Участие в международной метрологической деятельности

УДК 006.92.521.9

IV. УЧАСТИЕ В МЕЖДУНАРОДНОЙ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ 21-Й СЕССИИ (2017) КОНСУЛЬТАТИВНОГО КОМИТЕТА ПО ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЕ (CCTF) МЕЖДУНАРОДНОГО КОМИТЕТА ПО МЕРАМ И ВЕСАМ (CIPM)

Н.Б. Кошеляевский, А.В. Наумов

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

В работе приведена информация о 21-м заседании Консультативного комитета по мерам и весам 2017 г., приводится тематика заседаний

Summary. The paper introduce the review of technique and technology for time and frequency measurements and CCTF Working Group draft of Recommendations approved by CCTF 21 meeting (2017)

Ключевые слова: время, частота, точностные характеристики

Введение

На протяжении ряда лет Международный Комитет по мерам и весам (CIPM) образовал несколько Консультативных Комитетов (CC), которые объединили мировых экспертов в специализированных областях в качестве консультантов по научным и техническим вопросам. Задачами этих CC является рассмотрение достижений физики, которые могут непосредственно влиять на метрологию, подготовка рекомендаций для обсуждения в CC, установление, планирование и выполнение ключевых сличений (KC) национальных эталонов, подготовка советов для CIPM по научной деятельности в лабораториях МБМВ (BIPM).

В настоящее время в составе CIPM 10 CC [1]:

CCAUV	Консультативный Комитет по акустике, ультразвуку и вибрации
CCEM	Консультативный Комитет по электричеству и магнетизму
CCL	Консультативный Комитет по длине
CCM	Консультативный Комитет по массе и связанным величинам
CCPR	Консультативный Комитет по фотометрии и радиометрии
CCQM	Консультативный Комитет по количеству вещества
CCRI	Консультативный Комитет по ионизирующим излучениям
CCT	Консультативный Комитет по термометрии
CCTF	Консультативный Комитет по времени и частоте
CCU	Консультативный Комитет по единицам

КС заседают на нерегулярной основе (CCTF обычно раз в три года). Президент каждого КС назначается и обычно является членом CIPM. Члены КС (институты и другие организации) согласовываются с CIPM, а затем посылают делегатов по их выбору.

Состав CCTF:

President	Mr L. Erard	Member of the CIPM	Laboratoire National de Métrologie et d'Essais	France
Executive Secretary	Dr E.F. Arias	Director of the Time Department	Bureau International des Poids et Mesures	France

Members:

All-Russian Scientific Research Institute of Physical Technical Measurements, Rosstandart [VNIIFTRI]	Moscow
Central Office of Measures [GUM]	Warsaw
Centro Nacional de Metrologia [CENAM]	Querétaro
Federal Institute of Metrology METAS [METAS]	Bern-Wabern
Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica [INRIM]	Turin
Korea Research Institute of Standards and Science [KRISS]	Daejeon
National Institute of Information and Communications Technology [NICT]	Tokyo
National Institute of Metrology [NIM]	Beijing
National Institute of Standards and Technology, United States Department of Commerce [NIST]	Gaithersburg
National Measurement Institute, Australia [NMIA]	Lindfield
National Metrology Institute of Japan, AIST [NMIJ/AIST]	Tsukuba
National Metrology Institute of South Africa [NMISA]	Pretoria
National Metrology Institute of Turkey [UME]	Gebze-Kocaeli
National Physical Laboratory [NPL]	Teddington
National Physical Laboratory of India [NPLI]	New Delhi
National Physical Laboratory of Israel [INPL]	Jerusalem
National Research Council of Canada [NRC]	Ottawa
Observatoire de Paris/ Système de Références Temps-Espace [LNE-SYRTE]	Paris
Observatoire Royal de Belgique [ORB]	Brussels
Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB]	Braunschweig
Real Instituto y Observatorio de la Armada [ROA]	Cadiz
RISE Research Institutes of Sweden AB [RISE]	Bores
Space Research Centre of Polish Academy of Sciences [SRC]	Warsaw
Technical University of Graz [TUG]	Graz
U.S. Naval Observatory [USNO]	Washington D.C.
VSL B.V. [VSL]	Delft

Liaison(s):

International Astronomical Union [IAU]	
International GNSS Service [IGS]	Pasadena, CA
International Telecommunication Union, Radiocommunication Bureau [ITU-R]	Geneva
International Union of Geodesy and Geophysics [IUGG]	Potsdam
International Union of Radio Science [URSI]	Gent

Official observer(s):

Agency for Science, Technology and Research [NMC, A*STAR]	Singapore
Ministry of Higher Education, Science and Technology, Metrology Institute [MIRS]	Celje
Observatyrio Nacional/Divisio Servizo da Hora [ON/DSHO]	Rio de Janeiro

Note:

The Director of the BIPM is a member, ex officio, of all Consultative Committees.

Заседания CCTF обычно продолжаются полностью два рабочих дня, но им всегда предшествуют заседания Рабочих групп CCTF (CCTF WG) по конкретным техническим и метрологическим вопросам. О тематике этих заседаний можно судить по названиям CCTF WG. В настоящее время в составе CCTF 9 WG, в которых могут быть отдельные подгруппы:

WGFS CCL-CCTF Frequency Standards Working Group
WGATFT CCTF Working Group on Coordination of the Development of Advanced Time and Frequency Transfer Techniques
WGGNSS CCTF Working Group on GNSS Time Transfer
WGPSFS CCTF Working Group on Primary and Secondary Frequency Standards
WGSP CCTF Working Group on Strategic Planning
WGTAI CCTF Working Group on TAI
WGMRA CCTF Working Group on the CIPM MRA
WGALGO CCTF Working Group on Time Scale Algorithms
WGTWSTFT CCTF Working Group on Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer

О ходе заседаний CC CIPM и сопутствующих WG

21-е заседание Консультативного комитета МКМВ по времени и частоте и предшествующие заседания Рабочих групп состоялись в период с 06 по 09 июня 2017 г. в соответствии со следующим графиком [2]:

21st Meeting of the CCTF and satellite meetings

BIPM, 6 to 9 June 2017

Day	Session	Meeting	Meeting
Tuesday 6	Morning	CCL/CCTF FS WG joint with WG PSFS	WG MRA
	Afternoon	CCL/CCTF FS WG	WG GNSS
Wednesday 7	Morning	Meeting of TAI contributing labs	
	Afternoon	Joint meeting of WG TAI and CCTF members and observers (*)	WG ATFT and SGOF (**)
Thursday 8	All day	21st CCTF	
Friday 9	All day	21st CCTF	

Заседания Рабочих групп начались *6 июня*. В первой половине дня Объединённой Рабочей группы Консультативных Комитетов по длине/времени и частоте (CCL/CCTF FS WG) совместно с Рабочей группой по первичным стандартам частоты и стандартам частоты для вторичного представления секунды (WG PSFS) и в параллель WG MRA (Рабочая группа по Соглашению о взаимном признании).

Рис. 1. 21-е заседание КК объединенной рабочей группы, 2017

Основная тематика заседаний CCL/CCTF FS WG совместно с WG PSFS – анализ новых поступлений результатов измерений частот перспективных стандартов частоты, в первую очередь оптического и ультрафиолетового диапазонов, в качестве потенциальной базы для переопределения секунды СИ с заметным повышением точности, до двух порядков. Кроме того, это разработка и отслеживания выполнения дорожной карты для возможного осуществления подобного перехода.

Фактическими результатами работы этого заседания рабочих групп были два документа:

Во-первых, модифицированный список рекомендованных частот источников излучения для реализации единицы длины СИ – метра и вторичной реализации единицы времени СИ – секунды [3]. Сам список с некоторыми комментариями CCL/CCTF FS WG представлен ниже. Он состоит из трех разделов:

частоты, которые обсуждались, но решение по модификации их величин не предлагалось;

частоты, которые обсуждались и величины которых рекомендовано модифицировать;

новые источники для вторичного представления секунды.

В окончательном виде список будет доступен на сайте Международного Бюро мер и весов (BIPM) http://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies.html через непродолжительное время.

The following frequencies have been discussed but no update is suggested

^{1}H

CIPM recommendation: f(^{1}H) = 1 233 030 706 593 514 Hz ± $9\cdot10^{-15}$

New calculation: f(^{1}H) = 1 233 030 706 593 513.6538 Hz ±3.7 Hz

Proposed Recommendation: f(^{1}H) = 1 233 030 706 593 514 Hz ± $9\cdot10^{-15}$

No update (since no new data available)

$^{27}Al^{+}$

CIPM recommendation: f(^{27}Al) = 1 121 015 393 207 857.3 Hz ±$1.9\cdot10^{-15}$

New calculation: f(^{27}Al) = 1 121 015 393 207 857.3031 Hz ± 0.7235 Hz

Proposed Recommendation: f(^{27}Al) = 1 121 015 393 207 857.3 Hz ±$1.9\cdot10^{-15}$

No update (since no new data available)

$^{199}Hg^{+}$

CIPM recommendation: f($^{199}Hg^{+}$) = 1 064 721 609 899 145.30 Hz ±$1.9\cdot10^{-15}$

New calculation: f($^{199}Hg^{+}$) = 1 064 721 609 899 145.2122 Hz±0.6850 Hz

Proposed Recommendation: f($^{199}Hg^{+}$) = 1 064 721 609 899 145.2 Hz ±$1.9\cdot10^{-15}$

In principle, the recommended value ought to be 0.1 Hz lower, i.e. ...145.2, but since this difference is negligible compared to the recommended uncertainty and since there are no new data available

No update

$^{171}Yb^{+}$(E2 or quadrupole)

CIPM recommendation: f($^{171}Yb^{+}$, E2) = 688 358 979 309 308.3 ±$6\cdot10^{-16}$

New calculation: f($^{171}Yb^{+}$, E2) = 688 358 979 309 308.3180 Hz±0.2176 Hz

Proposed Recommendation: f($^{171}Yb^{+}$, E2) = 688 358 979 309 308.3 Hz ± $6\cdot10^{-16}$

No update (since no new data available)

$^{171}Yb^{+}$(E3 or octupole)

CIPM recommendation: f($^{171}Yb^{+}$, E3) = 642 121 496 772 645.0±$6\cdot10^{-16}$

New calculation: f($^{171}Yb^{+}$, E3) = 642 121 496 772 645.0259 Hz ±0.1623 Hz

Proposed Recommendation: f($^{171}Yb^{+}$, E3) = 642 121 496 772 645.0 Hz ± $6\cdot10^{-16}$

No update (since no new data available)

