

УДК 006.924.4

МЕТОД ДВУХСТОРОННЕЙ ПЕРЕДАЧИ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ С ПОМОЩЬЮ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ (TWSTFT)

Основы, история, настоящее, перспективы развития

А.В. Наумов

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

Работа знакомит с историей TWSTFT, описывает эволюцию метода, его современное исполнение и перспективы развития; освещает проблемы существующих спутниковых модемов и их дальнейшего развития. Уделяется внимание улучшению характеристик модемов. Приводятся результаты применения методов во ВНИИФТРИ, освещается калибровка каналов сравнений шкал времени. Обсуждается использование модемов для работы по волоконно-оптическим линиям связи.

The article introduces the history of TWSTFT, describes the evolution of the method, its current performance and development prospects. Special attention is paid to improvements of modems' characteristics. Results of the application of methods in VNIIFTRI, calibration of channels of time comparison scales, discussion the use of modems for the work over fiber-optic communication lines are shown in the article.

Ключевые слова: передача времени и частоты, геостационарные спутники связи, дуплекс, ВОЛС, TWSTFT

1. Введение

Необходимым условием обеспечения требуемых характеристик формирования национальной шкалы координированного времени России UTC(SU) является регулярность её высокоточных сравнений со шкалами времени лабораторий, участвующих в формировании Международной шкалы атомного времени. Также для повышения уровня метрологического обеспечения средств измерений времени и частоты в РФ необходимо наличие прецизионных средств сравнений шкалы времени Государственного эталона времени и частоты (ГЭВЧ) со шкалами времени государственных вторичных и рабочих эталонов единиц времени и частоты в соответствии с поверочной схемой.

Метод TWSTFT широко используется ведущими зарубежными лабораториями времени в качестве основного канала синхронизации при взаимных сличениях шкал времени, координатором которых выступает РТВ (Физико-технический институт, Германия). РТВ является участником дуплексных сравнений шкал времени в составе трёх рабочих групп: Европа-США, Европа, Европа-Азия, в состав которых входит более 15-ти ведущих лабораторий времени мира (рисунок 1 и 2). К плюсам данного метода можно отнести широкую зону охвата (в пределах зоны видимости используемого спутника), высокую точность (погрешность измерений не хуже 1 нс). К минусам – высокую стоимость аренды спутникового канала, сложную процедуру оформ-

Альманах современной метрологии, 2016, №8

ления радиолицензии на излучение сигнала. Фотография станции ФГУП «ВНИИФТРИ» приведена на рисунке 3.



Каналы TWSTFT на 2012 год

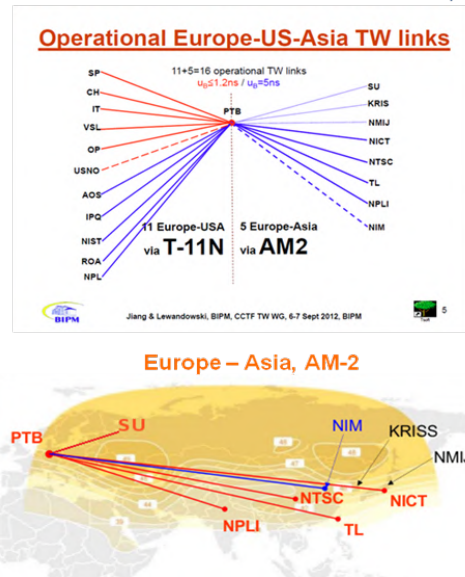


Рис. 2. Каналы сравнений шкал времени на 2012 год, а также каналы Евроазиатской группы в зоне охвата спутника AM-2



Рис. 3. Станция TWSTFT в ФГУП «ВНИИФТРИ»

Полученные результаты сравнений шкал времени регулярно публикуются в циркулярах «Т» ВРМ. Согласно этим данным, калиброванный комплект аппаратуры обеспечивает определение расхождения шкал времени пространственно удаленных объектов с погрешностью не более ± 1 нс. Для других методов, например, для аппаратуры привязки шкал времени по сигналам КНС ГЛОНАСС/GPS эти значения составляют от 2 до 20 нс. Точности различных методов сравнения шкал времени показаны на рисунке 4.

Методы, используемые сегодня

	$\mu\text{A}/\text{ns}$	$\mu\text{B}/\text{ns}$
• GPS C/A-code SCH	3.0	5.0
• GPS C/A-code MCH	1.5	5.0
• GPS/GLONASS (comb.)	1.0	5.0
• GPS P3	0.7	5.0
• TW/GPS P3 (comb.)	0.7	5.0
• GPS PPP	0.3	2.0
• TWSTFT	0.5	1.0
• TW/GPS PPP (comb.)	0.3	1.0
• Fiber Optic	0.01	0.1

Рис. 4. Точности различных методов сравнения шкал времени

2. История TWSTFT

2.1 Эволюция метода

Более пятидесяти лет назад (в 1964 году) возможности хранения шкал времени в крупных лабораториях мира были в диапазоне 25-100 мкс. Тридцать лет назад во многих лабораториях уже была достигнута точность хранения времени в 1 мкс. Фактически, основные лаборатории времени уже поддерживали уровень хранения шкалы времени 5-200 нс. Современные стандарты времени и частоты позволяют хранить шкалы времени на суб-наносекундном уровне.

Очевидно, что техническим средствам передачи времени, используемым в лабораториях времени, необходимо идти в ногу с возможностями хранения шкал времени. В противном случае было бы невозможно сравнить и оценить общий прогресс, которого действительно достигли лаборатории. За прошедшие годы было разработано множество различных методов, но лишь немногие из них продолжили совершенствоваться, получили общее признание и дошли до сегодняшних дней. На сегодняшний день существуют два основных метода передачи времени, принятых в ВРМ — ГНСС и TWSTFT. Метод ГНСС устроен по совершенно другому принципу и не будет рассматриваться в рамках данной статьи. В течение последних 50 лет точность и стабильность метода TWSTFT постоянно улучшались, вследствие чего он по-прежнему остается признанным и конкурентоспособным перед остальными методами и используется в качестве основы для передачи времени на большие расстояния [1].

История метода TWSTFT началась в 1962 году с экспериментов М. Стилли, В. Марковица и С. Лидбака, [2] по спутнику Telstar. Следующий эксперимент был проведен В. Марковицем, С. Лидбаком, Х. Юеда и К. Мураматсу, [3], в 1965 году с использованием спутника Relay II (рисунок 5). Эти два эксперимента были достаточно примитивными по сравнению с сегодняшними экспериментами.

Следующий важный шаг был сделан в середине 70-х годов с проведением серии экспериментов между NRC в Канаде и LPTF во Франции с помощью спутника Symphonie в С диапазоне. Существенного прогресса достигли Дж. Кайзер, Л. Веенстра, Е. Акерманн, и А. Дэйдель [4] в 1978 году. Был использован спутник Communications Technology Satellite (CTS), также носивший имя Гермес. В эксперименте использовался фазовый сдвиг, вводимый в Ku диапазоне. Этот эксперимент вовлек такие известные лаборатории времени, как USNO, NIST и NRC. Немногим позднее, в том же году, был проведен другой эксперимент в 1978 г. между USNO в США и RRL в Японии с использованием спутника ATS и станции NASA GSFC в Гринбелте, США.



Рис. 5. Ранняя история метода TWSTFT. Использувавшиеся спутники

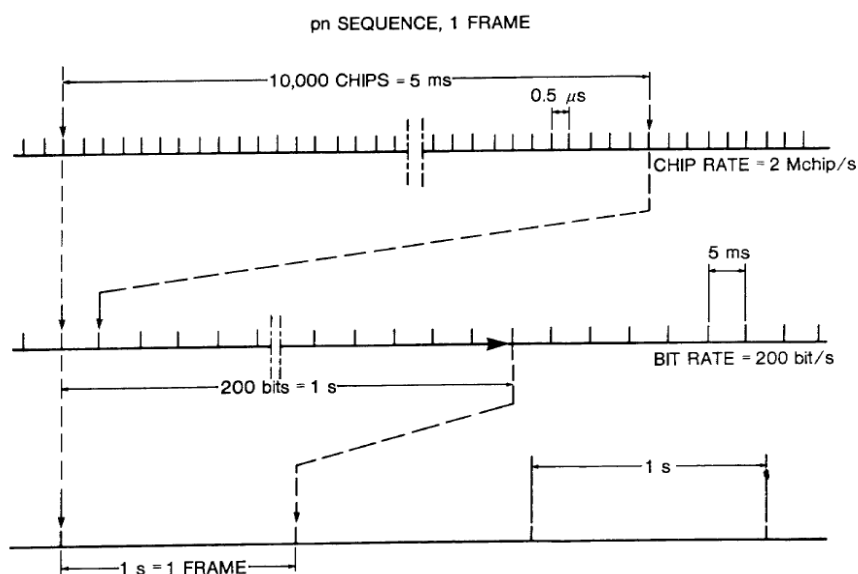


Рис. 6. Начало современной эры TWSTFT. Изобретение модема MITRIX

Современная эра TWSTFT началась с 1981 года, когда Филип Хартл [5] разработал свой MITREX Modem. Этот модем использовал псевдослучайную шумовую последовательность несущей частоты и только 1 Вт мощности на излучение. Это было прорывом и взлетом для TW. Многие увидели перспективу и возможности данного метода.

