с полной занятостью ~ 500k€/year.

Track	Institutes	Approx. Length / km	Amplification stations
London Paris	NPL-SYRTE	670	9
Paris Strasbourg	SYRTE-Interchange	500	6
Braunschweig-Strasbourg	PTB- Interchange	700	7
Braunschweig-Munich	PTB-MPQ	900	10
Torino- Genève	INRIM-CERN	400	5
Genève-Frankfurt	CERN- Interchange	750	8
Torun (PL)- Braunschweig	Univ. Kopernika-PTB	750	8
Noordwijk-Frankfurt	ESTEC- Interchange	650	8
Total		5300	61

Рис. 12. Важнейшие линии для начала европейской сети сличений по времени и частоте

Итого суммарные затраты ~ 700 k€ (первоначальные разовые вложения) и 1.5 М€/year.

Проект ACES



Рис. 13

Cs часы с лазерным охлаждением.

Стабильность $\sigma_y(\tau) \sim 1 \cdot 10^{-13} \tau = 1 \text{ с}$ и $\sigma_y(\tau) \sim 1 \cdot 10^{-16} \tau = 10 \text{ суток}$;

Сличение шкал времени по микроволновому каналу, континентальное и интерконтинентальное сличение частот между 9 учреждениями, в том числе 7 метрологических.

$\sigma_x(\tau) < 1 \text{ ps}$ за 300 с, 7 ps за 1 сутки и 23 ps за 10 суток;

Альманах современной метрологии, 2016, №7

$\sigma_y(\tau) \sim 1 \cdot 10^{-17}$ разрешение по частоте, низкий уровень шумов, но от 5 до 7 измерений в сутки.

Лазерный канал сличений ~ 10 ps.

Большинство летных прототипов завершено. Наземные испытания 2015-2017. Запуск - первый семестр 2017. Ожидаемая продолжительность миссии: 18 месяцев гарантированно, 3 года - возможно.

Проект транспортируемые оптические часы

В разработке 4-5 транспортируемых оптических часов (Sr-оптическая решетка, Al^+ квантовая логика).

Две Sr системы близки к работе (SOC2, PTB), возможно, это наиболее продвинутые (информация по NIST Al^+ отсутствует).

Ожидаемая неопределенность $< 10^{-17}$ за 3 часа.

Два направления разработок: не слишком малогабаритные «метрологические» и оптимизированные по соображениям масса/габариты – «космические системы».

Подобные часы будут также использоваться в совместных измерениях с геодезистами в программах EMRP ITOC и CRC geo-Q.

Проект TWSTFT с обработкой фазы несущей

- Технология сличений TWSTFT с обработкой фазы несущей (TWCP) обещает достижение уровня сличений по частоте $\sim 10^{-16}$ на сутках.
- Доступность технологии TWCP будет расти.

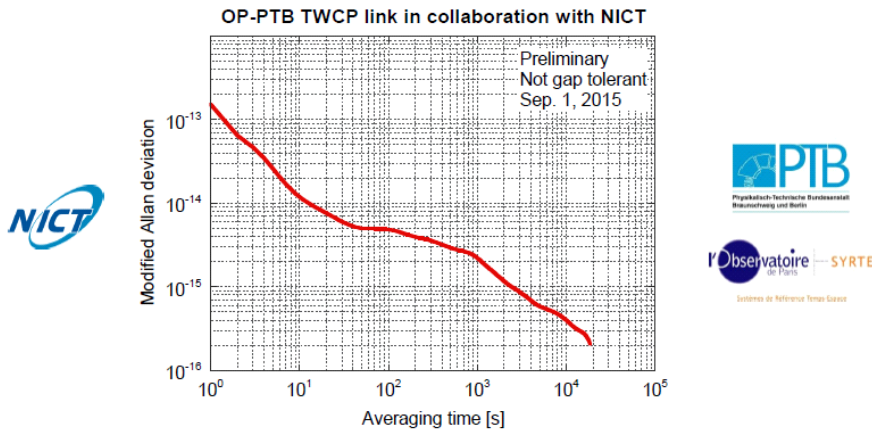


Рис. 14

Проект хронометрическая геодезия

Сравнивая частоты стандартов, расположенных в разных местах, можно непосредственно измерить разность гравитационных потенциалов: это и есть предмет хронометрической геодезии.

Хронометрические наблюдения весьма отличны по природе от классических наблюдений в геодезии (гравиметрии, градиометрии и т.д.), а точности оптических часов становятся конкурентными с классическими методами геодезии, которые для статического потенциала имеют неопределенность несколько сантиметров.

В нескольких проектах изучаются преимущества хронометрических наблюдений для геодезии: сравнение с классическими методами в ИТОС EMRP широкомасштабном проекте, новое теоретическое определение TAI, основанное на хронометрическом геоиде, применение в геофизике и измерении геопотенциала с высоким разрешением, явления с изменением времени и т.д.

Все эти приложения стимулируют потребность в транспортируемых оптических часах и высокоточных каналах на интерконтинентальных расстояниях.