^{40}Ca

CIPM recommendation: f(^{40}Ca) = 455 986 240 494 140 Hz ±$1.8\cdot10^{-14}$

New calculation: f(^{40}Ca) = 455 986 240 494 138.1907 Hz ±2.862 Hz

Proposed Recommendation: f(^{40}Ca) = 455 986 240 494 140 Hz ±$1.8\cdot10^{-14}$

No update (since no new data available)

The following frequencies have been discussed and are recommended for an update

$^{115}In^{+}$

CIPM recommendation: f($^{115}In^{+}$) = 1 267 402 452 899 920 Hz ±$3.6\cdot10^{-13}$

New calculation: f($^{115}In^+$) = 1 267 402 452 901 050.2866 Hz ±20.62 Hz
Proposed Recommendation: f($^{115}In^+$) = 1 267 402 452 901 050 Hz ± $1.6\cdot10^{-14}$

^{199}Hg
CIPM recommendation: f(^{199}Hg) = 1 128 575 290 808 154.8 Hz $\pm6\cdot10^{-16}$
New calculation: f(^{199}Hg) = 1 128 575 290 808 154.4163 Hz ± 0.1423 Hz
Proposed Recommendation: f(^{199}Hg) = 1 128 575 290 808 154.4 Hz $\pm5\cdot10^{-16}$
^{171}Yb
CIPM recommendation: f(^{171}Yb) = 518 295 836 590 864.0 $\pm2\cdot10^{-15}$
New calculation: f(^{171}Yb) = 518 295 836 590 863.6440 Hz ± 0.0609 Hz
Proposed Recommendation: f(^{171}Yb) = 518 295 836 590 863.6 Hz $\pm5\cdot10^{-16}$
$^{88}Sr^+$
CIPM recommendation: f($^{88}Sr^+$) = 444 779 044 095 486.6 Hz $\pm1.6\cdot10^{-15}$
New calculation: f($^{88}Sr^+$) = 444 779 044 095 486.4697 Hz ± 0.219 Hz
Proposed Recommendation: f($^{88}Sr^+$) = 444 779 044 095 486.5 Hz $\pm1.5\cdot10^{-15}$
^{88}Sr
CIPM recommendation: f(^{88}Sr) = 429 228 066 418 012 Hz $\pm1\cdot10^{-14}$
New calculation: f(^{88}Sr) = 429 228 066 418 007. 0377 Hz ± 0.048 Hz
Proposed Recommendation: f(^{88}Sr) = 429 228 066 418 007.0 Hz$\pm1\cdot10^{-15}$

This uncertainty has not been discussed yet finally by the WGFS. The low uncertainty of the calculated value depends entirely on the estimated uncertainty of the Takano 2017 standard which is much less solid than the bulk of the ^{87}Sr data. It therefore seems prudent to enlarge the final ^{88}Sr uncertainty by a factor of 2.5 with respect to the ^{87}Sr data. (To be discussed on 6 June)
^{87}Sr
CIPM recommendation: f(^{87}Sr) = 429 228 004 229 873.2 Hz $\pm5\cdot10^{-16}$
New calculation: f(^{87}Sr) = 429 228 004 229 873.0357 Hz ± 0.047 Hz
Proposed Recommendation: f(^{87}Sr) = 429 228 004 229 873.0 Hz $\pm4\cdot10^{-16}$
$^{40}Ca^+$
CIPM recommendation: f($^{40}Ca^+$) = 411 042 129 776 398.4 Hz $\pm1.2\cdot10^{-14}$
New calculation: f($^{40}Ca^+$) = 411 042 129 776 399.7934 Hz±0.5458 Hz
Proposed Recommendation: f($^{40}Ca^+$) = 411 042 129 776 399.8 Hz $\pm2.4\cdot10^{-15}$
This uncertainty has not been discussed yet finally by the WGFS. The previously included value of Chwalla2009 value now has very little effect and so the recommended frequency value comes essentially only from measurements made by two labs. It therefore seems prudent to enlarge the final $^{40}Ca^+$ uncertainty by a factor of 2. (To be discussed on 6 June)
^{87}Rb
CIPM recommendation: f(^{87}Rb) = 6 834 682 610.904 310 Hz $\pm7\cdot10^{-16}$
New calculation: f(^{87}Rb) = 6 834 682 610.904 312 5645 Hz ± $1.177\cdot10^{-06}$ Hz
Proposed Recommendation: f(^{87}Rb) = 6 834 682 610.904 312 6 Hz $\pm7\cdot10^{-16}$

This uncertainty has not been discussed yet by the WGFS since the SYRTE data was not available previously. The final uncertainty has been kept to roughly include the NPL value as the mean goes away from that value.

New Secondary Representations of the Second

The recommended frequency of the ^{199}Hg lattice clock transition
$f(^{199}\text{Hg}) = 1\ 128\ 575\ 290\ 808\ 154.4\ \text{Hz} \pm 5\cdot 10^{-16}$
has now an uncertainty which is comparable to that of primary caesium fountain clocks. The WGFS on request of SYRTE therefore suggests a recommendation of this standard as a new Secondary Representation of the Second with the estimated fractional standard uncertainty of $5\cdot 10^{-16}$.

А во-вторых, проект Рекомендации CCL/CCTF FS WG [3] «О списке рекомендованных частот». Этот документ касается списка рекомендованных частот стандартов частоты для применения при практической реализации метра и вторичного представления секунды. Полный текст Рекомендации в [4], а здесь мы коснемся его рекомендательной части.

«**Рекомендует**:

учреждениям прилагать усилия по работе стандартов частоты для вторичного представления секунды (SRS) таким образом, чтобы они регулярно давали вклад в TAI, сообщая результаты в BIPM,

сличать лучшие оптические стандарты с неопределённостями, сопоставимыми с неопределённостями самих стандартов,

учреждениям измерять частоты их SRS с наиболее низкой неопределенностью относительно лучших первичных цезиевых реперов в качестве выполнения необходимых требований по возможному будущему переопределению секунды в единицах периодов оптических переходов,

формальные этапы переопределения уже указаны, и МКМВ будет информироваться о текущем состоянии процесса.»

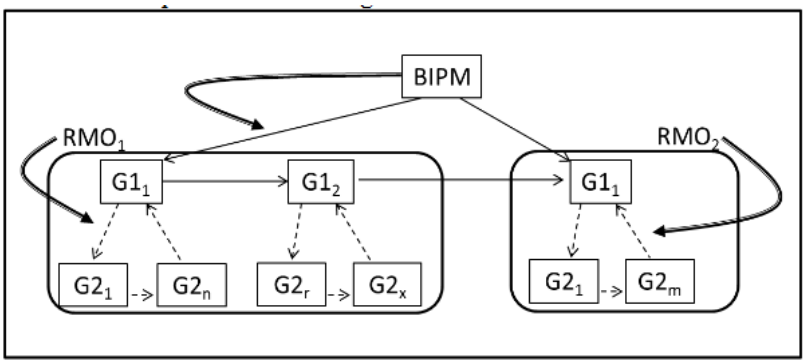
Таким образом, проект Рекомендации CCL/CCTF FS WG подталкивает лаборатории к практическим работам по использованию SRS, одновременно напоминая о необходимости следования дорожной карте для возможного в будущем переопределении секунды в единицах периодов оптических переходов.

Во второй половине дня *6 июня* состоялось заседание Рабочей группы ККВЧ по передаче времени с помощью ГНСС (WGGNSS) под председательством P. Defraigne (ORB).

Рис. 2. Заседание Рабочей группы ККВЧ по передаче времени с помощью ГНСС

Полный оригинальный текст отчета WGGNSS [5].
Основные вопросы повестки дня WGGNSS:
Состояние калибровок.
Руководство по проведению калибровок.
Результаты калибровок.
Новый формат данных CGGTTS V2E.
Использование новых «созвездий» ГНСС для передачи времени.
Рекомендация WGGNSS.
Состояние калибровок.
Реализация решений ККВЧ 20.
Лаборатории группы 1 в региональных организациях:
EURAMET: OP, PTB, ROA
SIM: NIST, USNO
APMP: NICT, NIM, TL
COOMET: SU

С принятием на *20 заседании* ККВЧ новой, двухуровневой схемы проведения калибровок каналов сличений с использованием сигналов ГНСС [5], направленной на полный охват калибровками всех лабораторий-вкладчиков TAI, лаборатории группы 1 EURAMET, SIM и APMP провели по несколько калибровочных кампаний, результаты которых отражены в отчетах о калибровках [6] и разделе 5 Циркуляра T [7]. Вместе с тем отмечено, что КООМЕТ, несмотря на широкий состав стран-участниц (20 стран, включая 5 ассоциированных), не проявил должной активности в калибровочной работе с лабораториями группы 2.



Schema of the GNSS calibration organization for the UTC generation. G1 and G2 refer to Group 1 and Group 2 laboratory, the curved arrows shows the organization responsibility. Solid arrows represent Group 1 trips and dashed arrows represent Group 2 trips.

Рис. 3

CALEX формат

Результаты сличений разности шкал времени на основе обработки кодовых измерений хорошо документированы на основе Technical Directives [8], при этом необходимая информация об использованных временных задержках содержится в заголовочной части CGGTTS файлов, использование технологии PPP дает решение лишь на основе аппаратных задержек приемной аппаратуры. Для облегчения доступа к результатам калибровок и внесения поправок на аппаратные задержки приемной аппаратуры в PPP решениях WGGNSS предложила использовать уникальный файл, содержащий результаты калибровок всех приемников в сети TAI. Этот файл с именем CALEX будет содержать полную историю калибровок и может быть использован при обработке любых RINEX файлов. Пробная версия CALEX была сформирована на основе имеющейся информации по калибровкам Групп 1 и 2 и возмещена для вкладчиков TAI на BIPM ftp сервере.

Разность моментов времени в сигналахC1- P1

WGGNSS напомнила, что существует разность в моментах выхода сигналов со спутника для C1 и P1. В решениях IGS принимается, что величина этой разности усредненная по всем спутникам, равна 0. Это может давать ошибки по сравнению с истинным значением, которое может быть получено на основе абсолютной калибровки. Поэтому результаты для часов, полученные с приемников только по коду C1 наиболее вероятно подвержены некоторым отстройкам. Эти отстройки могут быть определены на основе абсолютной калибровки наземной приемной аппаратуры раздельно по P1 и C1. В отсутствие её, BIPM предложило для начала договорное начальное опорное значение для C1 сигналов приемников Группы 1, которое будет

использовано в качестве основы для будущих C1 дифференциальных калибровок. Другой альтернативой могло бы быть использование в качестве основы для C1 межсигнальных поправок доступных в Гражданском навигационном сообщении некоторых современных спутников.