На рисунке 6 представлен формат сигнала, формируемого модемом MITREX-2000. Формат сигнала позволял помимо измерений передавать также и некоторые технические данные. Одна ПСП несет один бит информации. Скорость передачи данных (бит-рейт) определяется длиной ПСП и тактовой частотой. При длине ПСП 10000 чип и частоте 2 МГц за одну се-

Альманах современной метрологии, 2016, №8

кунду передается 200 бит, а при частоте 2,5 МГц 250 бит информации.

Чип – величина, характеризующая количество бит, необходимых для передачи одного символа информации.

Следующей важной вехой стала разработка модема SATRE (Satellite Time and Ranging Equipment) в 1991 году в компании TimeTech в Штутгарде, Германия, Вольфгангом Шафером [6,16], который совершил большой прорыв в автоматизации и повышении точности сравнения времени – в 100 раз (рисунок 7). В настоящий момент модем SATRE является мировым лидером по использованию и негласным рабочим стандартом проведения международных сравнений шкал времени методом TWSTFT. Также были некоторые попытки разработать модем для министерства обороны США в NRL из Вашингтона, округ Колумбия. Эта разработка носила название Атлантис. Основной целью разработки данного модема было — улучшение автоматизации процесса измерений [7].



Рис. 7. Модем SATRE

3. ITU рекомендация, современное исполнение метода

3.1 Организация измерений и координирование работы лабораторий

Одновременно с разработкой аппаратного обеспечения проводилась оптимизация и организация работ по обмену и обработке данных, а также по обмену опытом. Так, в 1989 году на 11-м заседании Консультативного комитета по определению секунды (CCDS) было принято решение о создании специальной рабочей группы по двунаправленной спутниковой передаче времени TWSTFT. Заседание специальной рабочей группы состоялась в Делфте и было организовано Герритом де Джонгом из VSL. После второй встречи рабочей группы в Граце, в Австрии, организованной Дайтером Кирчнером из TUG, Комитет CCDS официально создал рабочую группу TWSTFT (в 1993 году) с Клаудиной Томас в качестве ее председателя [8]. В 1995 году председателем был назначен Вильям Клепчински из USNO.



Рис. 8. Участники 6-го заседания рабочей группы CCTF TWSTFT в Сан-Фернандо, в 1998 году

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

**Directive for operational use and data handling in two-way
satellite time and frequency transfer (TWSTFT)**

Andreas Bauch, Dirk Piester, Miho Fujieda, Włodzimierz Lewandowski



Рис. 9. Титульная страница рекомендации ИТУ, версия 2011 года

На рис. 7 представлены участники 6-го заседания рабочей группы CCTF TWSTFT в Сан-Фернандо, в 1998 году.

В 2009 году председателем стал Дирк Пистер из РТВ. Начиная с осени 2015 года, председателем является Виктор Джанг из NIST.

Основные цели рабочей группы:

- составление официальных отчетов о наблюдениях в CCDS;
- планирование и координирование деятельности различных станций, которые участвуют в наблюдениях;
- разработка методик измерений и калибровки.

Однако со временем стало очевидно, что формат ежегодных формальных встреч недостаточен для быстро развивающихся технологий. Поэтому участниками встреч было принято решение проводить собрания также и на ежегодных конференциях посвященных времени и частоте, таких как EFTF и RTTI с целью решения вопросов планирования, улучшения методов измерений, обмена технической информацией.

Объем измерительной информации постоянно рос и продолжает расти, поэтому вопросы хранения и обработки данных набирают свою актуальность. Вначале не было единых стандартов хранения и использования полученных данных. Ранее различные лаборатории использовали свое собственное программное обеспечение для обработки данных и свои собственные методы фильтрации и уменьшения объема данных измерений, что затрудняло обмен и обработку данных между лабораториями. Международным союзом электросвязи – сектором радиосвязи (ITU-R), Рабочей группой WP7A (отвечающей за передачу сигналов времени в радио диапазоне) было принято решение о написании рекомендации ITU-R TF.1153 [9] (рис. 9), которая устанавливает стандарты для формата данных, для обмена данными TWSTFT. Данная рекомендация была написана по руководством Дайтера Кирчнера из TUG. В приложении данного документа были указаны рекомендованные методики обработки и единый формат обмена данными. Рекомендации ITU-R TF.1153 являются основополагающим международным документом по организации сравнения удаленных шкал времени методом TWSTFT. С этого момента весь процесс измерений стал унифицированным, что существенно облегчило возможности построения автоматизации процесса и возможности исследования различных видов ошибок, влияющих на точность измерений [1]. Обмен данными стал производиться с помощью файлов в формате ITU (рисунок 10).

Пример файла ITU

```

* twptb56.989
* FORMAT 01
* LAB PTB
* REV DATE 2014-09-23
* ES PTB03 LA: N 52 17 49.787 LO: E 10 27 37.966 HT: 143.41 m
* REF-FRAME WGS84
* LINK 14 SAT: AM-2 NLO: E 80 0 0.000 XPNDR: 999999999 ns
* SAT-NTX: 10960.0000 MHz SAT-NRX: 14260.0000 MHz BW: 2.5 MHz
* CAL 281 TYPE: PORT ES REL MJD: 56232 EST. UNCERT.: 1.100 ns
* CAL 302 TYPE: GPS MJD: 56775 EST. UNCERT.: 2.000 ns
* CAL 301 TYPE: METODE MJD: 56775 EST. UNCERT.: 2.000 ns
* CAL 305 TYPE: GPS MJD: 56902 EST. UNCERT.: 2.000 ns
* LOC-MON NO
* MODEM SATRE 280
* COMMENTS
*
* EARTH-STAT LI MJD STTIME NTL TW DRMS SMP ATL REFDELAY RSIG CI S CALR ESDVAR ESIG TMP HUM PRES
* LOC REM hhmms s ns s ns s ns ns ns degC % mbar
PTB03 TL02 14 56989 110100 299 0.264910813435 1.224 300 299 0.000000043200 0.020 301 1 -1485.300 999999999 99999 2 94 1007
PTB03 NIM01 14 56989 110700 299 0.266493166242 0.628 300 299 0.000000043200 0.020 305 1 -1473.600 999999999 99999 2 94 1007
PTB03 NTSC02 14 56989 111300 299 0.264029639961 1.261 300 299 0.000000043200 0.020 999 9 999999999 999999999 99999 2 94 1007
PTB03 NICT14 14 56989 111900 299 0.271147372784 0.288 300 299 0.000000043200 0.020 302 1 136.000 999999999 99999 2 94 1007
PTB03 SU01 14 56989 112500 299 0.271213626841 0.506 300 299 0.000000043200 0.020 281 1 764.000 999999999 99999 2 94 1007
PTB03 NPLI01 14 56989 113100 299 0.260272727785 0.447 300 299 0.000000043200 0.020 999 9 999999999 999999999 99999 2 94 1007
PTB03 PTB03 14 56989 113700 299 0.275567861759 0.513 300 299 0.000000043200 0.020 999 9 999999999 999999999 99999 2 94 1007
PTB03 TL02 14 56989 120100 299 0.264931178893 1.627 296 295 0.000000043200 0.020 301 1 -1485.300 999999999 99999 2 93 1007
PTB03 NIM01 14 56989 120700 299 0.266517657523 0.593 300 299 0.000000043200 0.020 305 1 -1473.600 999999999 99999 2 93 1007
PTB03 NTSC02 14 56989 121300 299 0.264051259634 1.540 300 299 0.000000043200 0.020 999 9 999999999 999999999 99999 2 93 1007
PTB03 NICT14 14 56989 121900 299 0.271167460095 0.323 300 299 0.000000043200 0.020 302 1 136.000 999999999 99999 2 94 1007
PTB03 SU01 14 56989 122500 299 0.271236494796 0.493 300 299 0.000000043200 0.020 281 1 764.000 999999999 99999 2 94 1007

```

Рис. 10. Пример файла в ITU формате

Следующим шагом после введения унификации обработки данных стало введение методик определения способов измерения систематических ошибок наблюдений. Были предложены и реализованы 4 способа:

разработка перевозимых TW станций Дайтером Кирчером из TUG (Австрия);

разработка SATSIM (имитатор спутниковых сигналов позволяющий поэтапно промерять задержки станции) Герритом Жонгом из VSL (Дания);

разработка калибровочной станции X диапазона в USNO (США);

сравнение результатов измерений двух различных систем GPS и TWSTFT.

3.2 Современное исполнение метода

Метод TWSTFT основан на одновременном обмене сообщениями между двумя территориально удаленными друг от друга лабораториями через геостационарный спутник связи, с помощью специальных спутниковых модемов.

На рисунке 11 представлена общая схема метода дуплексных сравнений. В каждой лаборатории находится свой источник шкалы времени и эталонной частоты, как правило, это атомные часы. Сигнал шкалы времени 1 Гц и частоты 5 или 10 МГц, полученных от одного источника, поступает на вход спутникового модема.

Модем формирует модулированный ВЧ сигнал со спектром в диапазоне 70 ± 30 МГц. В модуляции содержится информация о положении фронта входного сигнала шкалы времени 1 Гц, а также расшифровка метки времени,

идентификатор лаборатории и другая техническая информация. Обычно используется двоичная фазовая манипуляция (BPSK) псевдошумовым кодом.