Следует обратить внимание на весьма существенную ремарку о TAI (*новое теоретическое определение TAI*). В настоящее время определение TAI (1970) [3] «Шкала Международного атомного времени (TAI) - временная опорная координата, устанавливаемая Международным Бюро времени на основе показаний часов в различных учреждениях в соответствии с определением секунды – единицы времени в Международной системе единиц». В 1980 г. это определение было завершено следующими словами: «TAI - шкала координатного времени, определенная в геоцентрической опорной системе с СИ секундой на вращающемся геоиде в качестве единицы времени» [4]. *Новое теоретическое определение TAI* может подразумевать отказ от геоида в пользу измеренных методами хронометрической геодезии разностей гравитационного потенциала. Это, конечно, поможет более корректному сопоставлению размеров единиц удаленных стандартов частоты, но не решит фундаментальной задачи измерения абсолютного значения гравитационного потенциала и его постоянства.

Заседание Рабочей группы ATFT завершилось подготовкой проекта

рекомендации, который затрагивал следующие вопросы:

Ответственные стороны:

- энергично поддержат исследования и разработки технологий передачи времени и частоты, согласованных по точности с уровнем стабильности и неопределенности наиболее продвинутых стандартов частоты. Эти технологии могут включать волоконно-оптические каналы, модернизированные спутниковые микроволновые каналы, оптические космические каналы, транспортируемые стандарты и продвинутые часы в космосе;
- помогут сохранять устойчивость избранных континентальных и интерконтинентальных линий, образующих глобальный становой хребет время-частотной метрологии для этих новых технологий;
- обеспечат перенос этих технологий с соответствующей точностью в другие направления науки, промышленности и общества.

МБМВ будет активно участвовать в этих разработках, особенно готовясь к использованию при реализации шкал времени данных сравнения часов, полученных с использованием этих новых методов сличений по времени и частоте.

Здесь хотелось бы обратить внимание на призыв к поддержке по сохранению устойчивости избранных континентальных и интерконтинентальных каналов сличений, это вопрос, который, зачастую не может быть решен на уровне лабораторий-вкладчиков TAI.

Форум лабораторий по TAI

В какой-то степени это заседание опиралось на итоги работы предыдущих Рабочих групп. Его повестка дня включала, в основном, сообщения Отделения времени МБМВ, а также примыкающие по тематике сообщения WG on Algorithms, WG on PSFS, WG GNSS, WG TWSTFT, WG SP, CCL-CCTF FS WG. Кроме того, в его рамках были заслушаны краткие представления проектов Рекомендаций Рабочих групп и организаций.

Основное достижение Отделения времени МБМВ – практическое использование с июля 2012 г. нового алгоритма формирования TAI. Его отличие от предыдущего – модель второго порядка при прогнозировании поведения часов при формировании шкалы свободного атомного времени EAL. Это привело к радикальному изменению поведения EAL – частота

EAL стабилизировалась и стала равна частоте первичных цезиевых реперов частоты, а нестабильность на месячных интервалах повысилась до уровня $\sim 4 \cdot 10^{-16}$.

Performance of EAL with respect to each PSFS and to the Rubidium Fountains

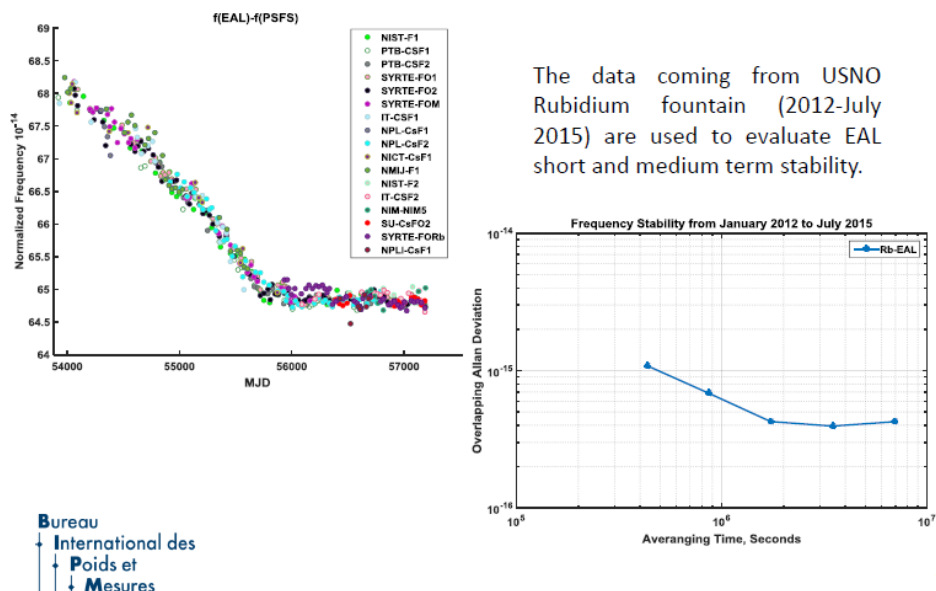


Рис. 15

Второе серьезное изменение в алгоритмике - «хорошие часы - предсказуемые часы». Это привело к пересмотру статистических весов часов.