R2CGGTTS – программный продукт для формирования CGGTTS файлов для различных ГНСС

Королевская обсерватория Бельгии (ORB) разработала и разослала в лаборатории времени новый программный продукт R2CGGTTS (version 7.1), позволяющий обрабатывать RINEX3 файлы для GPS, GLONASS и Galileo. Этот программный продукт выдает CGGTTS файл в формате версии V2E.

Precise Point Positioning

Некоторые члены WGGNSS продолжают совершенствовать технику PPP для обработки данных сличений удаленных часов. Основные усилия направлены на получение непрерывного решения и смягчения воздействия на решение возможных разрывов между решениями внутри пакета. Исследования в нескольких направлениях, таких как: удлинение пакетов данных или использование скользящего перекрытия пакетов. Эти подходы дают сопоставимые результаты на месячных интервалах при использовании BIPM для формирования UTC. Другим подходом к совершенствованию PPP является разрешение неоднозначности фазы несущей в виде целого числа циклов. Исследования BIPM показывают, что в этом случае точность передачи частоты может достигать $1 \cdot 10^{-16}$ на нескольких сутках и даже выше на более длительных интервалах.

Долговременная нестабильность измерений между TW и GPS каналами сличений

В течение последней двухлетки начала работу Объединённая целевая группа WG TWSTFT и WG GNSS по изучению долговременной стабильности каналов сличений для UTC. Было установлено, что, хотя есть много стабильных каналов, но вместе с тем в некоторых случаях наблюдаются временные вариации в несколько нс. Они могут быть как в только GNSS, только TWSTFT, так и в разностях GNSS и TWSTFT. Также отмечалось, что стабильность измерений на протяжении нескольких лет не гарантирует дальнейшей стабильности в будущем. При этом подобные дрейфы могут начаться или остановиться без видимых причин. И хотя подобные дрейфы часто могут быть сравнительно быстро идентифицированы с помощью независимых резервных каналов сличений, исключительно важная вспомогательная информация может быть получена на основе более частых

калибровок.
С целью лучшего мониторинга стабильности аппаратурных задержек GNSS и TWSTFT, WGGNSS и WG TWSTFT подготовили специальную совместную рекомендацию.

Рекомендация «Об использовании и мониторинге вспомогательного оборудования передачи времени в лабораториях времени, дающих вклад в UTC»

Консультативный Комитет по времени и частоте (ККВЧ)
сознавая, что
атомные стандарты частоты достигли беспрецедентной точности и правильности …;
возможность сличений этих стандартов для реализации UTC ограничена правильностью, точностью и стабильностью оборудования каналов сличений по времени;

принимая во внимание, что

данные по сличениям по времени и частоте с использованием GNSS и TWSTFT играют важную роль в реализации UTC;
регулярные калибровки каналов сличений и GNSS оборудования, выполняемые при взаимодействии BIPM, региональных метрологических организаций (РМО) и лабораторий-вкладчиков в UTC, дают неопределенность калибровок уровня 1 – 1.5 нс;
вариации аппаратных задержек в данных сличений, по времени ограничивают действенность результатов калибровки, а случайные вариации в измерениях, также ограничивают возможность комбинирования данных от вспомогательных приемников и дополнительных технических средств.

Замечая, что

Рекомендация CCTF 4 (2012) призывала лаборатории-вкладчики UTC модернизировать их GNSS оборудование в сторону многочастотных и многосистемных приемников, обеспечивающих кодовые и фазовые измерения на, по крайней мере, трех устройствах;
калибровка GNSS приемников лабораторий Группы 1, назначенных региональными метрологическими организациями (RMO), имеет особое значение, поскольку она последовательно влияет на калибровки и каналы сличений множества других лабораторий;
вариации разности между GNSS системами в режиме общих часов (CCD),

а также вариации вторых разностей часов (DCD) между GNSS GPS и TWSTFT каналами сличений превосходят суммарные неопределенности большинства недавних калибровок;

несколько продолжающихся исследований рассматривают пути снижения влияния вариаций калибровок на системы передачи времени.

Рекомендует:

чтобы лаборатории-участники формирования UTC

- поддерживали по меньшей мере два (три, для лабораторий Группы 1) приемных устройства независимых GNSS, ряд из которых должны быть современными, если позволяют ресурсы;
- представлять в BIPM данные с резервных GNSS;
- осуществлять мониторинг CCD и таких внутренних характеристик лабораторных опорных сигналов как форма импульсных секундных сигналов на входах систем передач на годовых или других подходящих интервалах;
- документировать все существенные изменения в расположении и конфигурации аппаратуры передачи и сообщать их в BIPM;
- документировать и поддерживать как внешние, так и существенные внутренние, температуру и влажность и сообщать их в BIPM;
- калибровать по меньшей мере один оперативный канал сличений каждые два года.

Рекомендует, чтобы BIPM и CCTF WG TWSTFT и WG GNSS Time Transfer

- координировали время калибровок и TWSTFT и GNSS для того, чтобы они могли сравниваться, что, в свою очередь, дало бы возможность изучать сезонные факторы и минимизировать их влияние;
- изучали влияние вводимых результатов калибровки на долговременные ряды CCD и DCD.

Рекомендует, чтобы BIPM

- продолжил публиковать вычисляемые им разности передачи времени (каналы и сравнение каналов) на их web-страницах в компьютерночитаемых файлах с самодокументированными именами;
- продолжил публиковать информацию о конфигурации систем и результатах калибровки на своих web-страницах наряду с сопутствующими отчетами;
- продолжил изучение использования резервных систем передачи времени для формирования UTC;

- добавлял в базу данных временных измерений информацию о температуре и влажности станций и сделал её доступной для WG;
- добавлял в базу данных временных измерений структуру станций и изменения конфигурации, существенные для передачи времени.

Полный оригинальный текст Рекомендации WGGNSS [10]

Заседания *07 июня* были посвящены в первую очередь деятельности Рабочей группы по международному атомному времени (WG TAI). При этом в первую половину дня работа была сосредоточена на вопросах Отделения Времени BIPM и сообщений с мест лабораторий-вкладчиков TAI, а также обсуждении предлагаемых для CCTF проектов Рекомендаций. Во второй половине дня при участии не только членов WG TAI, но всех делегатов и обозревателей CCTF, была развернута дискуссия по проекту Рекомендации специальной Целевой группы (Task Group) WG TAI «Об определении шкал времени».

Основные темы Отделения Времени BIPM (BIPM TD) и сообщений с мест лабораторий-вкладчиков TAI

BIPM, RMO и NMI достигли определенных успехов в организации регулярных калибровок GPS оборудования лабораторий-вкладчиков в TAI, что позволило заметно снизить неопределенность калибровки до уровня 1.5 нс и 2.5 нс для лабораторий уровня G1 и G2 соответственно. Вместе с тем WG TAI подчеркивала отставание КООМЕТа в этом направлении. В комментарии делегата ВНИИФТРИ говорилось о том, что отсутствие у КООМЕТа бюджета, в том числе и на подобную деятельность, создает организационные и финансовые проблемы, поскольку требует трансграничного перемещения измерительного оборудования.

BIPM TD отметил некоторое снижение потока измерительной информации с первичных стандартов частоты по сравнению с 2014 годом. Делегаты объясняли это необходимостью ремонтно-восстановительных работ и работ по обслуживанию этих установок. Вместе с тем было около десятка сообщений о новых первичных стандартах и стандартах для вторичного представления секунды, находящихся в стадии разработки или исследования по оцениванию характеристик.

BIPM TD подчеркнул необходимость нового алгоритма для оценок неопределенности UTC-UTC(k) в связи с необходимостью устранения негативных эффектов «звездной» структуры сличений шкал времени и наличия корреляции в измерительной информации. Расширенный подход к этой проблеме должен также включать вопросы использования избыточных каналов сличений.

WG TAI отметила позитивный результат в исследовательском проекте WG TWSTFT по снижению суточной компоненты в шумах TW каналов. Это было достигнуто в результате использования TW приемной аппаратуры с программной обработкой сигнала (Software Defined Radio - SDR). SDR технология с успехом может быть использована, по крайней мере, на коротких расстояниях.

Представленные WG GNSS Time Transfer и WG TWSTFT проекты Рекомендаций были рассмотрены и поддержаны участниками заседания WG TAI.

Как уже упоминалось, *во второй половине дня* была развернута *дискуссия по проекту Рекомендации специальной Целевой группы (Task Group) WG TAI «Об определении шкал времени»*.

Эта Task Group была создана CCTF в рамках WG TAI в 2016 г. со следующими задачами:

проанализировать настоящее состояние шкал времени;

подготовить проект рекомендации по формальному определению UTC и TAI;

подготовить проект рекомендации по шкале времени, которая могла быть принята в качестве опорной на Всемирной конференции радиосвязи 2023 (WRC-23).

Radiocommunication Study Groups

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION

Document 7A/TEMP/6-E
26 October 2016
English only

Working Party 7A

RAPPORTEUR REPORT

Task Group on Time Scales Definition Meeting Report

Meeting Location: BIPM Sevres, France

Meeting Date: September 28, 2016

Task Group Members: Andreas Bauch (PTB), Yuko Hanado (NICT, CCTF WG Algos), Paul Koppang (Rapporteur WP7A/ITU-R, USNO), Judah Levine (NIST), Patrizia Tavella (INRIM), Daniele Rovera (LNE-SYRTE), Peter Whibberley (NPL), Luc Erard (President CCTF), Felicitas Arias (BIPM, CCTF WG TAI), Gerard Petit (BIPM)

Meeting Notes:

This was the initial meeting of the Task Group

The Task Group charge:

- Review the present status of time scales
- Draft recommendations on formal definitions of UTC and TAI
- Draft recommendation on the time scale to be adopted as a reference following WRC-23

Task Group recommendation target dates:

- CCTF (Consultative Committee for Time and Frequency), June 2017
- CIPM (International Committee for Weights and Measures), October 2017
- CGPM (General Conference on Weights and Measures), 2018

Timelines of the Task Group were established in order to meet the deadline for a proposal to be considered for the CGPM meeting in 2018. There will be a CGPM meeting in 2022, but there is concern that will not give sufficient time prior to the WRC-23 in 2023.

The Task Group will begin working on draft definitions of time scales being open to the possibility of continuous time scales in the future. Future work will be done in cooperation with the ITU.

There were discussions on the complications that improved frequency standards present with respect to relativistic terms that were previously able to be neglected in time scale work.

Рис. 4

При этом для рекомендаций Task Group был установлен следующий календарь:

CCTF (Консультативный Комитет по времени и частоте), июнь 2017;

CIPM (Международный Комитет по мерам и весам), октябрь 2017;

CGPM (Генеральная Конференция по мерам и весам), 2018.