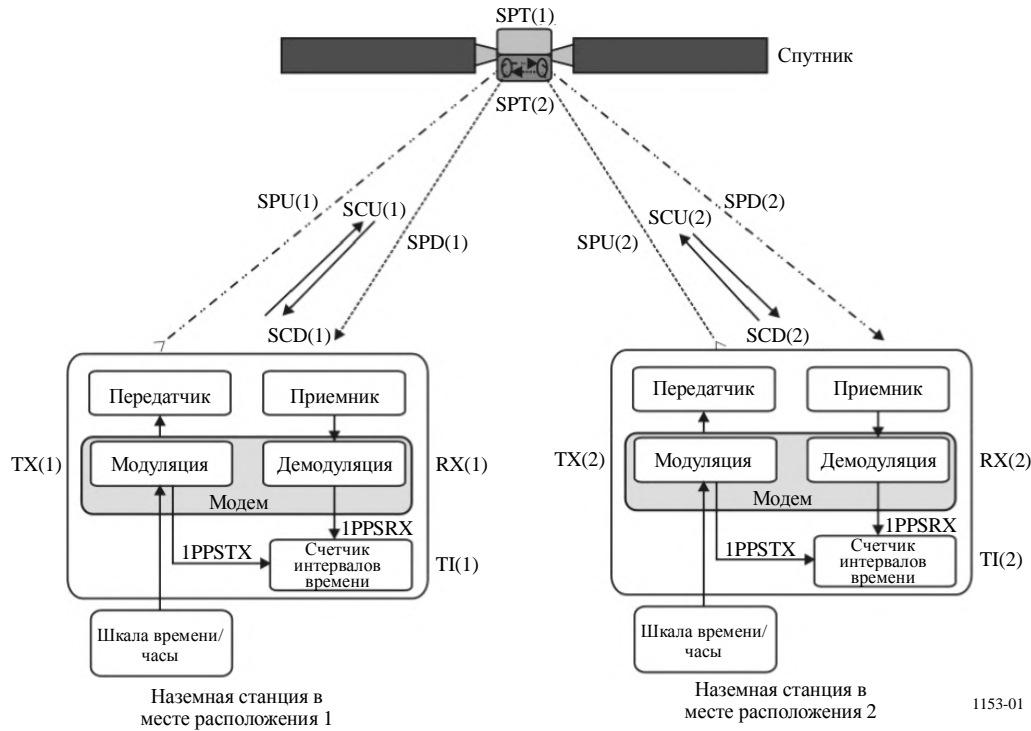


Рис. 11. Современная схема реализации метода TWSTFT

Использование псевдошумовых кодов или псевдослучайных последовательностей имеет целый ряд положительных качеств: повышается помехоустойчивость и повышается точность определения временных параметров принимаемого сигнала (задержки между кодом времени в принятом сообщении и фронтом входного сигнала 1 Гц), появляется возможность использования кодового разделения пользователей (CDMA). Кодовое разделение необходимо, даже если в сеансе связи участвует только две лаборатории, так как при приеме необходимо отличить сигнал чужой лаборатории от своего сигнала, вернувшегося от ретранслятора.

Выходной сигнал модема (70 ± 30 МГц) переносится на частоту Ku диапазона в блоке U/C (up converter), усиливается и поступает на параболическую антенну для передачи на спутник-ретранслятор. В спутнике принятый сигнал проходит через транспондер, в котором он усиливается и после чего передается на Землю. При приеме в наземной лаборатории сигнал усиливается, затем с помощью блока D/C (down converter) переносится в диапазон частот 70 ± 30 МГц, после чего поступает на вход модема.

В модеме осуществляется обработка входного сигнала и вычисляется временная задержка между меткой времени принятого сигнала и собственной меткой времени: T_{i1} и T_{i2} (для лабораторий 1 и 2 соответственно).

Воспользуемся временной диаграммой (рисунок 12) для иллюстрации дуплексного метода сравнения [14]. Задача сравнения шкал времени заключается в вычислении разности шкал времени лаборатории 1 и 2:

$$C = T_1 - T_2. \quad (1)$$

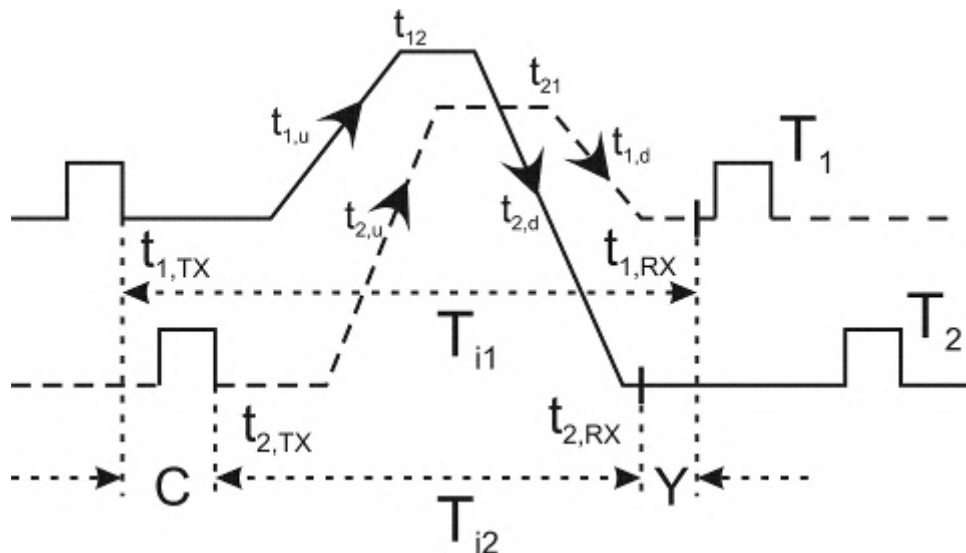


Рис. 12. Временная диаграмма, иллюстрирующая дуплексный метод сравнения

Измеряемые величины T_{i1} и T_{i2} следующим образом выражаются через параметры временной диаграммы.

$$T_{i1} = t_{1,TX} + t_{1,u} + t_{12} + t_{2,d} + t_{2,RX} + Y, \quad (2)$$

$$T_{i2} = t_{2,TX} + t_{2,u} + t_{21} + t_{1,d} + t_{1,RX} - Y. \quad (3)$$

$t_{1,TX}$ и $t_{2,TX}$ – задержки в передающих трактах аппаратуры лаборатории №1 и №2;

$t_{1,u}$ и $t_{2,u}$ – задержки при распространении сигналов от наземных лаборатории до ретранслятора;

t_{12} – задержка в ретрансляторе при передаче сигнала 1-й лаборатории;

t_{21} – задержка в ретрансляторе при передаче сигнала 2-й лаборатории;

$t_{1,d}$ и $t_{2,d}$ – задержки при распространении сигналов от ретранслятора до наземных лабораторий;

$t_{1,RX}$ и $t_{2,RX}$ – задержки в приемных трактах аппаратуры лабораторий

№1 и №2;

Y – разность между моментами времени приема сообщений в двух лабораториях.

Из рисунка 12 видно, что искомая разность шкал времени может быть выражена следующим образом:

$$C = T_{i1} - T_{i2} - Y. \quad (4)$$

Выражая Y из (2) и (3) и подставляя в (4), получим:

$$C = \frac{1}{2}(T_{i1} - T_{i2}) + \frac{1}{2}E, \quad (5)$$

$$E = (t_{1,ТХ} - t_{2,ТХ}) + (t_{2,РХ} - t_{1,РХ}) + (t_{1,u} + t_{2,d} - t_{1,d} - t_{2,u}) + (t_{12} - t_{21}). \quad (6)$$

Таким образом, измеренные величины T_{i1} и T_{i2} позволяют вычислить разность между шкалами времени ($T_1 - T_2$) сравниваемых лабораторий с погрешностью $E/2$, которая вызвана асимметрией канала связи. Первые два слагаемых в скобках в (6) минимизируются в результате калибровки. Третье слагаемое может быть достаточно большим благодаря эффекту Саньяка (временной сдвиг достигает величин порядка 400 нс), однако оно достаточно точно описывается известной формулой из теории. Четвертое слагаемое в (6) можно считать равным 0, так как сигналы от обеих лабораторий имеют одинаковые частоты, поэтому должны испытывать одинаковую задержку при прохождении через транспондер.

Кроме разности шкал времени, данный метод позволяет оценить псевдодальность по каналу распространения сигнала между лабораториями через спутник:

$$L_{\Sigma} = \frac{1}{2}(T_{i1} + T_{i2}) \cdot c, \quad (7)$$

где c – скорость света. Если необходимо оценить псевдодальность, характеризующую исключительно суммарное расстояние между двумя лабораториями и спутником, то требуется знание задержек при прохождении сигнала в наземной аппаратуре и в спутнике ретрансляторе:

$$L = \frac{1}{2}(T_{i1} + T_{i2} - t_{1,РХ} - t_{2,РХ} - t_{1,ТХ} - t_{2,ТХ} - t_{12} - t_{21}) \cdot c.$$

4. Перспективы развития

4.1. Проблемы существующих модемов и дальнейшие перспективы развития

В настоящее время в модемах SATRE используется метод кодовых изменений, который является традиционным как для космической связи в целом, так и для дуплексного сравнения шкал времени.

Модемы SATRE развивались в направлении увеличения ширины полосы сигнала за счет увеличения скорости кодовой модуляции. Максимальная доступная символьная скорость в модемах SATRE составляет 20 Мчип/с. При такой скорости типичная случайная погрешность сравнения шкал времени составляет 100 пс [5]. При использовании стандартной скорости 2,5 Мчип/с погрешность получается почти на порядок выше. Стоит отметить, что увеличение данного параметра влечет за собой существенное увеличение стоимости аренды спутникового канала, что немало важно при организации постоянного процесса сравнения шкал времени. Более того, расценки на аренду каналов у разных операторов на сегодняшний день делают нецелесообразным использование данного метода при символьной скорости 20 МЧип/с.