И, наконец, третье изменение – максимальный статистический вес часов изменился с $w_{\max}=2.5/N$ на $w_{\max}=4/N$. Это привело к уменьшению числа часов с максимальным статвесом, но с другой стороны, их интегральный вес в статистической сумме вырос.

Weight Analysis - 1

By changing the weighting algorithm the role of the caesium clocks and Hydrogen Masers changed completely.

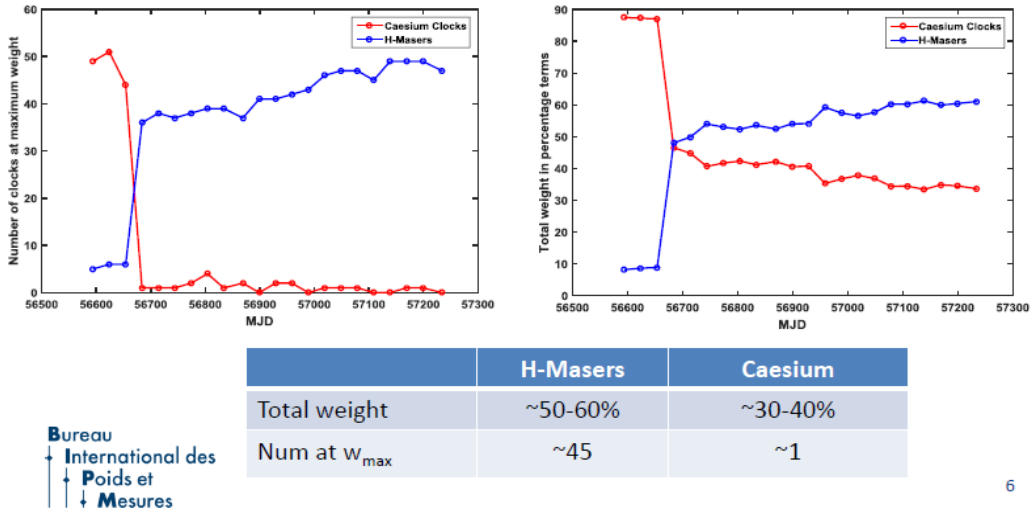


Рис. 16

Weight Analysis - 2

By changing the maximum weight from $w_{max}=2.5/N$ to $w_{max}=4/N$ the number of clocks at maximum weight decreases but the combined weight of clocks at maximum weight increases.

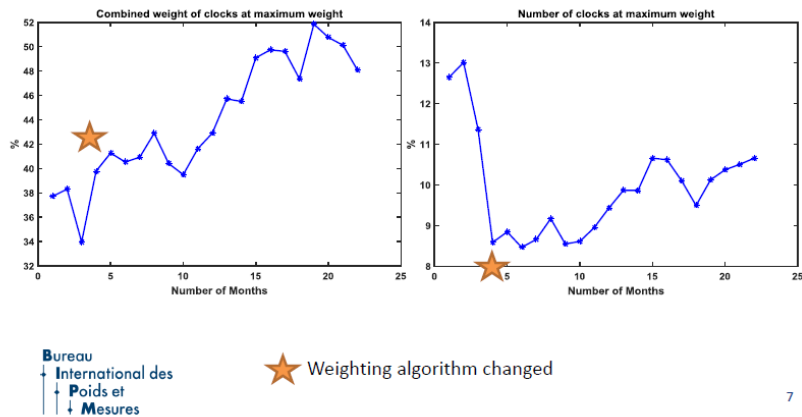


Рис. 17

Кроме того, в качестве задела на будущее сотрудники Отделения времени МБМВ совместно с дипломницей из университета Турина Federica Parisi для оценок разностей шкал времени часов, получаемых по каналам внешних сличений, при формировании EAL был использован фильтр Калмана. Это дало заметное снижение уровня белого фазового шума, типичного для внешних сличений, и качественное улучшение в оценках нестабильности удаленных шкал времени.

EXAMPLE: OP – PTB GPSP3 data

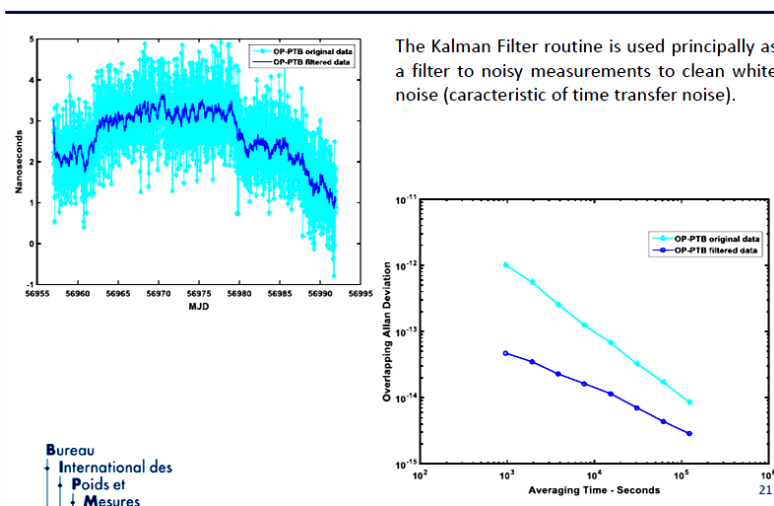


Рис. 18

TT(BIPM14)