Приведенный выше Протокол первого заседания содержит состав участников Task Group и затронутые вопросы.

Во исполнение поручения CCTF Task Group разработала проект рекомендации, который в *марте 2017* был доведен до потенциальных участников CCTF и других заинтересованных сторон. Именно этот документ и был предметом обсуждения на 11 заседании WG TAI. Полный текст Рекомендации приведен в [11].

Рекомендация «Об определении шкал времени»

Консультативный Комитет по Времени и Частоте (ККВЧ),

принимая во внимание, что

решением 1, 14-ая ГКМВ (1971) просила МКМВ дать определение шкалы Международного Атомного Времени (TAI);

никакого завершенного самодостаточного определения TAI МКМВ представлено не было, хотя Консультативный Комитет по определению секунды (CCDS) предложил в своей Рекомендации S2 (1970) определение, которое было затем расширено Заявлением CCDS в 1980;

15^{я} ГКМВ в 1975 г. отмечала, что шкала Всемирного Координированного Времени (UTC), получаемая на основе TAI, обеспечивает основу гражданского времени и настойчиво рекомендовала её использование;

сознавая, что

ГКМВ отвечает за определение метрологических стандартов, в то время как Международный Астрономический Союз (IAU) и Международный Союз Геодезии и Геофизики (IUGG) совместно с Международной Ассоциацией Геодезии (IAG) несут ответственность за определение опорных систем для Земли и космических приложений, а Международный Союз Электросвязи (ITU) отвечает за координацию распространения сигналов времени и частоты и разработку относящихся к этому рекомендаций.

Решение IAU A4 (1991) определило в рамках общей теории относительности в Рекомендациях 1 и 2 систему пространственно-временных координат для Земли (Геоцентрическую опорную систему) и в Рекомендации 3 присвоила её временной координате название Геоцентри-ческое Координатное Время (TCG);

затем Резолюция IAU A4 (1991) в Рекомендации 4 определила другую временную координату для Геоцентрической Системы – Земное Время (Terrestrial Time (TT)), отличающееся от TCG постоянным ходом, единица времени в TT была выбрана так, чтобы она совпадала с секундой СИ на геоиде.

Резолюция IAU B1.9 (2000) переопределила TT как шкалу времени, ход которой отличается от TCG на постоянную величину dTT/dTCG = 1-LG, где LG = $6.969290134 \cdot 10^{-10}$ определенная константа, избранная для согласования с величиной W0 = 62636856 m^2s^{-2} гравитационного потенциала на геоиде, который был рекомендован Специальной комиссией 3, IAG в 1999.

Переопределение TT в 2000 г. привело к неоднозначности между TT и TAI, поскольку CCDS заявило в 1980 г., что TAI является *«секундой СИ, реализуемой на вращающемся геоиде в качестве единицы времени шкалы»*. Таким образом, TAI может рассматриваться в качестве реализации TT лишь в меру того, что величина W0 представляет гравитационный потенциал геоида.

Разъясняя, что

TAI является реализацией TT, так как это определено Резолюцией IAU B1.9 (2000), это непрерывная шкала времени, формируемая BIPM на основе лучшей реализации секунды СИ;

……;

в соответствии с Резолюцией IAU A4 (1991) TT-TAI = 32.184 с точно на 1 января 1977, 0h TAI для обеспечения непрерывности TT по отношению к эфемеридному времени (Ephemeris Time);

UTC является исключительной международной опорной шкалой времени и основой гражданского времени в большинстве стран; она формируется BIPM на основе TAI;

UTC может рассматриваться как модифицированная версия TAI, отличающаяся от последней на целое число секунд;

потребители могут оценивать величину UT1 – время на основе вращения Земли, скорректированном на движении полюса, используя прогнозируемое значение разности UT1-UTC, называемое DUT1; в настоящее время | DUT1| не должно превосходить 0.8 с за счет процесса ввода «скачущих» (leap) секунд в UTC, который описан в Рекомендации ITU-R TF.460-6.

Международная Служба Вращения Земли и Опорных Систем (IERS) отвечает за определение величины DUT1 и объявления о вводе «скачущей» (leap) секунды; потребители могут также извлечь информацию о DUT1 напрямую от IERS;

UTC также является средством распространения эталонных частот, однако эта функция ограничена интервалами времени, не содержащими «скачущей» (leap) секунды;

прослеживаемость к UTC достигается через локальные реализации реального времени UTC(k), которые поддерживаются учреждениями «k», дающими вклад в формирование UTC.

Рекомендует следующие определения TAI и UTC:

Международное Атомное Время (TAI) является реализацией Земного Времени (TT) так, как это определено Резолюцией IAU B1.9 (2000) с TT-TAI = 32.184 с точно на 1 января 1977, 0h TAI. TAI это непрерывная шкала

времени, формируемая BIPM на основе лучшей реализации секунды СИ.

Всемирное Координированное Время (UTC) является шкалой времени, формируемой BIPM на основе TAI. UTC, имеет тот же ход, что и TAI, но отличается от TAI на целое число секунд. Процедура подстройки UTC описана в рекомендации ITU. Разность TAI-UTC публикуется BIPM.

Также рекомендует, чтобы

все, имеющие отношение к этому вопросу союзы и организации, рассмотрели эти определения и путем совместной деятельности приобрели общее понимание опорных шкал времени, их реализации и распространения, имея в виду отказ от существующих ограничений максимального значения DUT1, с тем чтобы удовлетворить потребности нынешних и будущих сообществ потребителей;

все, имеющие отношение к этому вопросу, союзы и организации совместной деятельностью усовершенствовали прогнозирование DUT1 и методы распространения UT1 и DUT1, чтобы удовлетворить будущие запросы потребителей.

CCTF/17-01

21st Meeting of the Consultative Committee for Time and Frequency
BIPM, 8-9 June 2017

Draft agenda (31/05/2017)

1. Opening of the meeting: appointment of a rapporteur

2. Review of actions since the last CCTF meeting

   In memoriam Bernard Guinot

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

4. Progress in frequency standards:
   4.1. Operating primary and secondary frequency standards and new standards under development (Delegates)
   4.2. Report of the CCTF Working Group on Primary and Secondary Frequency Standards (S. Jefferts, NIST)
   4.3. Frequency standards in TAI and realisation of TT(BIPM) (G. Petit, BIPM)

5. Time scales UTC and TAI:
   5.1. Report of the CCTF Working Group on TAI (F. Arias, BIPM)
      5.1.1. Task Group on Time Scales Definition
      5.1.2. Future actions in cooperation with the ITU and other international organizations
   5.2. Status of the algorithms for TAI (G. Panfilo, BIPM)
   5.3. Report on Rapid UTC (G. Petit, 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 (V. Zhang, NIST)
   6.2. Report of the WG on GNSS (P. Defraigne, ORB)
   6.3. GNSS calibrations for UTC (BIPM, RMOs, delegates)
   6.4. GNSS processing techniques (BIPM, delegates)
   6.5. Report on activities at the International Committee for GNSS (ICG) (G. Petit, BIPM)

   16 h: Lecture in commemoration of the 50th anniversary of the atomic definition of the second by the CGPM:
   "The History of the Second" by Dr Dennis McCarthy

7. New standards and accurate comparison techniques
   7.1. Report of the CCL/CCTF Working Group on the Secondary Representations of the Second (F. Riehle, PTB and P. Gill, NPL)
   7.2. Report of the CCTF WG on coordination of the development of advanced time and frequency transfer techniques (F.-L. Hong, NMIJ)
      7.2.1. Report on the status of fibre links (D. Calonico, INRIM)

8. CIPM MRA and RMOs
   8.1. Report on the work of the CIPM ad-hoc WG on implementing the recommendations from the review of the CIPM MRA (L. Erard, CIPM)
   8.2. Report of the CCTF WG on the CIPM MRA (M. Lopez Romero, CENAM)
   8.3. Reports from RMOs Technical Chairs

9. Space-time references and general relativity
   9.1. Report on the IERS Conventions Product Centre (G. Petit, BIPM)
   9.2. News on the IAG Working Group on Relativistic Geodesy (G. Petit, BIPM)
   9.3. News from the international organizations

10. Strategic planning
    10.1. Proposal for the BIPM Time Department programme of work for 2020-2023 (F. Arias, BIPM)
    10.2. Report of the Strategic Planning Working Group
    10.3. CCTF Working Group structure and chairs

11. Recommendations

12. New rules for CCs membership (L. Erard, CIPM)
    12.1. Consideration of requests for membership/observership

13. Other business

Рис. 5

Не касаясь технических аспектов Рекомендации «Об определении шкал времени», очень важно, что наконец был удовлетворен запрос CGPM об определениях UTC и TAI. Но, может быть, еще более важно, что в метрологическом сообществе впервые был достигнут консенсус о возможности отказа от существующих ограничений максимального значения DUT1. Эта проблема обсуждается более 20 лет и впервые на CCTF достигнут консенсус. *Можно надеяться, что CGPM 2018* поддержит это решение своей Резолюцией, и тогда будет пройден еще один шаг по формированию однородной UTC без «скачущей» (leap) секунды. В очередной раз обсуждение этого вопроса будет вынесено на Всемирную конференцию радиосвязи 2023.

Последующие два дня 8-9 июня были посвящены собственно заседаниям CCTF 21 со следующей повесткой дня [12].

Заседания начались с поминовения Б.Гино (Bernard Guinot). Он один из мировой триады основателей Международного Атомного Времени:

д-р Герно Винклер (Gernot Winkler) (1922 - 2016) USNO
д-р Сергей Пушкин (1925 - 2015) ВНИИФТРИ
д-р Бернард Гино (Bernard Guinot) (1925 - 2017) OP – BIPM.

Рис. 6

- ♦ Бернард скончался 6 марта 2017 г. в возрасте 91 года;
- ♦ Он начал с работы на флоте и присоединился к Парижской обсерватории в 1952 г.;
- ♦ В 1958 г. защитил докторскую диссертацию по астролябии Данжона – астрономическому инструменту для наблюдений движений полюса по определению параметров вращения Земли;
- ♦ Директор Международного Бюро Времени, BIH, (1965-1985), расположенного в Парижской Обсерватории в отделении Фундаментальной Астрономии, в настоящее время SYRTE;
- ♦ В 1985 г. им официально перенесена деятельность BIH в BIPM, организовано и возглавлено Отделение Времени МБМВ (BIPM TD);

Им внесен выдающийся вклад в метрологию времени и пространства: создан алгоритм для TAI “ALGOS”, он был активным творцом UTC и сильно поддерживал остановку ввода «скачущей» секунды;

Рис. 7. Б.Гино с С.Б. Пушкиным и В.Г. Ильиным
во время визита во ВНИИФТРИ

В своих комментариях к содержательной части сообщений *на заседаниях CCTF 21* мы остановимся только на материалах, которые не затрагивались на предшествующих заседаниях Рабочих групп. При этом, для удобства, будем придерживаться рубрикации повестки дня [12].