Для данного метода справедливо выражение для оценки СКО максимального правдоподобия времени задержки широкополосного сигнала:

$$\sigma_{\tau} = \frac{\alpha}{F_e \sqrt{2T(C/N_0)}}, \quad (8)$$

где $\alpha = \pi/2/3$, F_e – эффективная ширина спектра сигнала, T – длительность сигнала (время измерения), C/N_0 – отношение мощности сигнала к спектральной плотности мощности шума.

Из выражения (8) следует, что уменьшения дисперсии оценки задержки можно достичь увеличением эффективной полосы, занимаемой сигналом F_e , увеличением длительности сигнала, а также повышением отношения C/N_0 . Используемые сигналы с большой базой как раз позволяют одновременно увеличивать и ширину спектра, и длительность сигнала.

В качестве альтернативы данному методу, сейчас некоторыми лабораториями проводятся эксперименты по опробованию метода двойной псевдошумовой последовательности (DPN). Данный метод позволяет улучшить точность в сравнении с предыдущим при скорости 20 МЧип/с и при этом значительно уменьшить ширину арендуемого канала (рисунок 13).

В соответствии с формулой (8) точность определения задержки при использовании таких сигналов обратно пропорциональна эффективной ширине полосы спектра. Таким образом, повышение точности влечет за собой дорогостоящее расширение занимаемой спектральной полосы. Как оказывается, добиться повышения точности можно расширив полосу, но при этом используя для сигнала только два участка на границах полосы. При этом ширина самих участков в спектре может быть существенно уже, чем расстояние между ними. СКО оценки задержки в данном случае будет иметь вид:

$$\sigma_{\tau} = \frac{\sqrt{2}\sigma_{\varphi}}{4\pi F_{\text{tone}}} = \frac{1}{4\pi F_{\text{tone}}} \sqrt{\frac{1}{T(C/N_0)}}. \quad (9)$$

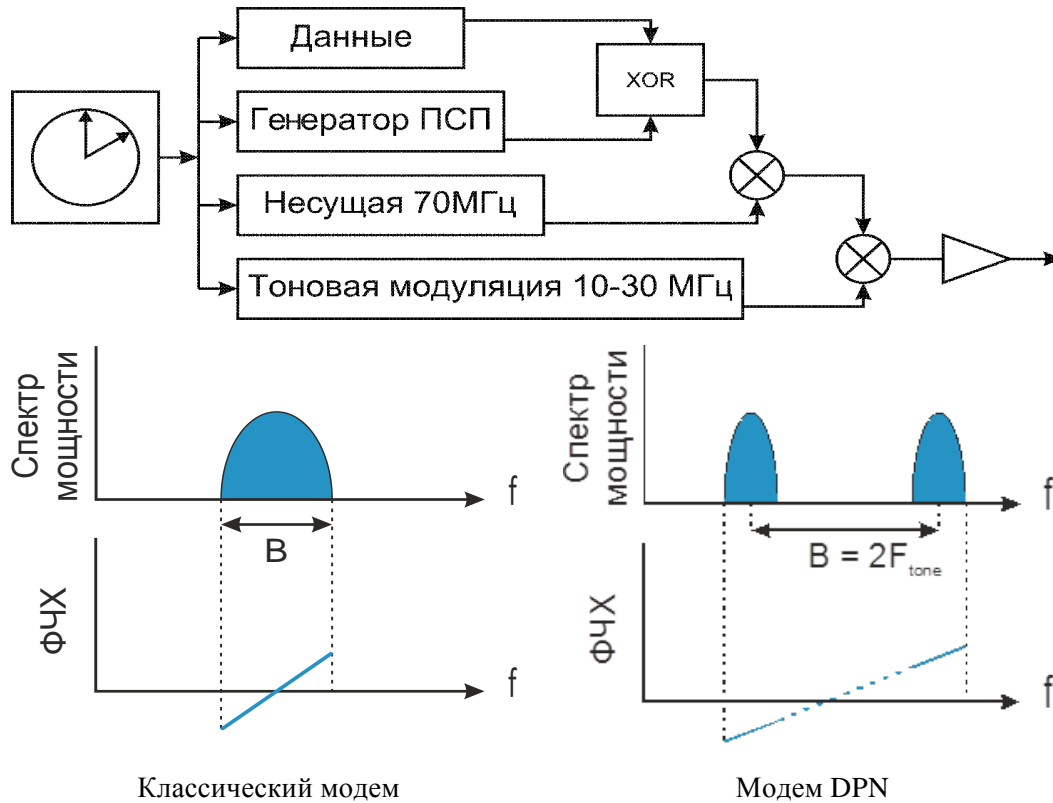


Рис. 13. Метод тоновой модуляции (DPN)

Из (9) следует, что погрешность оценивания задержки не зависит от размеров полос сигнала DPN (определяемых скоростью кодовой модуляции). Таким образом, высокую точность можно обеспечить при использовании узкополосных сигналов, разнесенных по частоте. Данный факт дает два существенных преимущества при использовании DPN в сравнении обычными сигналами. Во-первых, узкая ширина спектра, арендуемая для спутникового канала связи, существенно удешевит процедуру сравнения шкал времени. Во-вторых, использование более низкой скорости кодовой модуляции позволит упростить и удешевить аппаратуру модема. Точности измерений перспективных и существующих методов TWSTFT приведены таблице 1.

Таблица 1

Перспективные и существующие методы TWSTFT

Метод измерения	СКО измерений интервалов времени	MDEV@100 с
Кодовые измерения, 2,5 МЧип/с (TWSTFT)	0,5 – 1 нс	$3 \cdot 10^{-13}$
Кодовые измерения, 20 МЧип/с (TWSTFT)	~ 100 пс	$7 \cdot 10^{-14}$
Фазовые измерения (TW CP)	–	$2 \cdot 10^{-14}$
Тоновая модуляция (DPN), Ftone = 10 МГц	10 – 50 пс	$8 \cdot 10^{-14}$

4.2. Улучшение характеристик модемов SATRE. Метод SDR

Коллегами из Тайваньской национальной лаборатории времени был разработан и предложен способ улучшения характеристик модемов SATRE путем использования программно реализованного приемника сигналов TWSTFT (Software Defined Receiver - SDR). В данном случае принимаемый сигнал параллельно подается и на модем SATRE и на приемник SDR, который в свою очередь состоит из АЦП и программы цифровой обработки сигнала (рисунок 14). Таким образом, появляется возможность одновременно принимать сигнал как с помощью модема SATRE, так и с помощью приемника SDR. Передача сигнала осуществляется с помощью модема SATRE.

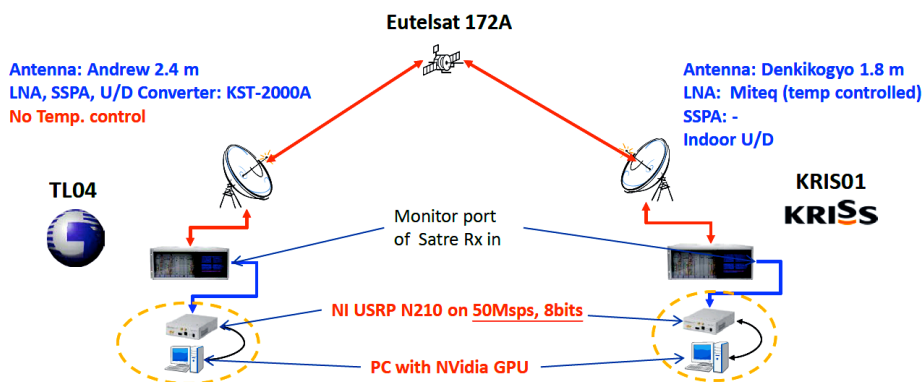
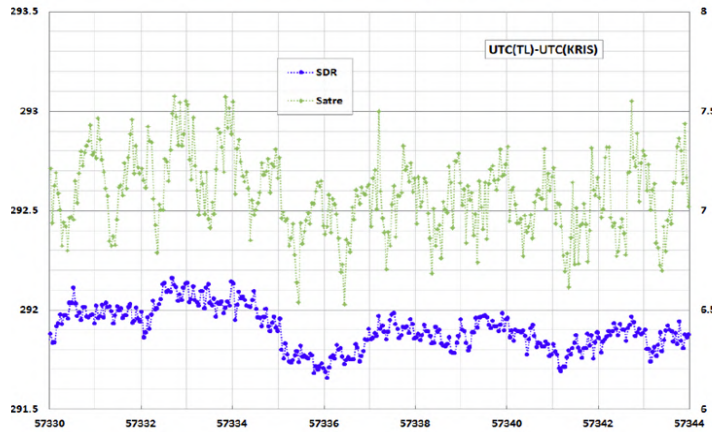


Рис. 14. Приемник SDR

Использование такой схемы позволяет использовать более гибкие алгоритмы обработки сигнала и задействовать современные мощные вычислительные ресурсы. Использование приемника SDR позволяет значительно снизить шумы в измерениях и увеличить временную стабильность измерений на коротких интервалах наблюдений (рисунки 15 и 16).