- Frequency accuracy of TT(BIPM) has regularly decreased since the introduction of Cs fountains from 2.5×10^{-15} in 1999 to $< 1 \times 10^{-15}$ since 2004, $< 5 \times 10^{-16}$ since 2008 $\sim 2 \times 10^{-16}$ since 2012.
- It directly depends on the uncertainty budget of the PFS

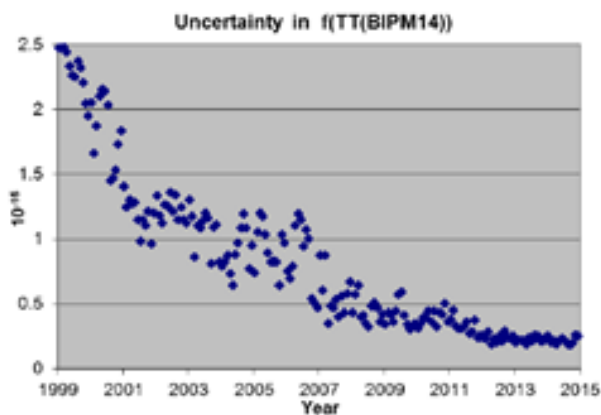


Рис. 19

Еще одно сообщение сотрудников Отделения времени МБМВ G. Petit и G. Panfilo «Frequency standards in TAI and realization of TT(BIPM)» заслуживает отдельного комментария, так как затрагивает фундаментальный вопрос о соответствии размера единицы времени в шкале TAI её определению в СИ.

Поскольку TAI формируется в реальном времени и никогда не корректируется назад, она может быть не оптимальна, поэтому МБМВ формирует TT – (Time Terrestrial) – окончательную версию шкалы атомного времени.

TT реализуется апостериорно на основании всех доступных измерений частот стандартов частоты, рекомендованных для первичной реализации секунды СИ, за 20XX год. $f(EAL)$ оценивается ежемесячно на основании всех доступных измерений PFS. Месячные оценки сглаживаются и интегрируются для получения TT(BIPMxx). Последняя реализация TT(BIPM14) выпущена в январе 2015.

Точность размера единицы в TT постоянно улучшается по мере роста точности первичных стандартов. Наличие TT позволяет оценивать поведение TAI, в первую очередь её точность.

TT(BIPM) allows to estimate the accuracy of TAI

- ◆ Since end 2012, the drift of clocks is determined vs. TT
- ◆ $f(TAI - EAL)$ remains constant (no steering).

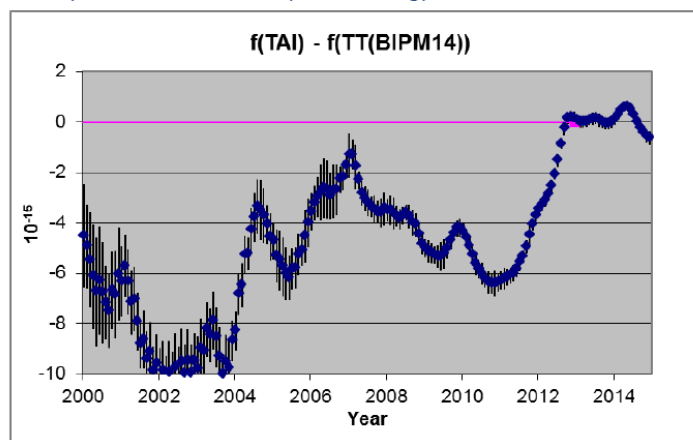


Рис. 20

Выводы:

- Существующие первичные стандарты продолжают повышать свою точность на порядок за 10-12 лет. Современный уровень $\sim 2 \cdot 10^{-16}$.

• Точность первичных стандартов, к сожалению, не полностью передается в ТАІ и ТТ(ВІРМ) из-за наличия шумов и, возможно, некоторой некорректности оценок их точности.

• Несмотря на это, неопределенности первичных стандартов в целом не противоречат приводимым данным, в предположении, что точность ТТ(ВІРМ) $\sim 2.5 \cdot 10^{-16}$ с 2012 г. и частота ТАІ известна с той же точностью.

Что же дальше? Необходимы оценки вторичных стандартов для:

- накопления опыта и их продвижения;
- определения их частот невозмущенного перехода;
- подготовки к будущим изменениям.

В докладе представителя IUGG Claude Boucher «Actions for the recognition of the International Terrestrial Reference System and Frame» обращалось внимание, что существующая мировая опорная геодезическая система ITRS, удовлетворяющая текущему уровню точности (accuracy) первичных стандартов $\sim 10^{-16}$, становится явно недостаточной для нового поколения стандартов оптического диапазона.