В разделе 5.2 «О состоянии алгоритма TAI» ведущий алгоритмист BIPM G.Panfilo затронула несколько вопросов:

О неопределенностях UTC-UTC(k).

В настоящее время разности UTC-UTC(k) и их неопределенности публикуются в разделе 1 Циркуляра T, при этом не используется измерительная информация с запасных каналов сличений. Отделение Времени BIPM планирует ввести запасные каналы сличений в ближайшем будущем. Это должно дать существенное улучшение оценки каналов сличений и использовать все данные участвующих лабораторий. С другой стороны, это подход оценки неопределенности UTC-UTC(k) повлечет необходимость разработки новых методов оценки неопределенности.

До настоящего времени сеть каналов сличений UTC обеспечивается двумя независимыми технологиями: TWSTFT и GNSS. Текущие величины u_A и u_B, приводимые в разделе 1 Циркуляра T, получены на следующих принципах распространения неопределенности:

они зависят от статистического веса лабораторий в результате работы алгоритма UTC и неопределенности канала;

все каналы сличений замыкают лаборатории на PTB, которая играет роль опорного пункта;

в алгоритме распространения неопределенности не приняты во внимание никакие корреляционные зависимости.

При существующих каналах сличений характеристики настоящего алгоритма распространения неопределенности демонстрируют следующие ограничения:

для оценок лучшего интервала прогнозирования должна использоваться вариация Адамара (Hadamard Variance), что обещает повышение стабильности UTC;

неопределенности опорной лаборатории PTB переоценены и нереалистичны;

неопределенности всех лабораторий сильно коррелированы с неопределенностью USNO (из-за её большого веса в формировании UTC).

Все эти ограничения могут быть преодолены новым распространением неопределенности, в котором будут учтены корреляционные эффекты.

Полный текст по этой теме в [13].

К вопросу о состоянии UTC

Ключевым моментом в формировании UTC является недавно введённое прогнозирование дрейфа частоты часов. Это делается методом наименьших квадратов по разности TT-H_i на интервале 6 месяцев.

Выводы и предложения:

интервал прогнозирования дрейфа должен быть снижен до 3 месяцев во избежание того, что некоторые часы с непредсказуемым дрейфом могут ухудшать долговременную стабильность частоты EAL и UTC.

Для оценок лучшего интервала прогнозирования должна использоваться вариация Адамара (Hadamard Variance), что обещает повышение стабильности UTC;

В дальнейшем для каждых часов должна быть разработана оценка их прогнозируемости для более быстрого обнаружения аномалий часов и исключения их влияния на UTC.

Полный текст по этой теме в [14].

Использование аппарата наименьших квадратов с ограничением степеней свободы для вычисления TT.

При формировании TT на основании измерительной информации первичных и вторичных стандартов частоты алгоритмом используется аппарат наименьших квадратов (МНК).

МНК решение (least square) приписывает «веса» (обозначаемые как «фильтры») первичным и вторичным стандартам частоты при формировнии TT. Иногда фильтры оказываются отрицательными, что не имеет смысла с физической точки зрения.

Использование аппарата наименьших квадратов с ограничением степеней

свободы может преодолеть это затруднение.

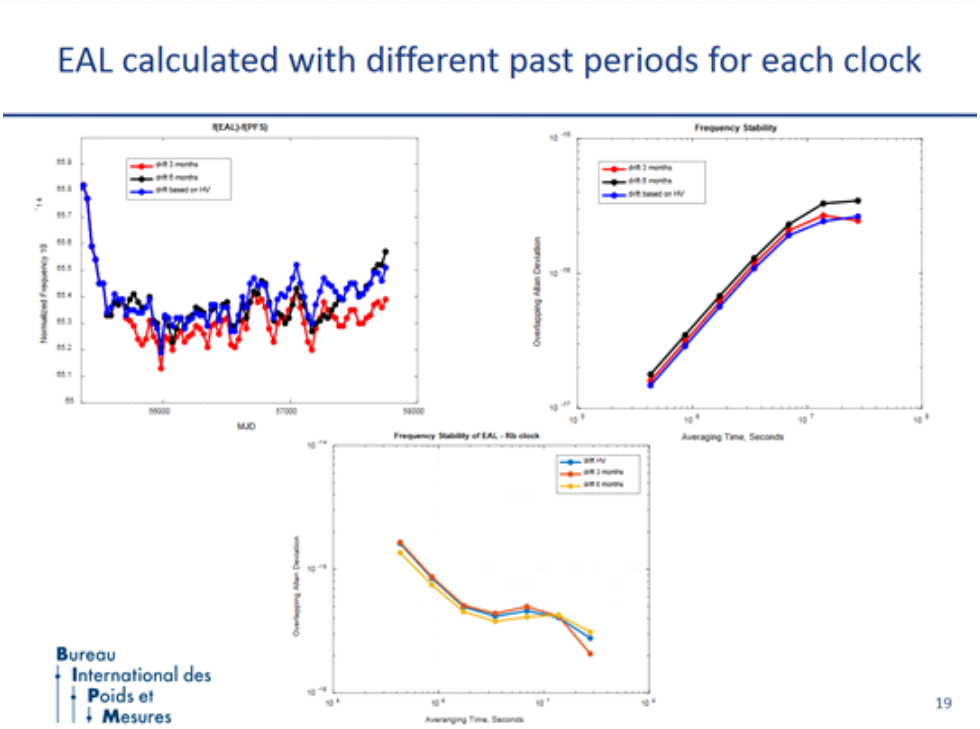


Рис. 8

По п.6 повестки дня «Методы передачи времени и частоты» в п.п. 6.1 В. Жангом, председателем WG TWSTFT, был представлен отчет этой Рабочей Группы [15]. Помимо отчета об оперативной деятельности, в том числе калибровочной активности, и состояния оперативных каналов передачи времени и частоты, в нем перечислены основные направления деятельности разработок и исследований WG TWSTFT и полученные результаты:

Результаты работы Целевой Группы «Изучение долговременной нестабильности каналов сличений UTC»

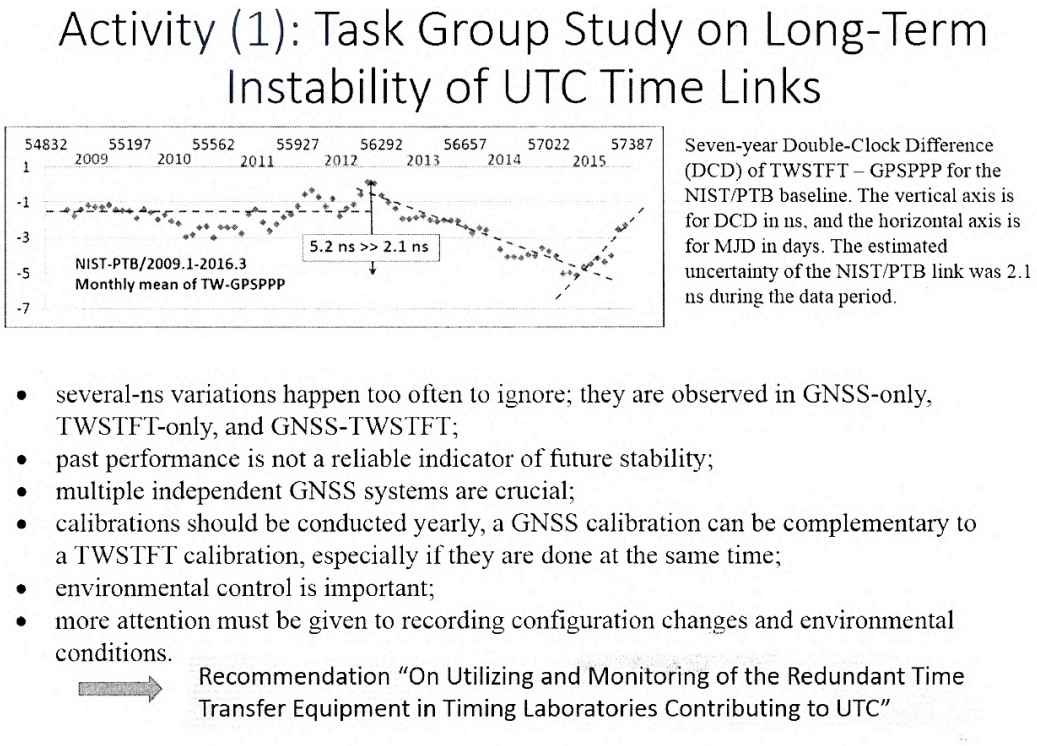


Рис. 9

Основной вывод: долговременные вариации задержек каналов сличений заметно превосходят неопределенности каналов сличений на основе результатов калибровок. Как результат Рекомендация CCTF совместная с WG GNSS «Об использовании и мониторинге вспомогательного оборудования передачи времени в лабораториях времени, дающих вклад в UTC».

Результаты пилотного использования программно реализованного приемника (SDR) для TWSTFT

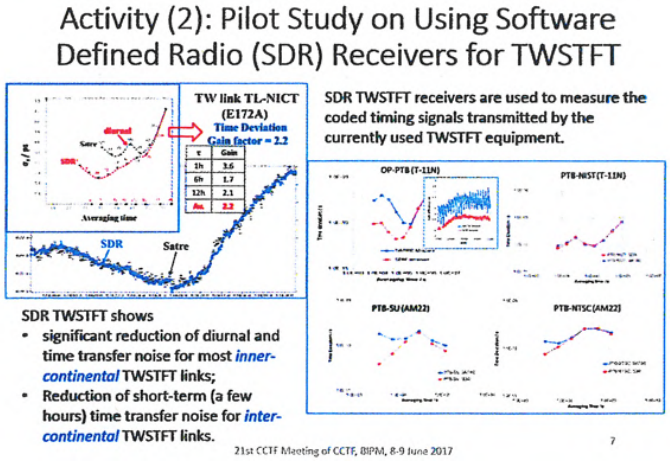


Рис. 10

Основной вывод: использование SDR приемника позволяет заметно снизить суточную компоненту и шумовую составляющую в большинстве внутри континентальных сличений; в трансконтинентальных сличениях также есть положительный эффект снижения на коротких интервалах наблюдения шумов.