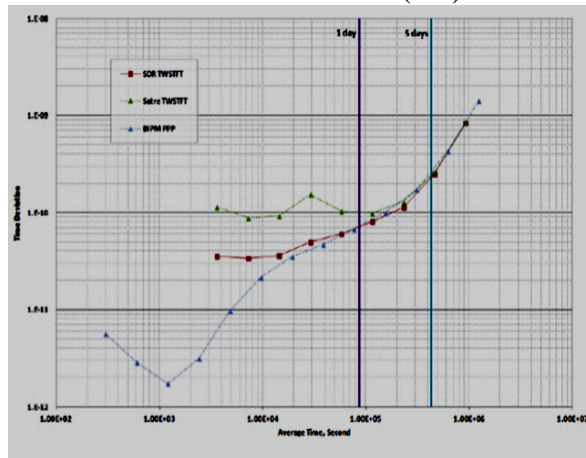
SATRE vs. SDR (1/2)



SDR results had no obvious diurnal

Рис. 15. Сравнение SATRE и SDR

SATRE vs. SDR (2/2)



- Long-term agree with Satre Modem and PPP (BIPM)
- Short term is more stable then Satre Modem

Рис. 16. Сравнение SATRE и SDR

5. Применение метода во ВНИИФТРИ

В августе 2011 года ФГУП «ВНИИФТРИ» завершил оформление разрешительных документов для эксплуатации комплекса дуплексных сравнений шкал времени (КДСШВ), а с 7 сентября включился в работу по сличениям шкал времени в составе Европейско-Азиатской рабочей группы дуплексных сличений шкал времени. В сентябре 2011 г. во «ВНИИФТРИ» успешно проведены предварительные испытания аппаратуры. В ходе испытаний КДСШВ с помощью перевозимых квантовых часов типа Ч1 – 76А была экспериментально подтверждена возможность определения расхождения шкал времени ГЭВЧ и пространственно удаленных объектов с погрешностью не более ± 2 нс.

КДСШВ состоит из стационарного и перевозимого комплектов аппаратуры TWSTFT производства фирмы «Timetech». Стационарный комплект аппаратуры (рисунок 17) решает задачи сличений шкалы времени UTC(SU) со шкалами времени участников Европейско-Азиатской рабочей группы TWSTFT. Перевозимый комплект аппаратуры (рисунок 18) при совместной работе со стационарным комплектом решает задачи метрологического обеспечения средств измерений времени и частоты, в том числе средств синхронизации системы ГЛОНАСС. Каждый комплект аппаратуры представляет собой типовую наземную станцию спутниковой связи Ku – диапазона со специализированным модемом SATRE.



Рис. 17. Стационарный комплект аппаратуры TWSTFT, SU01



Рис. 18. Перевозимый комплект аппаратуры TWSTFT, SU02

С началом штатной эксплуатации КДСШВ в ГМЦ ГСВЧ появился оперативный и высокоточный канал синхронизации шкал времени ГЭВЧ с лабораториями времени Европы и Азии, качественно повысился уровень метрологического обеспечения средств измерений, обеспечивающих передачу единиц времени и частоты и национальной шкалы времени UTC(SU) от ГЭВЧ к средствам измерений системы ГЛОНАСС в соответствии с «Государственной поверочной схемой для средств измерений времени и частоты». При этом случайная погрешность измерений не превышает 0,3 нс при времени измерения 1 сутки (рисунок 19).

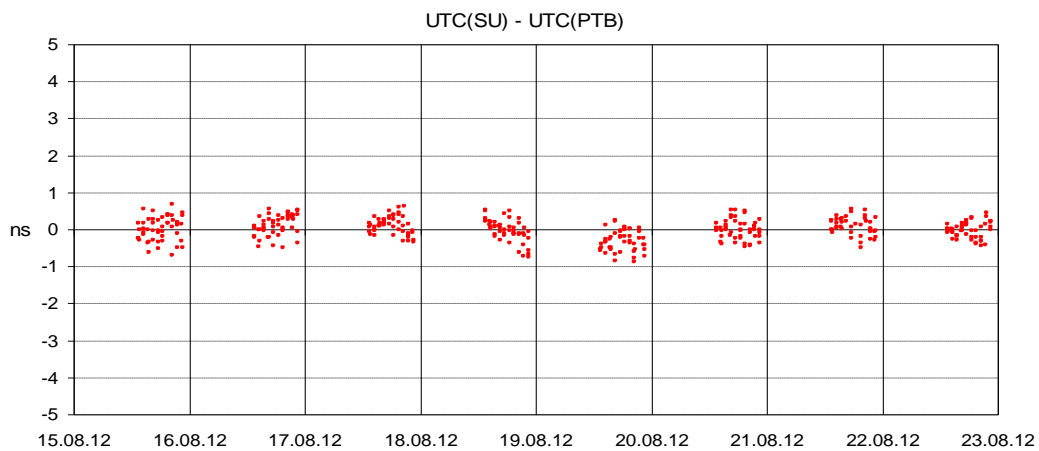


Рис. 19. Результаты сравнений шкал времени UTC(SU) и UTC(PTB)

6. Калибровка каналов сравнений шкал времени

С учетом предъявляемых требований к погрешности сличений шкал времени для определения метрологических характеристик средств сличений шкал времени пространственно удаленных наземных объектов применяются методы калибровки с использованием следующих высокоточных средств:

- перевозимых квантовых часов;
- перевозимого калибровочного приемника;
- перевозимой аппаратуры TWSTFT.

6.1 Метод перевозимых квантовых часов

Метод основан на использовании перевозимых квантовых часов в классическом варианте сличений шкал времени. Перед транспортировкой на пункт калибровки перевозимые квантовые часы (ПКЧ) в течение не менее трех дней сличают со шкалой Государственного эталона времени и частоты (ГЭВЧ). Далее ПКЧ во включенном состоянии транспортируют на пункт проведения калибровочных работ, при этом фиксируются параметры движения во времени, параметры окружающей среды часов. В течение времени не более суток проводятся сеансы сличений со шкалой времени пункта. Затем часы возвращаются обратно на ГЭВЧ для контроля шкал времени. При окончательных вычислениях учитываются температурные и релятивистские поправки.

Наиболее точными на сегодняшний день являются перевозимые квантовые часы «Сапфир» с активным водородным генератором производства ФГУП «ВНИИФТРИ». Широко используются ПКЧ на базе стандарта Ч1-1007 производства ЗАО «Время-Ч» и ПКЧ на базе стандарта Ч1-76А производства «Кварц» с пассивными водородными генераторами (рисунок 20).

Основное преимущество данного метода – высокая точность и достоверность измерений по сравнению с другими методами. При этом погрешность калибровки не превышает 1 - 3 нс. К недостаткам метода следует отнести влияние условий окружающей среды, релятивистских эффектов, механических воздействий на результаты сличений и необходимость поддержания требуемых рабочих условий при транспортировке. Зона применения данного метода ограничивается временем транспортировки часов не более одних суток.



Сапфир



Ч1-76А



Ч1-1007

Рис. 20. Метод ПКЧ

6.2. Метод перевозимого калибровочного приемника

Данный метод основан на использовании сигналов космических навигационных спутников (КНС). Перед транспортировкой перевозимый приемник сигналов КНС не менее трех суток сличается с опорным приемником ГЭВЧ. Далее в выключенном состоянии транспортируется на пункт проведения калибровочных работ, что значительно упрощает реализацию данного метода по сравнению с методом ПКЧ. По прибытии на пункт проводится цикл измерений на интервале 2 - 3 суток. По возвращении приемник также не менее трех суток сличается с опорным приемником ГЭВЧ для контроля измерений. По завершении измерений рассчитываются результаты калибровки.

Основные достоинства данного метода – невысокая стоимость проведения работ, удобство транспортировки, небольшая масса и габариты, глобальная зона охвата. Для этого метода может быть достигнута точность порядка 5 нс. Во ФГУП "ВНИИФТРИ" в рамках данного метода используются приемники типа GTR-51.

6.3. Метод перевозимой аппаратуры дуплексных сличений по спутниковым каналам

На сегодняшний день метод имеет наивысшую точность из всех известных радиотехнических методов. Он основан на встречной передаче сигналов по выделенным каналам связи через геостационарные искусственные спутники Земли.

ФГУП "ВНИИФТРИ" приобрело стационарный и перевозимый комплект аппаратуры дуплексных сличений производства фирмы «Timetech». Стационарный комплект установлен на ГЭВЧ в п. Менделеево, перевозимый комплект входит в состав мобильной лаборатории и может быть доставлен в выключенном состоянии в любой пункт для проведения калибровки.

Суть метода TWSTFT заключается в приеме стационарным и мобильным комплектами сигналов, несущих информацию о местных шкалах времени двух пунктов. Сравнивая задержки сигналов, прошедших равный путь, может быть вычислена разность шкал времени двух пунктов. Результат измерения – общая (двухсторонняя) задержка в наносекундах. При этом индивидуальные задержки передатчика и приёмника измеряются и учитываются.

Основные преимущества метода – точность порядка 1-2 нс, высокая помехозащищенность, широкая зона действия – в зоне видимости спутника. К недостаткам относятся: высокая стоимость аппаратуры, высокая стоимость аренды спутниковых каналов связи, сложность процедуры оформления разрешительных документов для эксплуатации аппаратуры.

Таблица 2

Сравнительные характеристики методов

Метод	Погрешность	Время транспортировки	Зона применения	Стоимость
ПКЧ	$\leq 1-3$ нс	Не более 1 суток	Локальная	Средняя
ПКП	≥ 5 нс	Не ограничено	Глобальная	Низкая
TWSTFT	$\leq 1-2$ нс	Не ограничено	В пределах зоны видимости спутника	Высокая

Таким образом, решение задачи калибровки высокоточных средств сличений шкал времени на местах их эксплуатации может быть выполнено при применении методов с использованием перевозимых квантовых часов, перевозимого калибровочного приемника и перевозимой аппаратуры дуплексных сравнений шкал времени. Выбор метода определяется в основном требованиями к точности и условиями дислокации калибруемых средств. При этом перевозимые средства TWSTFT могут обеспечить калибровку высокоточных средств сличений шкал времени с погрешностью не более 1 - 2 нс практически на всей территории страны (таблица 2).