Несмотря на принятие Решением 9 24 ГКМВ (2011) ITRS в качестве исключительной международной опорной системы для метрологических приложений для земных опорных систем координат, Dr. Claude Boucher в завершение своего сообщения сформулировал некоторые рекомендации:

- разработать нормативный документ для ITRS;
- продолжить исследования о преимуществах и реализуемости стандарта вертикалей;
- проделать аналогичную работу по всемирной идентификации геодезических станций;
- усовершенствовать геодезическую терминологию, включая модернизацию существующих нормативных документов, и призвал МБМВ присоединиться к Рабочей Группе в качестве представителя ISO TC211.

Фактически тематика этого доклада теснейшим образом пересекается как с дорожной картой по возможному переопределению секунды СИ, так и предложениями Рабочей группы АТFT по хронометрической геодезии.

Помимо упомянутых докладов, практически все представители Рабочих групп выступили с короткими сообщениями, имеющими отношение формированию ТАІ.

20 сессия Консультативного Комитета по времени и частоте 2015

Повестка дня 20 сессии Консультативного Комитета по времени и частоте представлена ниже.

**20th Meeting of the Consultative Committee for Time and Frequency
17 and 18 September 2015**

1. Opening of the meeting: appointment of a rapporteur, adoption of the agenda

2. Review of actions since the last CCTF meeting.

3. Progress in frequency standards:

3.1. Operating primary and secondary frequency standards and new standards under development (Delegates).

3.2. Report of the CCTF Working Group on Primary and Secondary Frequency Standards (S. Jefferts, NIST).

3.3. Report of the CCL/CCTF Working Group on the Secondary Representations of the Second (F. Riehle, PTB and P. Gill, NPL).

3.4. Frequency standards in TAI (BIPM).

3.5. Realization of TT(BIPM) (BIPM).

4. Present status of TAI:

4.1. Report of the CCTF Working Group on TAI (L. Erard).

4.2. Report of the BIPM Time Department (F. Arias, BIPM).

5. Latest and future developments in time scale algorithms and time scales

5.1. Report of the CCTF WG on Algorithms (Y. Hanado, NICT).

5.2. Improvements in the algorithms for TAI (BIPM).

5.3. Report on Rapid UTC (BIPM).

5.4. Reports on progress on other time scales (Delegates).

6. Time and frequency transfer methods:

6.1. Report of the CCTF Working Group on TWSTFT (D. Piester, PTB).

6.2. Report of the WG on GNSS (P. Defraigne, ORB).

6.3. GNSS calibrations for UTC (BIPM, RMOs, delegates).

6.4. Report of the IGS WG on Clock Products (M. Coleman, IGS).

6.5. Report of the CCTF WG on coordination of the development of advanced time and frequency transfer techniques (F.-L. Hong, NMIJ).

6.5.1. Report on the status of fibre links (CCTF ATFT Task Group, BIPM and delegates).

6.6. GNSS processing techniques (BIPM, delegates).

7. CIPM MRA and RMOs

7.1. Report of the CCTF WG on the CIPM MRA (M. Lopez Romero, CENAM).

7.2. Reports from RMOs Technical Chairs (or substitutes).

8. Laboratories reports (NPL, GUM, UME, MIRS, SASO)**9. Redefinition of UTC**

9.1. Report of events at the ITU-R, future actions (R. Beard, ITU-R).

9.2. Dissemination of UT1 (C. Bizouard, IERS).

10. Space-time references and general relativity:

10.1. Report on the IERS Conventions Product Centre (G. Petit, BIPM).

10.2. Actions for the international recognition of the International Terrestrial Reference System and Frame (C. Boucher, IUGG).

11. Global navigation satellite systems

11.1. Reports on the present state of GNSS.

11.1.1. GPS.

11.1.2. GLONASS.

11.1.3. GALILEO.

11.1.4. GAGAN/IRNSS.

11.1.5. BeiDou/COMPASS.

11.2. Report on activities at the International Committee for GNSS (ICG) (BIPM).

12. Strategic planning

12.1. Outcome of the 25h CGPM (L. Erard, CIPM).

12.1.1. Update of the BIPM programme of work for 2016-2019 (F. Arias, BIPM).

12.2. Report of the Strategic Planning Working Group.

12.2.1. Update on the Strategic Planning Document (L. Erard, CIPM).

12.2.2. Roadmap for the new definition of the SI second (SP WG).

12.3. Designation of chairs of Working Groups.

13. Recommendations**14. Other business**

Поскольку многие вопросы были рассмотрены в Рабочих Группах, здесь мы коснемся только не затронутых ранее тем.