Результаты изучения использования избыточных (дублирующих) каналов сличений для TWSTFT

Для непрямых сличений TWSTFT не требуются ни дополнительное оборудование, ни дополнительные измерения.

Шумы и суточные эффекты в прямых каналах внутри европейской сети TWSTFT сличений могут быть значительно снижены с использованием трансатлантических TWSTFT измерений.

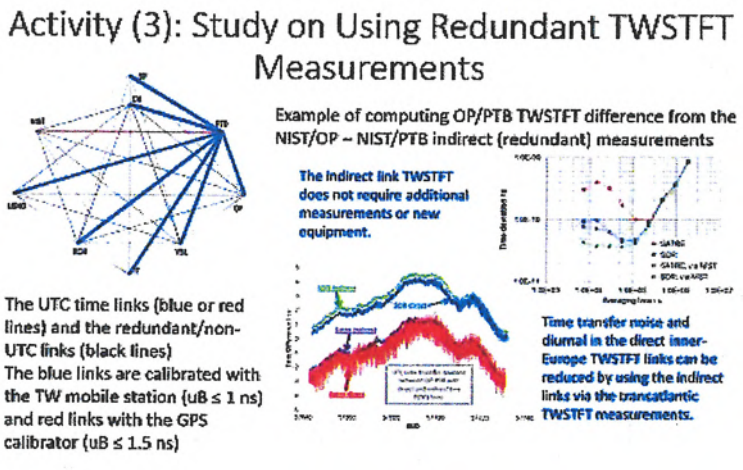


Рис. 11

О разработке цифрового TWSTFT модема

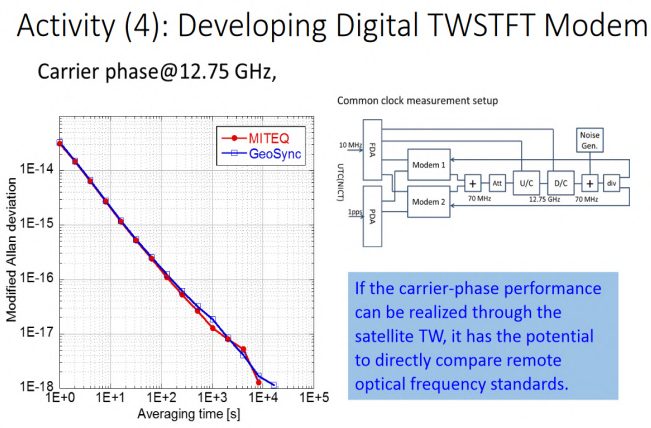


Рис. 12

Настольные испытания прототипов цифровых модемов для TWSTFT показали, что превалирующий источник шумов на интервалах наблюдения до суток – белый фазовый шум (WPM), и при использовании обработки фазы несущей можно достичь разрешающей способности канала TWSTFT, для наглядных измерений $\approx 1 \cdot 10^{-17}$ на интервалах наблюдения до суток. Это открывает возможность непосредственного сличения удаленных оптических стандартов частоты.

По итогам представленного отчета WG TWSTFT представила CCTF Рекомендацию «О совершенствовании дуплексной технологии передачи времени и частоты (TWSTFT) для формирования UTC» [16].

Консультативный Комитет по Времени и Частоте (CCTF),

признавая,

что атомные стандарты частоты достигли беспрецедентной точности, правильности и, что прогресс в этой области продолжается;

что передача информации о времени и частоте с использованием TWSTFT является важной для формирования UTC;

что существующие неопределенности в современных TWSTFT системах ограничены техническими и финансовыми ограничениями;

принимая во внимание,

что эксперименты с программно реализованными приемниками (SDR) в Азиатско-Тихоокеанском регионе (SDR приемники в настоящее время обрабатывают сигналы времени на выходе обычного TWSTFT оборудования) показали, что SDR TWSTFT технология заметно среднесуточные повторяющиеся эффекты (diurnals) и измерительные шумы;

……

что в разработке находится несколько цифровых TWSTFT модемов, некоторые из них обеспечивают поддержку как кодовых, так и фазовых измерений, что может заметно улучшить неопределенности TWSTFT,

рекомендует,

чтобы лаборатории, работающие с TWSTFT станциями,

продолжили изучение SDR TWSTFT технологии, поддерживая работу SDR или устанавливая SDR системы на существующих станциях, и обеспечивали BIPM SDR TWSTFT данными в параллель с данными от обычного TWSTFT оборудования;

- поддерживали и участвовали в тестировании нового цифрового оборудования по мере его появления.

Рекомендует,

чтобы BIPM организовал работы по внедрению использования SDR TWSTFT данных при формировании UTC;

поддерживал исследования по совершенствованию TWSTFT с использованием избыточных (дублирующих) каналов сличений в TWSTFT сетях, в том числе с использованием цифровых модемом по мере их

появления.

Таким образом, основные предложения WG TWSTFT направлены на дальнейшее совершенствование TWSTFT каналов сличений как с использованием существующего оборудования за счет избыточных (дублирующих) каналов, так и использование цифровой обработки сигналов (SDR и цифровые модемы).

Сразу после обеденного перерыва PhD Dennis McCarthy, бывший руководитель отделения Времени USNO, прочел заказную научно-популярную лекцию «История секунды. Прошлое, настоящее, будущее» [17].

Рис. 13

В лекции достаточно много информации, из которой, в частности, становится понятным, почему принято шестидесятиричное деление часа и минут и многое другое, например, откуда продолжительность современной секунды СИ, равная 6 192 631 770 периодов излучения атома цезия.

Оказывается, первые оценки продолжительности секунды велись в единицах шкалы Всемирного Времени UT2 и давали заметно отличные оценки в зависимости от эпохи сравнения (6 192 631 830±10 июнь 1955 и 6 192 631 845±10 июнь 1955 - июнь 1956). И только апелляция к эфемеридному времени (ET) дала принятое значение 6 192 631 770±20 периодов излучения атома цезия, таким образом, атомное время сохраняет размер секунды ET на середину 19 столетия.

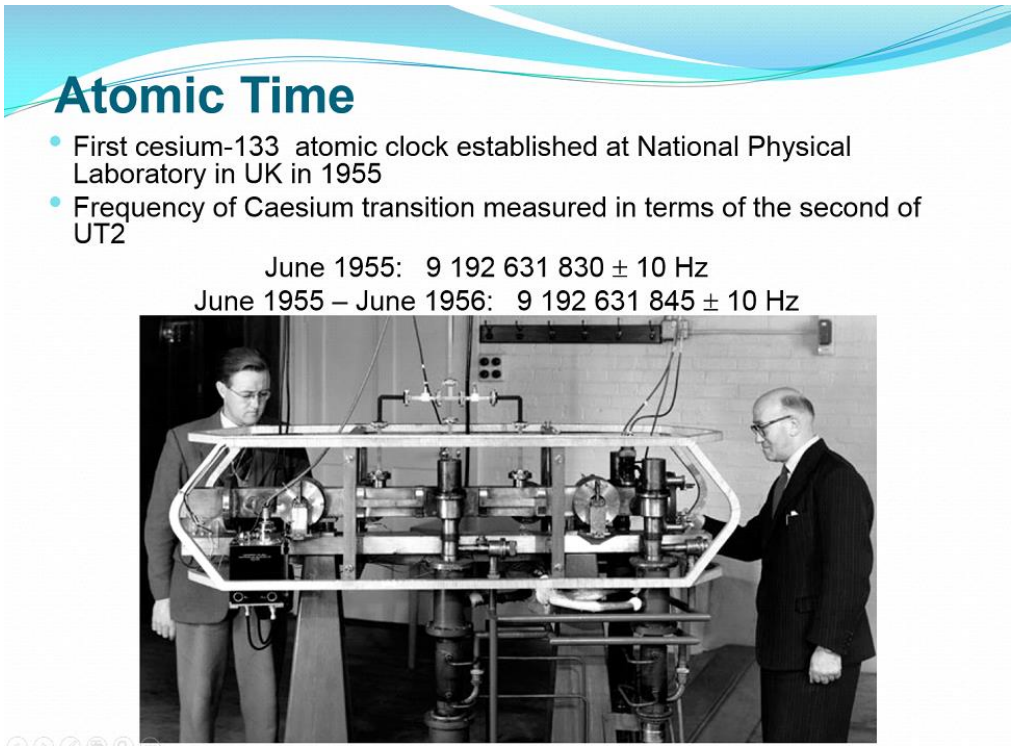


Рис. 14

Рис. 15

По п.7 повестки дня «Новые стандарты частоты и технология точных сличений» в п.п. 7.2 был представлен обзорный отчет Рабочей Группы по Координации разработок передовых технологий по передаче времени и Частоты (CCTF Working Group on Coordination of the Development of Advanced Time and Frequency Transfer Techniques - WGATFT) по состоянию на 2017.

Основные пункты его включали информацию о разработке перевозимых оптических часов, предназначенных в первую очередь для сличения стационарных оптических стандартов частоты в европейских лабораториях SYRTE, PTB и NPL. Планируемая работа имеет исключительно важное значение, учитывая наличие высокоточных каналов сличений на основе оптического волокна. Кроме того, она будет первым шагом в экспериментах по хронографической геодезии, помогая установить разность геопотенциалов в места лабораторий участников.

Рис. 16. Автомобильный прицеп для размещения оптического стандарта частоты

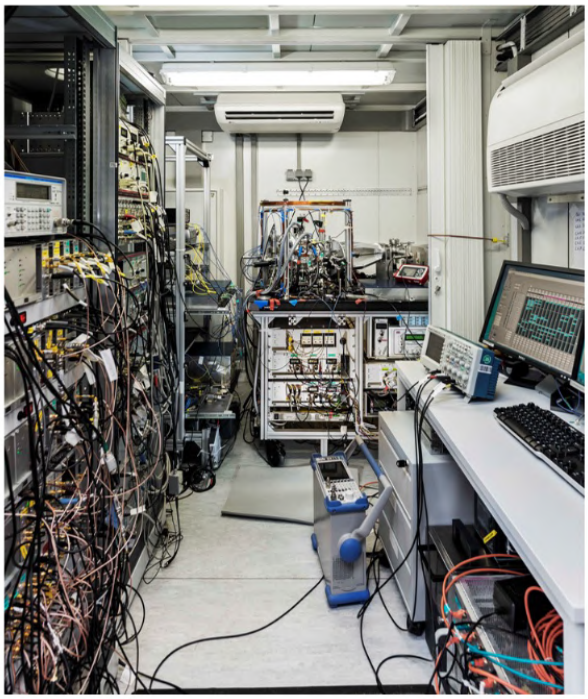


Рис. 17. Автомобильный прицеп для размещения оптических часов. Аппаратура оптических часов внутри прицепа.