6.4. Калибровочная кампания на примере калибровки канала TWSTFT между ФГУП «ВНИИФТРИ» и РТВ

Для достижения потенциальных возможностей по обеспечению высокоточных сравнений шкалы времени UTC(SU) со шкалами времени лабораторий Евроазиатской рабочей группы TWSTFT была необходима калибровка станции SU01 относительно станции РТВ03 Физико-технического института (РТВ). На основе взаимной договоренности между ФГУП «ВНИИФТРИ» и РТВ в 2012 году были проведены работы по калибровке стационарного комплекта аппаратуры дуплексных сравнений ФГУП «ВНИИФТРИ» по средствам РТВ. Калибровка осуществлялась с помощью перевозимого комплекта аппаратуры TWSTFT, перевозимого калибровочного приемника GNSS (ПКП) и перевозимых квантовых часов (ПКЧ) [15].

Перевозка калибровочного оборудования от ФГУП «ВНИИФТРИ» до РТВ и обратно осуществлялась мобильной лабораторией (МЛ), оборудованной средствами автономного энергоснабжения и поддержания температурного режима. Мобильная лаборатория с калибровочным оборудованием транспортировалась своим ходом от ФГУП «ВНИИФТРИ» до г. Санкт-Петербург. От г. Санкт-Петербург до г. Любек (Германия) МЛ перевозилась на рейсовом пароме по Балтийскому морю. По прибытию в г. Любек МЛ транспортировалась своим ходом до г. Брауншвейг. По завершению калибровочных работ в РТВ транспортировка МЛ в ФГУП «ВНИИФТРИ» осуществлялась аналогичным образом по обратному маршруту (рисунок 21). При проведении калибровочных работ отказов и сбоев в работе используемых средств калибровки не было, средства энергоснабжения и поддержания температурного режима МЛ обеспечивали необходимые условия функционирования аппаратуры.

Перед поездкой в РТВ и по возвращении во ФГУП «ВНИИФТРИ» проводилась взаимная калибровка стационарной SU01 и перевозимой SU02 станций. Измерения выполнялись на короткой базе (30 м) с помощью перевозимых квантовых часов (ПКЧ) на основе пассивного водородного стандарта частоты и времени типа Ч1-76А. Схема соединения калибровочного оборудования, используемая в ФГУП «ВНИИФТРИ», приведена на рисунке 22. При этом результаты взаимной калибровки станций до и после поездки совпали. Разность задержек сигналов станций SU01 и SU02 составила минус 4,0 нс с неопределенностью измерений $u_{B1} \leq 0,5$ нс.

Маршрут на карте
Протяжённость маршрута в одну сторону ~ 2500 км



Рис. 21. Маршрут поездки

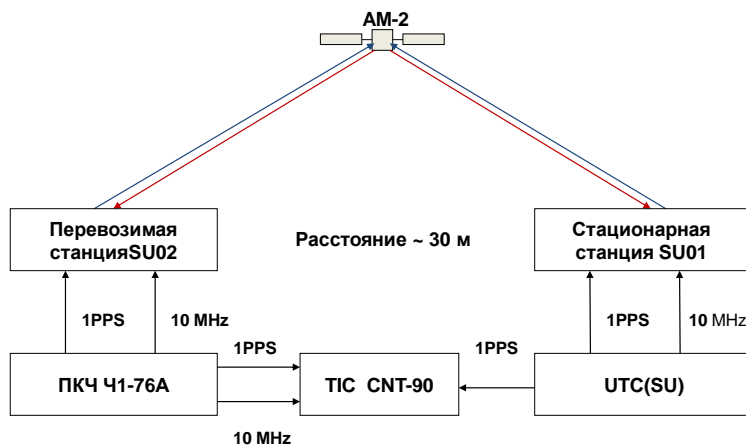


Рис. 22. Схема соединений станций SU01 и SU02 на нулевой базе во ВНИИФТРИ

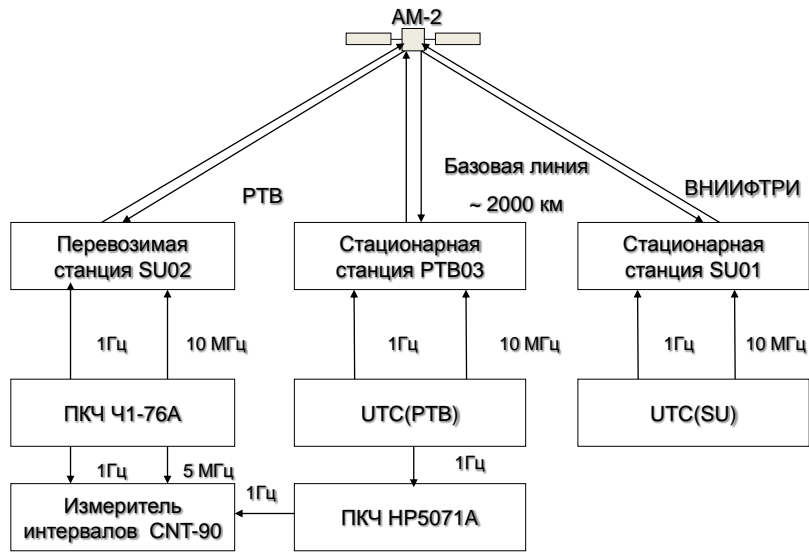


Рис. 23. Схема соединений станций PTB03 и SU02 в PTB

Измерения в PTB с помощью переносимой станции TWSTFT SU02 и стационарных станций PTB03 и SU01 выполнялись в период MJD 56231 - 56233 в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 23. Для сравнений шкал времени UTC(PTB) и пассивного водородного стандарта частоты и времени Ч1-76А использовался цезиевый стандарт частоты и времени типа HP5071A Cs9 из состава оборудования PTB. При этом неопределенность измерений u_{B2} составила 0,2 нс.

С целью определения калибровочной поправки на задержку станции SU01 относительно станции PTB03 была проведена обработка результатов измерений, полученных с помощью переносимой станции TWSTFT SU02 и стационарных станций PTB03 и SU01, в соответствии с Рекомендацией ITU TF.1153-3 «Оперативное использование двухсторонней передачи сигналов времени и частоты через спутники с применением псевдослучайных шумовых кодов» [9]. При этом поправка на эффект Саньяка SCT(SU01 – PTB03) при использовании ИСЗ Экспресс AM-2 составила минус 42,2 нс.

Неопределенность измерений u_A , оцененная по результатам сравнений шкал времени UTC(PTB) и UTC(SU) методом TWSTFT на интервале времени наблюдения MJD 56226 – 56238, не превышает 0,5 нс. Неопределенность этих измерений u_{B3} не превышает 0,9 нс (таблица 3, рисунок 24) при полной сходимости результатов, полученных по сигналам 1 Гц сравнивае-

мых шкал времени при одновременной работе трех станций TWSTFT согласно соотношению $[(PTB03 - SU02) + (SU02 - SU01) + (SU01 - PTB03)] = 0$.

Суммарная стандартная неопределенность измерений u_B сравнений шкал времени с помощью перевозимой станции TWSTFT составила 1 нс.

Таблица 3
Результаты сравнений шкал времени UTC(PTB) и UTC(SU) методом TWSTFT с помощью станций SU01 и SU02

MJD	UTC(PTB) – ПКЧ нс	UTC(SU) – ПКЧс* нс	UTC(PTB) – UTC(SU) нс	u_A нс	u_{B1} нс	u_{B2} нс	u_{B3} нс	u_B нс
56232,4	339,2	326,5	12,7	0,3	0,5	0,2	0,9	1,0
56233,4	350,5	337,5	13,0	0,3	0,5	0,2	0,9	1,0

Примечание: UTC(SU) – ПКЧс* – значения, полученные с учетом поправок на эффект Саньяка и результатов калибровки на короткой базе.