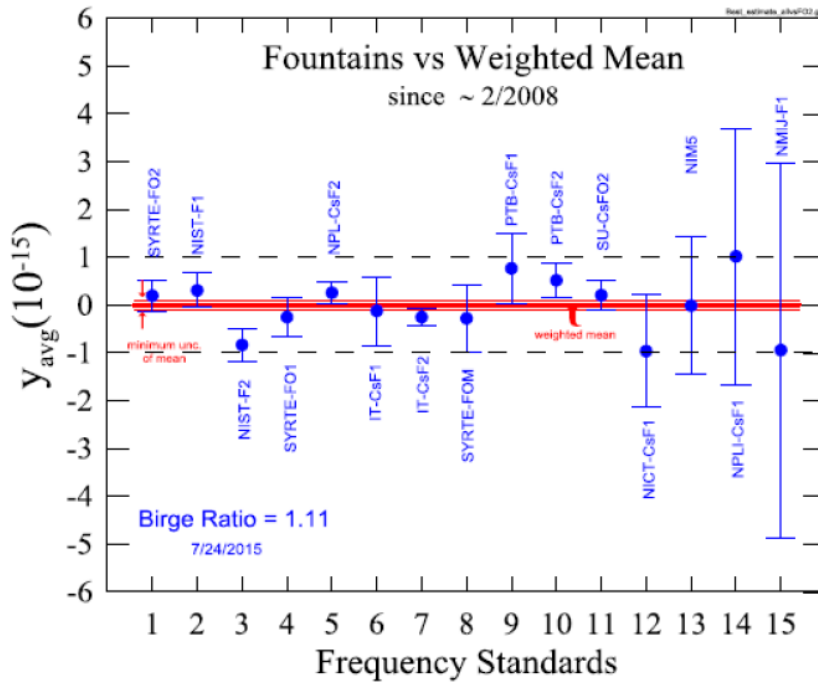


Рис. 21

П. 3.2. В краткой презентации председателя WG PSFS S. Jefferts, NIST, отмечено:

- со времени предыдущего 19-го заседания ККВЧ WG PSFS рекомендовано к включению в TAI 5 новых первичных Cs стандартов частоты с лазерным охлаждением, три из них из учреждений, ранее не дававших сведений о PFS: NPLI (India), NIM(China) и VNIIFTRI (Russia), а два из лабораторий, уже имевших ранее PFS, - INRIM (Italy) и NIST (USA);
- 17 (!!) PFS дают вклад в TAI и обычно >5 в любой из месяцев;
- точность (ассигасу) PFS варьируется от $1.5 \cdot 10^{-16}$ до $3.9 \cdot 10^{-15}$, статистический анализ подтверждает, что она, похоже, находится в статистическом согласии. В настоящее время 13 PFS и один SFS дают вклад в TAI более менее регулярно;
- и еще одна новость последних лет – несколько лабораторий внедрили квазинепрерывную работу фонтанных PFS. Ряд других также старается добиться этого.

П. 9.1. С сообщением «The Future of the UTC Time Scale» выступил председатель Рабочей группы 7 ITU-R (ITU-R Working Party 7A) R.L. Beard.

В сообщении R.L. Beard речь шла о подготовке проекта Резолюции 15 Всемирной конференции Союза радиосвязи (WRC-15) в ноябре 2015 г., связанном с изменением определения шкалы времени UTC. Предыдущая WRC-12 своей Резолюцией 653 признала, «что изменения в опорной шкале времени могут иметь операционные и, следовательно, экономические последствия» и поручила ITU-R «изучить вопросы, связанные с возможным внедрением непрерывной шкалы времени (включая технические и операционные факторы)».

1-е заседание по подготовке WRC-15 (СРМ 15-1 20-21 февраля 2012) запустило процесс подготовки повестки дня и поручило ITU-R Working Party 7A подготовить текст пункта повестки дня. В процессе выполнения этого поручения были направлены извещения в CGPM, CCTF, ВРМ, IERS, ВРМ и др., директор Бюро радиосвязи включил презентацию по этому поводу во Всемирный семинар радиосвязи, вопрос рассматривался на региональной семинаре в Эквадоре в 2012 г., совместными усилиями ITU-R и ВРМ в 2013 в ITU, Женева, была организована рабочая встреча «Будущее шкалы времени UTC», а также разосланы предложения по участию в обсуждении проблемы национальным администрациям связи.

Что же в итоге:

- ITU-R Working Party 7A исчерпала возможности изучения проблемы и технических рассмотрений.
- Подготовлен обзор откликов национальных администраций связи по событиям, связанным с вводом «скачущей» секунды.
- Отзывы международных групп, IUGG, IAU, IERS, URSI, IEC и ISO были мешанными.
- Консенсус достигнут не был по причинам не технического характера.

Working Party 7A подготовила для СРМ текст пункта 1.14 повестки дня WRC-15, а СРМ 15-2 (23 марта – 2 апреля 2015) подготовила окончательный отчет для WRC-15.