Успех этой работы положит начало устранению последних препятствий в фундаментальной метрологии по переопределению единицы времени – секунды СИ – на основе квантового перехода в оптике.

Рис. 18

Учитывая прорывной характер результатов по использованию разворачиваемой в мире сети волоконно-оптических каналов сличений и достигнутые высокие разрешающие способности этих каналов сличений (до ~10^{-18}/1 мин), в разделе 7.2.1 повестки дня был представлен обзор D.Calonico из INRIM о состоянии волоконно-оптических каналов. Вообще говоря, задача о создании европейской сети волоконных каналов была поставлена EUROMET еще в 2006 году на заседании Технического комитета EUROMET по времени и частоте, когда разрабатывалась дорожная карта развития частотно-временных измерений с конечной задачей выхода на новое определение секунды СИ к 2025-2030 г.г.

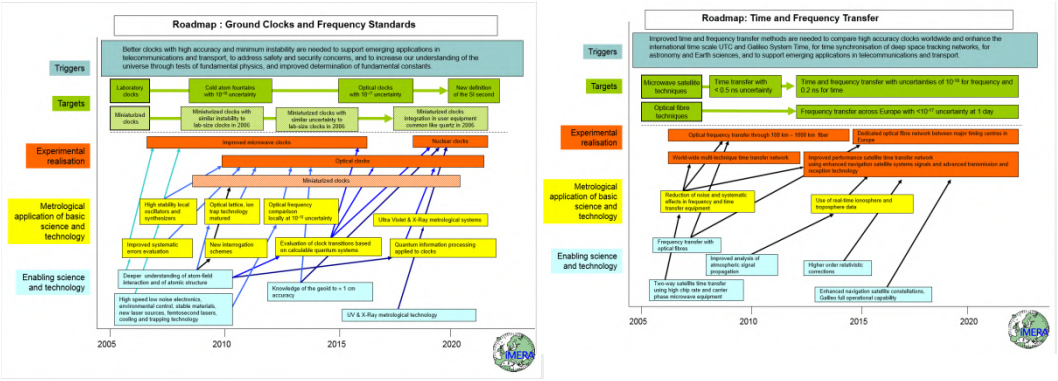


Рис. 19

Рис.20

Мировая оптоволоконная сеть является наиболее развитой в Европе, где к настоящему времени реализовано 6 каналов, из которых 4 около или более 1000 км длиной, которые обеспечивают передачу времени с точностью в десятки пс и нестабильность передачи частоты σy(τ) до 10^{-16} τ = 1с на 100 км длины трассы.

Optical fiber links: realized long hauls

Location	Length	Performance (*)
Check Rep/Austria	550 km	TT, evaluating accuracy 30 ps/20s
China	50 km	FT $20\times10^{-15}/\tau$
Finland	900 km	TT 1 ns
France-Germany	1400 km	FT $1\times10^{-16}/\tau$
France-UK	800 km	FT $\times10^{-15}/\tau$
Italy	1284 km	FT $0.2\times10^{-15}/\tau$
Japan	120 km	FT $0.8\times10^{-15}/\tau$
Poland	420 km	TT 70 ps - FT $35\times10^{-15}/\tau$

(*) accuracy for Time Transfer (TT)
Allan deviation for frequency Transfer (FT), extrapolated to 100 km (scaling law $L^{3/2}$). [*adapted from D. Calonico et al., European Phys Lett, 110 40001 (2015)]*

Рис. 21

Рис. 22

Каковы же выводы из современного состояния мировых оптоволоконных каналов сличений?

Технологии оптоволоконных каналов сличений удаленных часов развиваются быстро и уже сейчас обеспечивают сличение шкал времени удаленных часов с неопределенностью менее нс и частот с неопределенностью $\sim 1 \cdot 10^{-18}$ на интервалах 10^4-10^5 секунд.

В настоящее время они являются единственными технологиями, обеспечивающими приемлемую неопределенность сличений новых оптических стандартов частоты в континентальных масштабах, что является неотъемлемым элементом для возможного в будущем переопределения секунды СИ. В ближайшее время станет вопрос интерконтинентального сличения оптических стандартов. Для этих целей возможно использование и оптики, но скорей всего удастся достичь приемлемой точности и разрешающей способности с помощью новых усовершенствованных каналов спутниковых технологий.

Технологии оптоволоконных каналов сличений являются выигрышными не только для фундаментальной метрологии и метрологических учреждений. Научные сообщества и промышленность интенсивно используют оптические линии. Так, в частности:

- ряд компаний фондового рынка используют криптографические метки времени;
- радиоастрономические обсерватории, в том числе VLBI (РСДБ) станции;

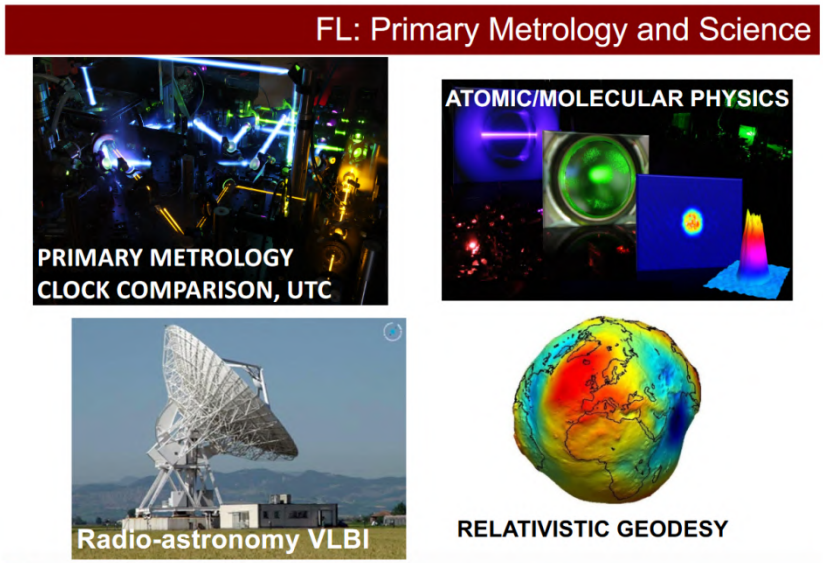


Рис. 23

- лаборатории, связанные с физикой элементарных частиц (а именно CERN, NIKHEF, KM3NeT, SKA).

Помимо перечисленных приложений развертывание оптоволоконных каналов сличений создает базу для развертывания работ по хронометрической геодезии.

Полное содержание сообщений по п.7.2 повестки дня «Отчет Рабочей группы по координации разработок передовых технологий по передаче времени и частоты» приведены в [18-20].

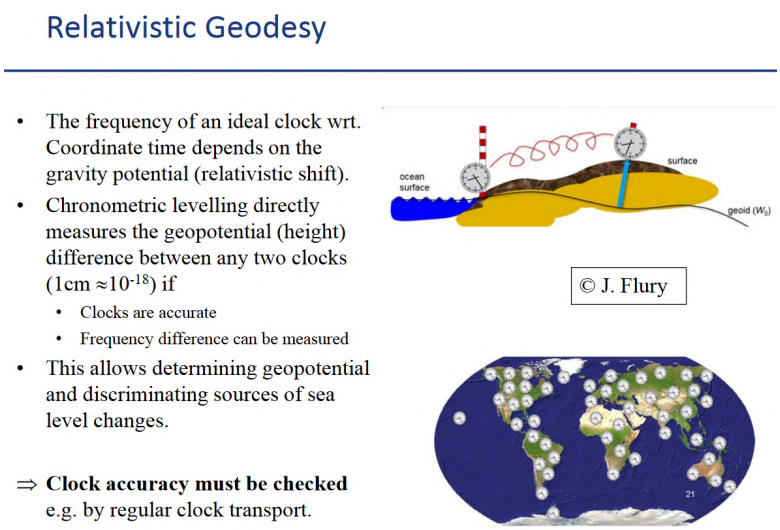


Рис. 24

По п.п. 9.2 «Новости Рабочей Группы Международной Ассоциации Геодезии (IAG) по релятивисткой геодезии» п.2 «Пространственно-временные опорные системы и общая теория относительности» повестки представляло интерес сообщение *М.Ж. Петита*, МБМВ, [21], в котором он еще раз напомнил о выигрышных результатах развития оптоволоконных каналов сличений для использования в релятивистской геодезии. В докладе [21] напоминается о принципах релятивистской геодезии и сообщается о создании новой объединенной рабочей группы 2.1 «Релятивистская геодезия» в рамках комиссии 2 IAG «Гравитационное поле».

В рамках п.п. 12.1 повестки дня «Рассмотрение требований к участникам заседаний Консультативного Комитета по времени и частоте в статусе члена/обозревателя» было выдвинуто требование «Одна страна – один делегат». Насущная необходимость этого видна из представленных групповых фото участников ККВЧ с разрывом в 30 лет.

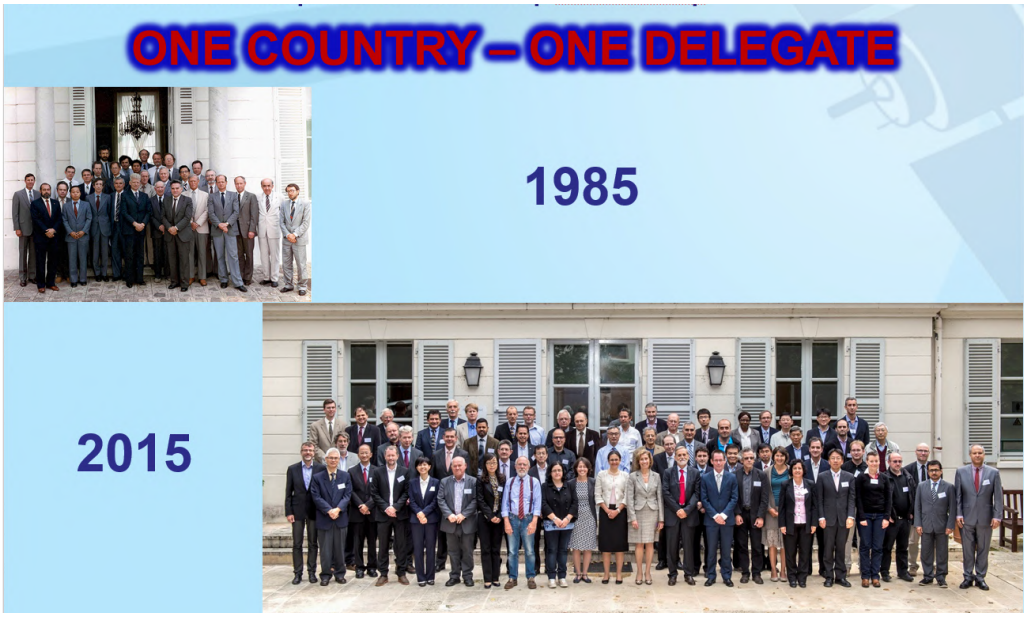


Рис. 25

Елиза Фелицитас Ариас

Патриция Тавелла

В заключительной части заседания ККВЧ, п.13. «Прочее», было сообщено о том, что Директор Отделения Времени МБМВ *Елиза Фелицитас Ариас* в ноябре 2017 оставляет свой пост. Её в этой должности заменит Патриция Тавелла (Patrizia Tavella), отмеченная в 2008 г. наградой Совещания по применению точного времени и интервалов времени (PTTI) «За выдающийся вклад в службу времени (Distinguished PTTI Service Award)». Со стороны коллег отделения ГМЦ ГСВЧ ФГУП «ВНИИФТРИ» Фелиции был вручен благодарственный адрес и памятный подарок. Все участники ККВЧ тепло поблагодарили Фелицию за многолетний плодотворный труд, который заметно продвинул частотно-временные измерения в мире.