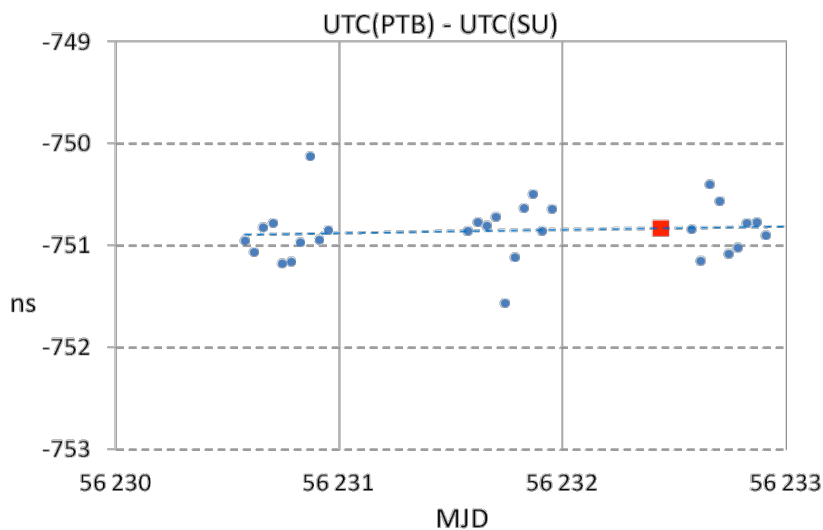


Рис. 24 а

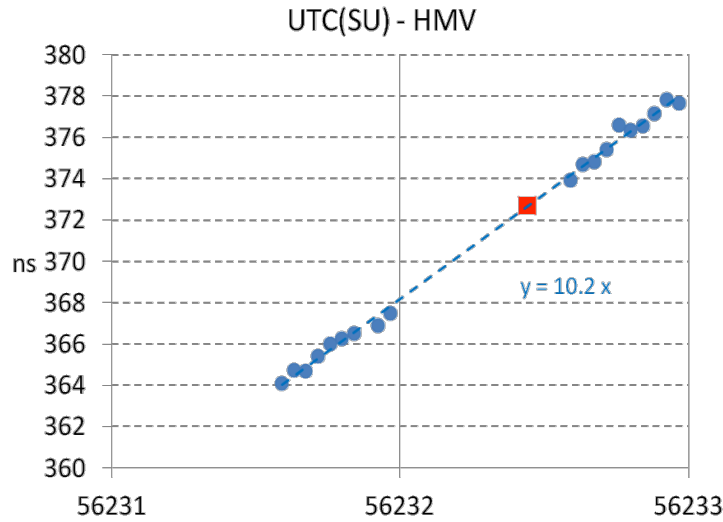


Рис. 24 б

Рис. 24 (а, б). Результаты сравнения шкал времени UTC(PTB) и UTC(SU) с помощью станций SU01 и SU02 (находилась в PTB). ■ – значение, полученное с помощью интерполяции на момент сравнения UTC(PTB) и ПКЧ Ч1-76А

Сравнение шкал времени UTC(SU) и UTC(PTB) с помощью перевозимого калибровочного приемника (ПКП) сигналов GNSS TTS-3 выполнялись по типовому методу. Этот метод позволяет сравнивать шкалы времени с высокой степенью достоверности, но с недостаточной точностью (таблица 4, рисунок 25). Оценка неопределенности u_A по результатам измерений не превышает 1,4 нс, при этом для этого метода неопределенность измерений u_B не превышает 3,0 нс [6].

Таблица.4

Результаты сравнений шкал времени UTC(PTB) и UTC(SU) по сигналам GPS C/A код, диапазон L1

MJD	UTC(PTB) - UTC(SU) нс	u_A нс	u_B нс	u нс
56231,5	13,5	1,3	3,0	3,3
56232,5	12,9	1,2	3,0	3,2
56233,5	12,4	1,4	3,0	3,3

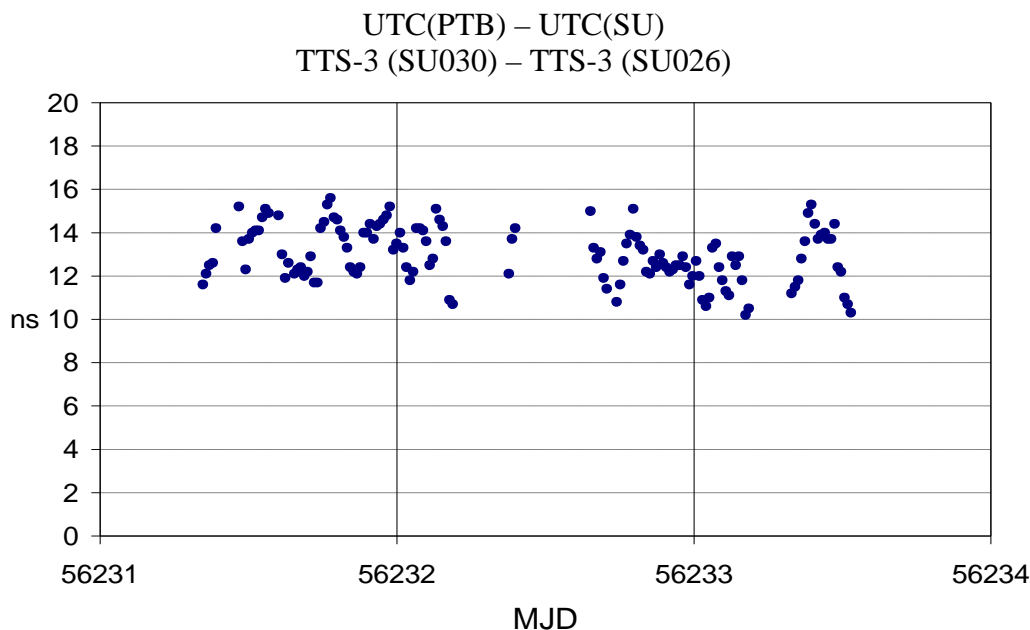


Рис. 25. Результаты сравнения шкал времени UTC(PTB) и UTC(SU) с помощью GPS сигналов

Сравнение шкал времени UTC(SU) и UTC(PTB) с помощью третьей независимой шкалы времени – шкалы ПКЧ Ч1-76А, выполнялось в соответствии с методом, разработанным во ФГУП «ВНИИФТРИ» [15]. При обработке результатов измерений также учитывались Рекомендации ИТУ ТФ. 1010-1 «Релятивистские эффекты в системе координированного времени вблизи Земли». Перевозимые квантовые часы Ч1-76А на протяжении всего маршрута находились в нормальных рабочих условиях, что позволило реализовать высокие метрологические характеристики прибора. При этом каких-либо скачков частоты или потерь шкалы времени ПКЧ в течение всего эксперимента не наблюдалось.

Результаты сравнений шкал времени UTC(SU) и UTC(PTB) с использованием шкалы времени ПКЧ были получены на основе расчетных значений прогноза хода шкалы времени ПКЧ с учетом поправок на релятивистские эффекты и на эффект Саньяка. Переход к шкале времени UTC(PTB) от шкалы времени ПКЧ осуществлялся по данным измерений, выполненных с помощью транспортируемого цезиевого стандарта из состава оборудования РТВ. На момент сравнений шкал времени с учетом известных метрологических характеристик ПКЧ Ч1-76А неопределенность измерений u_B составляла 3,0 нс (таблица 5, рисунок 26).

Таблица 5
 Результаты сравнений шкал времени UTC(PTB) и UTC(SU) со шкалой
 времени ПКЧ

MJD	UTC(PTB) – ПКЧ нс	Поправка на реляти- вистские эффекты нс	Поправка на эффект Саньяка нс	UTC(SU) – ПКЧс* нс	UTC(PTB) – UTC(SU) нс	uB нс
56232,4	339,2	10,2	-5,4	326,3	12,9	3,0
56233,4	350,5	11,6	-5,4	336,4	14,1	3,0

Примечание: UTC(SU) - ПКЧс* – значения, полученные с учетом поправок на релятивистские эффекты и эффект Саньяка.

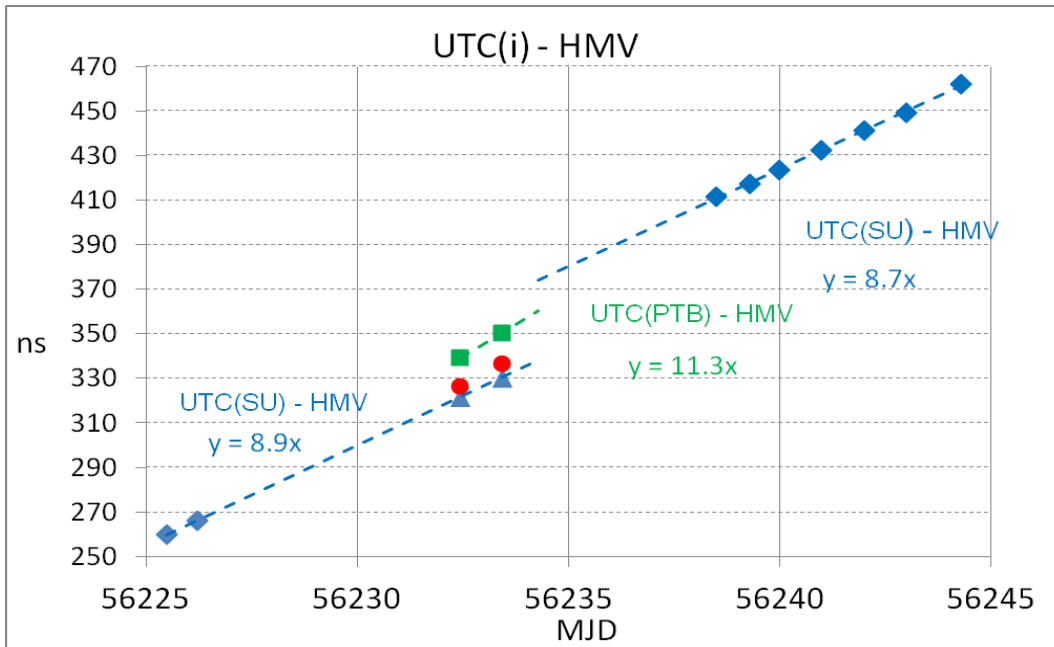


Рис. 26. Результаты сравнения шкал времени UTC(PTB) и UTC(SU) с помощью ПКЧ. ◆ - сравнение ШВ UTC(SU) и ПКЧ во ВНИИФТРИ. ▲ - прогноз измерений. ● - значение получено на основе прогноза ШВ ПКЧ с учетом поправок на эффект Саньяка. ■ - сравнения ШВ UTC(PTB) и ПКЧ с помощью часов C9 в PTB

По завершению экспериментальной части калибровки были получены оценки смещений шкал времени UTC(SU) и UTC(PTB), представленные в таблице 5 и на рисунке 27.