Таким образом, в повестку дня WRC-15 внесен пункт 1.14 «рассмотреть возможность получения непрерывной опорной шкалы времени либо модификацией шкалы Всемирного координированного времени (UTC) и/или каким-либо иным методом, а также предпринять соответствующие действия в соответствии с Резолюцией 653». В качестве мер по

удовлетворению требований повестки дня предложено рассмотреть следующие:

- Метод A1/A2 – Прекратить ввод «скачущей» секунды не ранее чем через 5 лет после даты вступления в силу Окончательного акта WRC (с или без изменения Наименования).
- Метод В – сохранить UTC в соответствии с существующим определением и ввести непрерывную опорную атомную шкалу времени, основанную на ТАИ, которая будет передаваться на равной основе, с отстройкой от UTC.
- Метод C1/C2 – Не вводить никаких изменений в определение UTC, данное в Recommendation ITU-R TF.460-6, которая останется единственной передаваемой шкалой времени во избежание каких-либо недоразумений. Разработать метод, определяющий/разъясняющий получения ТАИ из UTC.
- Метод D – не вносить никаких изменений в Регламент Радиосвязи, поскольку результат изучения проблемы неубедителен.

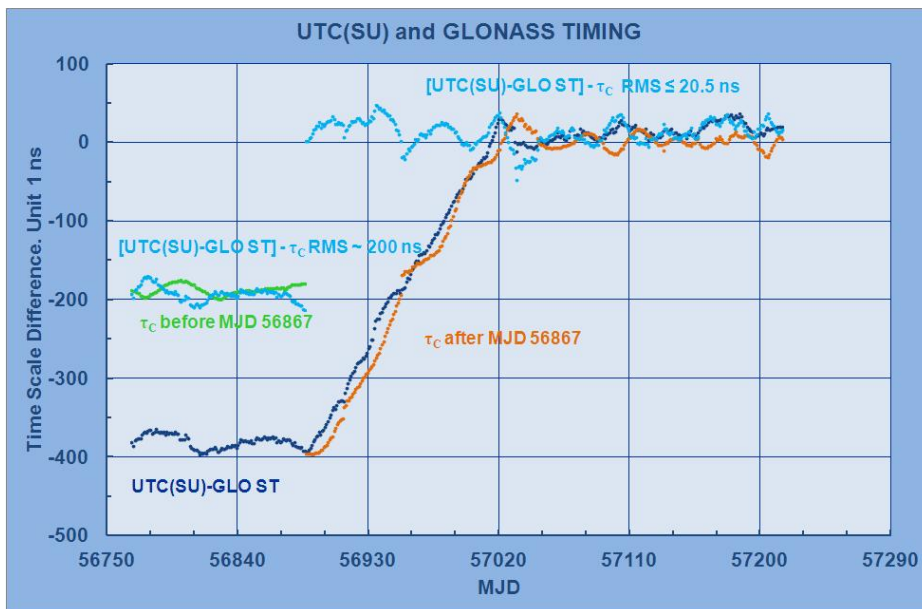


Рис. 22

П. 11.1.2 В разделе Global navigation satellite systems. GLONASS. делегатом ККВЧ от «ВНИИФТРИ» Н. Кошеляевским было сделано краткое сообщение о корректировке системного времени ГЛОНАСС и уточнении

передачи разности UTC(SU) – GLO ST в составе навигационного сообщения ГЛОНАСС. Было подчеркнуто, что это стало возможным после проведения во ВНИИФТРИ работы по определению сквозных задержек в приемной ГНСС аппаратуре типа TTS4.

П.12.1.1. Update of the BIPM programme of work for 2016-2019 повестки дня ККВЧ сообщение было сделано Директором Отделения времени МБМВ Dr. F.Arias. Это сообщение интересно тем, что содержит детальную информацию о кадровом составе, трудозатратах по отдельным направлениям и их финансировании, как с точки зрения операционных расходов, так и капитальных вложений в оборудование.

Обращает внимание кадровая проблема в Отделении времени МБМВ. В 2017 г. завершается работа Директора Felicitas Arias, а в 2018 г. еще двух сотрудников: Zhiheng Jiang, (time transfer, calibration) и Lennart Robertsson (frequency transfer, internal services, project support).

Также любопытным являются затраты на поддержание библиотечного фонда МБМВ (подписка на периодику и приобретение книг) ~ 400 к€.

П.13. Фактически итогом работы заседания ККВЧ являются проекты Рекомендаций ККВЧ, направляемые в МКМВ на утверждение. Большинство Рекомендаций рассматривалось на заседаниях Рабочих групп – именно там была проведена основная техническая работа над текстом и идеологическая над направленностью. Вместе с тем, окончательная версия документа - это плод коллективного рассмотрения на заседании ККВЧ.

Итак, на заседание ККВЧ были вынесены следующие Рекомендации:

- List of recommended frequencies, CCL-CCTF WGFS.
- The Common generic GNSS time transfer standard (CGGTTS), CCTF WG GNSS.
- On the operation and maintenance of Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT) networks for international atomic clock and time scale comparisons, CCTF WG TWSTFT.
- The BIPM guidelines for calibration, CCTF WG GNSS.
- On the design of GNSS receivers, CCTF WG GNSS.
- Real Time Realizations UTC(k) disseminated by Global Navigation Satellite Systems (GNSS), N.Koshelyaevsky (VNIIFTRI).
- Development of national and international time and frequency links, to improve methods for intercontinental clock comparisons and for dissemination to stakeholders, CCTF WG ATFT.