Выводы

Заседания WG и CC в целом были очень информативны.

Основные темы докладов и дискуссий соответствуют мандату WG и CC и направлены на распространение последних прорывных результатов, полученных в передовых лабораториях в последние годы.

Хотелось бы подчеркнуть тотальный прогресс в разработке и создании стандартов частоты на основе квантовых переходов в оптическом диапазоне, которые заявляют о точности (неисключенной систематике) на уровне $\leq 1 \cdot 10^{-18}$, что позволяет говорить о возможности переопределения единицы времени секунды СИ на их основе.

Особо хотелось бы отметить озабоченность CC каналами сличений удаленных часов и стандартов частоты. Это фундаментальная задача, поскольку традиционно точностные характеристики каналов сличений заметно уступали характеристикам часов. Причем это стало вопросом не только технических средств, но и организационных, например, топологии

каналов сличений, использование резервных возможностей.

Стоит обратить внимание, что каналам сличений было посвящено по крайней мере три Рекомендации CC, предложенных WGGNSS, WGTWSTFT и WGATFT. Получены интересные и обещающие результаты при использовании SDR приемной TWSTFT аппаратуры. Исключительно обещающими являются разработки полностью цифровых модемов для TWSTFT.

Необходимо отметить радикальный прогресс в создании и использовании каналов сличений на основе оптоволокна. Мировая оптоволоконная сеть является наиболее развитой в Европе, где к настоящему времени реализовано 6 каналов, из которых 4 около или более 1000 км длиной и которые обеспечивают передачу времени с точностью в десятки пс и нестабильность $\sigma y(\tau)$ передачи частоты до 10^{-16} τ = 1с на 100 км длины. В настоящее время они являются единственными технологиями, обеспечивающими приемлемую неопределенность сличений новых оптических стандартов частоты в континентальных масштабах, что является неотъемлемым элементом для возможного в будущем переопределения секунды СИ.

Двухуровневая схема проведения калибровок каналов сличений с использованием сигналов ГНСС [5], направленная на полный охват калибровками всех лабораторий-вкладчиков TAI, заработала в полной мере, и лаборатории группы 1 (EURAMET, SIM и APMP) провели по несколько калибровочных кампаний, результаты которых отражены в отчетах о калибровках [6] и разделе 5 Циркуляра T [7]. Вместе с тем отмечено, что COOMET, несмотря на широкий состав стран-участниц (20 стран, включая 5 ассоциированных), не проявил должной активности в калибровочной работе с лабораториями группы 2.

Предложения по модернизации шкал мирового времени затронули не только новые часы, стандарты частоты и каналы сличений. Был представлен критический анализ современной алгоритмики формирования EAL, TAI и UTC и предложены направления его модификации с учетом новой топологии каналов сличений, использования резервных возможностей каналов сличений, модификации алгоритмов формирования шкал времени с учетом необходимости учета статвесов часов на основе новых механизмов распространения неопределенности и возможных корреляционных зависимостей часов.

Ещё один прорывной результат 21 сессии CC – ***консенсус по поводу Рекомендации, подготовленной целевой группой по определению шкал времени***. И здесь наиболее важно не само определение TAI и UTC, а единодушие мирового частотно-временного сообщества в отказе от существующих ограничений максимального значения DUT1. Это означает согласие метрологического частотно-временного сообщества на принятие однородной шкалы времени (без «скачущей» секунды). Эта Рекомендация будет поддержана на *осенней сессии CIPM 2017* и представлена в виде

проекта Резолюции на 27 CGPM в 2018.

Оценивая состояние средств лаборатории времени ФГУП «ВНИИФТРИ», можно констатировать, что:

состояние ансамбля хранителей времени в количественном и качественном аспектах в целом конкурентоспособно по сравнению с лучшими лабораториями мира;

средства независимого воспроизведения размера единицы времени – секунды СИ (первичные цезиевые реперы частоты фонтанного типа) по характеристикам неисключенной систематической неопределенности (accuracy) принадлежат к лучшим первичным мировым стандартам частоты. Вместе с тем они заметно уступают по регулярности вклада в формирование TAI аналогичным стандартам частоты SYRTE и PTB;

ВНИИФТРИ одно из немногих метрологических учреждений, обладающих помимо первичных средств независимого воспроизведения размера единицы времени – секунды СИ, ансамблем высокостабильных рубидиевых фонтанных стандартов частоты и стандартами частоты оптического диапазона на основе атома ^{87}Sr в оптической решетке;

средства сличений удаленных часов и стандартов частоты представлены двумя техническими решениями: использование сигналов GNSS и TWSTFT. GNSS канал сличений на основе обработки кодовых измерений имеет конкурентный уровень неопределенности типа u_A. Его планируется повысить с использованием обработки фазы несущей в режиме PPP, что будет сделано после планируемых на этот год калибровочных компаний. В связи с окончанием работы, используемого для TWSTFT спутника, в настоящее время канал не работает и на основе международной кооперации под эгидой WGTWSTFT идет испытание потенциальных спутников для продолжения работы. Ожидаемый срок − первая половина 2018.

Наиболее критическая ситуация с оптоволоконными каналами сличений. В настоящее время работы пока не вышли из лаборатории – получены обещающие результаты на лабораторных шпулях волокна длиной до нескольких сот км. Вместе с тем пока нет опыта работы с волокном связных компаний и тем более пока не просматривается интегрирование в европейскую сеть. Это принципиально важно, так как в противном случае международное признание метрологического уровня стандартов частоты оптического диапазона, созданных ВНИИФТРИ на основе перехода в атоме ^{87}Sr, невозможно. Вполне можно прогнозировать что к следующей сессии CC в 2020 году вопрос о переопределении размера единицы времени – секунды СИ, вряд ли будет на повестке дня, но если в ближайшие пару лет произойдет прорыв в сличениях существующих оптических стандартов, *то вполне можно ожидать внеочередную 22-ю сессию CC и первую постановку этого вопросы на 28 Генеральной Конференции по мерам и весам (CGPM) в 2022.*

Литература

1. http://www.bipm.org/en/committees/cc/.
2. Arias F. Schedule of CCTF and associated meetings CCTF, CCTF working documents, CCTF/17-02.
3. Riehle F., Gill P. Report of the CCL-CCTF Frequency Standards Working Group (WGFS) to the CCTF 2017, CCTF working documents, CCTF/17-16.
4. CCL-CCTF WGFS, Recommendation (proposed) "On the list of recommended frequencies", CCTF working documents, CCTF/17-17.
5. Pascale Defraigne, Report to the 21th Session of the CCTF Working Group on GNSS time transfer, Report biennium 2015-2017, CCTF working documents, CCTF/17-12.
6. Кошеляевский Н.Б., Домнин Ю.С. Направления и перспективы развития измерений времени и частоты на основе материалов 20-й сессии Консультативного комитета по времени и частоте 2015, Альманах современной метрологии, № 7, стр. 93-123.
7. ftp://ftp2.bipm.org/pub/tai/publication/gnss-calibration/group1/1001-2016/
8. Time links used for the computation of TAI, calibrations information and corresponding uncertainties. CIRCULAR T 353, ISSN1143-1393, Bureau International des Poids et Mesures, Organisation Intergouvernementale de la Convention du Metre, Pavillon de Breteuil.
9. Technical Directives for Standardization of GPS Time Receiver Software to be implemented for improving the accuracy of GPS common-view time transfer by the Group on GPS Time Transfer Standards, a Sub-Working Group of the CCDS Working Group on improvements to TAI, Rapport BIPM-93/6.
10. RECOMMENDATION “On the utilization and monitoring of redundant time transfer equipment in the timing laboratories contributing to UTC”, CCTF working documents, CCTF/17-05.
11. Recommendation (proposed) "On the definition of time scales", CCTF working documents, CCTF/17-04.
12. Agenda (draft 31/05/2017), CCTF working documents, CCTF/17-01.
13. Panfilo G., Petit G., Harmegnies A. Report to the 21st CCTF: The uncertainties of [UTC-UTC(k)] , CCTF working documents, CCTF/17-24.
14. Panfilo G. Status of the algorithms for TAI, CCTF working documents, CCTF/17-38.
15. Zhang Victor (NIST, Chair), Jiang Zhiheng (BIPM, Executive Secretary) with contributions from Miho Fujieda (NICT), Dirk Piester (PTB), Hector Esteban (ROA), Demetrios Matsakis (USNO) and Andrey Naumov (VNIIFTRI) Report of the CCTF Working Group on Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer, CCTF working documents, CCTF/17-23.
16. Recommendation "On improving Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT) for UTC Generation", CCTF working documents, CCTF/17-06.

17. D. McCarthy (IAU, invited), History of the second. Past, Present and Future, CCTF working documents, CCTF/17-03.
18. F.-L. Hong (NMIJ, Yokohama Nat. Univ.), Report of the CCTF WG on Advanced Time and Frequency Transfer Technology, CCTF working documents, CCTF/17-45.
19. D. Calonico (INRIM), Study Group on Optical Fibre Links for UTC under the CCTF WG ATFT, CCTF working documents, CCTF/17-45.
20. D. Calonico (INRIM), Report to the 21st Meeting of the CCTF - Study Group on Optical Fibres of the WG ATFT, CCTF working documents, CCTF/17-31.
21. Petit G. (BIPM), Space-time references and General Relativity, CCTF working documents, CCTF/17-51.