П.14. Позиция ВНИИФТРИ относительно предложений МКМВ по переформулированию определений единиц СИ в соответствии с Резолюциями 24 ГКМВ (2011) и 25 ГКМВ (2014). Делегатом ККВЧ Н.Кошеляевским было дано разъяснение позиции ВНИИФТРИ, отраженной в представленном докладе, которое сводилось к следующему.

Мы считаем, что основное намерение ГКМВ и МКМВ, в частности отраженное в Резолюциях 1 24 ГКМВ (2011) [2] и Резолюции 1 25 ГКМВ (2014) [6], является исключительно позитивным. Сорок пять лет непрерывного прогресса с момента принятия 13 ГКМВ в 1967 нового определения единицы времени СИ – **секунды** [7] и около 30 лет с момента принятия 17 ГКМВ нового определения единицы длины СИ – **метра** [8] наглядно демонстрируют преимущества единиц СИ, определенных на основе инвариантов природы – фундаментальных физических констант или свойств атомов.

Предложенные в Резолюции 1 24 ГКМВ (2011) [2] переформулировки существующих определений **секунды** и **метра** находятся в формальном противоречии с разделом **предлагаемой** Резолюции 1 [2]: **«МКМВ продолжить работы по совершенствованию формулировок для определения базовых единиц СИ в терминах фундаментальных констант, стараясь, по возможности, сформулировать определение, легко понимаемое обычными потребителями, вместе с тем научно строгое и ясное».**



Фотография участников 20 сессии Консультативного Комитета по времени и частоте

Отделение времени ВНИИФТРИ поддерживает Резолюцию 1 24 ГКМВ (2011) в части определения базовых единиц СИ на основе инвариантов природы. Вместе с тем ВНИИФТРИ не склонно переформулировать определение базовых единиц СИ времени и длины, которые на протяжении десятилетий успешно доказали свою состоятельность, основанную на основе инвариантов природы, и лингвистическую ясность.

Заключение

Основная тематическая направленность 20-й сессии ККВЧ – совершенствование формирования шкалы Международного атомного времени ТАИ и путей решения связанных с этим проблем:

- рост числа первичных CS стандартов частоты, дающих регулярный вклад в формирование размера единицы времени секунды СИ;
- совершенствование оценок неопределенности первичных CS стандартов частоты;
- совершенствование существующих каналов сличений удаленных часов и стандартов частоты;
- разработка и исследование новых технологий сличений удаленных часов и стандартов частоты;
- разработка и исследование новых стандартов частоты, в том числе в оптическом диапазоне, и совершенствование оценок их неопределенности для вторичного представления секунды СИ;
- разработка путей к возможному переопределению единицы времени секунды СИ и использованию новых стандартов частоты, в том числе в оптическом диапазоне.

Учитывая планируемую 26 ГКМВ в 2018 г., в повестку дня которой включено рассмотрение возможного переформулирования определений единиц СИ в соответствии с Резолюциями 24 ГКМВ (2011) и 25 ГКМВ (2014), следующая 21 сессия ККВЧ планируется 15-16 июня 2017 г. [9] с повесткой дня о подготовке рекомендаций по определению атомных шкал времени, которые должны быть представлены сначала в МКМВ, а затем ГКМВ в 2018 г.

Литература

1. Résolution 1. Sur l'éventuelle révision à venir du Système international d'unités, le SI, Résolutions adoptées par la Conférence générale des poids et mesures (24e réunion), Paris, 17-21 octobre 2011.
2. PV, 38, 110-111 and Metrologia, 1971, 7, 43.
3. Declaration of the CCDS, BIPM Com. Cons. Déf. Seconde, 1980, 9, S 15 and Metrologia, 1981, 17, 70).
4. Résolution 9, Sur l'adoption d'un système de référence terrestre commun, Résolutions adoptées par la Conférence générale des poids et mesures (24e réunion), Paris, 17-21 octobre 2011.
5. Résolution 1. Sur la révision à venir du Système international d'unités, le SI, Résolutions adoptées par la CGPM lors de sa 25e réunion (18-20 novembre 2014).
6. 2.1.1.3 Unité de temps (seconde). Le Système international d'unités (SI), 8e édition 2006, p.22. Organisation intergouvernementale de la Convention du Mètre, Édité par le BIPM, Pavillon de Breteuil, F-92312 Sèvres Cedex, France.
7. 2.1.1.1 Unité de longueur (mètre), Le Système international d'unités (SI), 8e édition 2006, p.22. Organisation intergouvernementale de la Convention du Mètre, Édité par le BIPM, Pavillon de Breteuil, F-92312 Sèvres Cedex, France.
8. Pre-announcement 21st Meeting of the CCTF in 2017, Dr Elisa Felicitas Arias, Executive Secretary Consultative Committee for Time and Frequency, CCTF, Bureau international des poids et mesures, BIPM, Pavillon de Breteuil – 92312 Sèvres Cedex – FRANCE.