Таблица 6

Результаты сравнений шкал времени UTC(SU) и UTC(PTB)

	UTC(PTB) – UTC(SU), нс		
	Перевозимая станция SU02	ПКП TTS-3	ПКЧ Ч1-76А
MJD 56232	12,7	12,9	12,9
uA	0,3	1,4	0,1
uB	1,0	3,0	3,0
u	1,1	3,3	3,0

Оценки смещений шкал времени UTC(SU) и UTC(PTB), полученные тремя независимыми методами, согласуются в пределах соответствующих неопределенностей результатов измерений. При этом достигнутый уровень согласования результатов независимых измерений подтверждает достоверность результатов калибровки канала TWSTFT между средствами PTB и ФГУП «ВНИИФТРИ».

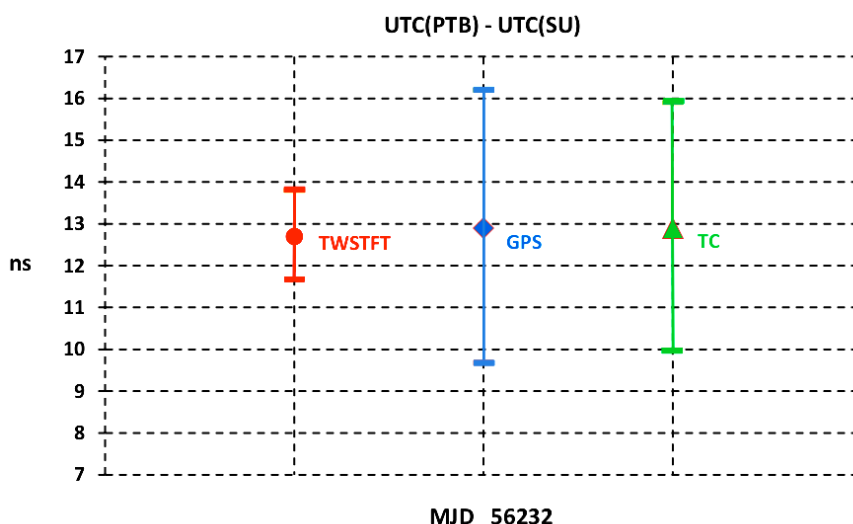


Рис. 27. Общий результат сравнения шкал времени UTC(PTB) и UTC(SU)

Таким образом, экспериментальным методом была получена калибровочная поправка CALR на задержку станции SU01 относительно станции

PTB03, значение которой составило 764,0 нс с неопределенностью измерений и 1,1 нс. Этот результат был официально зафиксирован в ВРМ с присвоением для станции SU01 идентификатора калибровки CI 281 от 23 мая 2013 года (рисунок 28). В сентябре 2013 года ВРМ для сравнений шкал времени UTC(SU) и UTC(PTB) перешел от использования данных GPS/ГЛОНАСС к данным TWSTFT. При этом в соответствии с циркулярами Т 309 и Т 310 погрешность канала сравнений шкал времени была снижена почти в 5 раз.

```
* twsu56.439
* FORMAT 01
* LAB SU
* REV DATE 2013-05-27
* ES SU01 LA: N 56 01 17.374 LO: E 37 12 52.220 HT: 257.12 m
* REF-FRAME WGS84
* LINK 14 SAT: AM-2 NLO: E 80 0 0.000 XPNDR: 999999999 ns
* SAT-NRX: 10960.0000 MHz SAT-NRX: 14260.0000 MHz BW: 2.5 MHz
* CAL 281 TYPE: PORT ES REL MJD: 56232 EST. UNCERT.: 1.100 ns
* LOC-NON NO
* MODEM SATRE 435
* COMMENTS
*
* EARTH-STAT LI MOD STTIME NTL TW DRMS SMP ATL REFDELAY RSIG CI S CALR ESDVAR ESIG TMP HUM PRES
* LOC REM hhmms s s ns s s s s ns ns ns ns degC % mbar
SU01 NPLI01 14 56439 110100 299 0.255710008551 0.611 300 299 0.000001351357 0.009 999 9 999999999 999999999 99999 999 999 9999
SU01 NICT14 14 56439 111300 299 0.266576019402 0.575 300 299 0.000001351376 0.011 999 9 999999999 999999999 99999 999 999 9999
SU01 NTSC02 14 56439 111900 299 0.259461971714 0.584 300 299 0.000001351369 0.014 999 9 999999999 999999999 99999 999 999 9999
SU01 PTB03 14 56439 112500 299 0.270973861017 0.587 300 299 0.000001351384 0.009 281 1 -764.000 999999999 99999 999 999 9999
SU01 TL02 14 56439 113100 299 0.260369306388 0.545 300 299 0.000001351384 0.010 999 9 999999999 999999999 99999 999 999 9999
SU01 NIMO1 14 56439 113700 299 0.261919991069 0.572 300 299 0.000001351367 0.013 999 9 999999999 999999999 99999 999 999 9999
SU01 SU01 14 56439 114300 299 0.266616422979 0.485 300 299 0.000001351380 0.009 999 9 999999999 999999999 99999 999 999 9999
SU01 NPLI01 14 56439 120100 299 0.255716481575 0.592 300 299 0.000001351376 0.010 999 9 999999999 999999999 99999 999 999 9999
SU01 NICT14 14 56439 121300 299 0.266582477084 0.571 300 299 0.000001351380 0.011 999 9 999999999 999999999 99999 999 999 9999
SU01 NTSC02 14 56439 121900 299 0.259468489786 0.601 300 299 0.000001351392 0.012 999 9 999999999 999999999 99999 999 999 9999
```

Рис. 28. ITU файл с учетом калибровочной записи CI 281

7. Использование модемов для работы по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС)

Одним из недостатков метода TWSTFT является высокая стоимость аренды спутниковых каналов. В связи с этим, как правило, для передачи сигналов времени и частоты используются низкие скорости цифровой фазовой манипуляции от 1,0 до 2,5 МЧип/с, что позволяет сравнивать шкалы времени с точностью не хуже 1 нс.

В настоящий момент оптоволоконные сети имеют достаточно обширную зону охвата. Доступность и возможности такого ресурса вызывают большой интерес у ведущих мировых лабораторий времени для развития методов передачи сигналов времени и частоты по волоконно-оптическим линиям. Данный метод был успешно опробован и применяется некоторыми из них.

Для исследования возможностей по передаче ЭСЧВ по ВОЛС во ФГУП «ВНИИФТРИ» был проведен эксперимент с использованием двух модемов SATRE [16], размещенных в одном помещении и подключенных к одному эталонному источнику сигналов времени и частоты. Спутниковый тракт был заменен на оптический, выполненный в виде лабораторных катушек волокна

SMF-28. В эксперименте при передаче ЭСЧВ использовалась максимальная скорость, 20 МЧип/с (рисунок 29). Передача осуществлялась на оптической длине волны 1,55 мкм, соответствующей основному окну прозрачности оптического одномодового волокна.

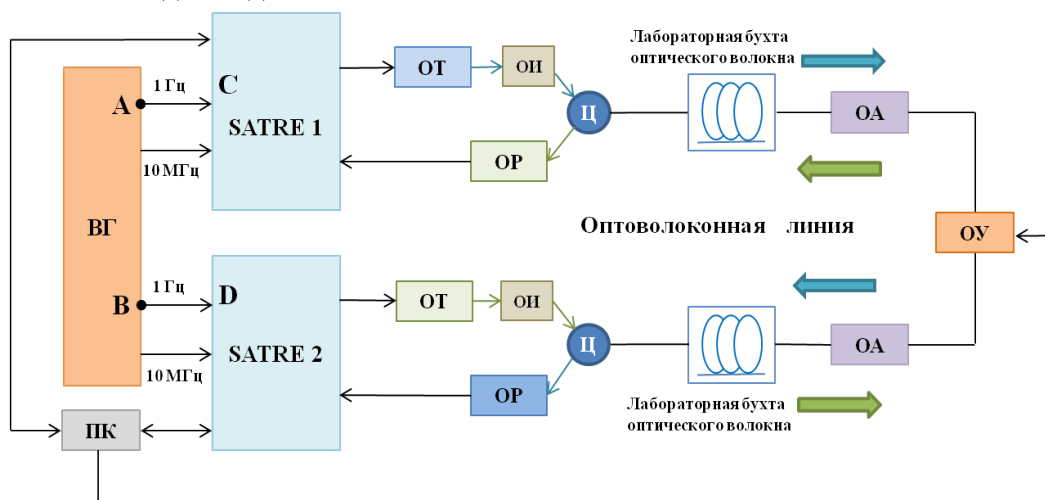


Рис. 29. Схема и общий вид установки. ВГ - водородный стандарт времени и частоты; ПК - персональный компьютер управления; SATRE – Модем SATRE; ОТ - оптический трансмиттер; ОР - оптический ресивер; ОИ - оптический изолятор; Ц – Циркулятор; ОА - оптический аттенуатор; ОУ - оптический усилитель

В экспериментальной установке использовались трансмиттеры и ресиверы Emscore [17]. На входы оптических трансмиттеров подавались выходные сигналы модемов SATRE, а входные сигналы на модемы поступали с оптических ресиверов.

Передача сигналов модемов SATRE на оптической несущей осуществлялась в оба конца по одному волокну. Для разделения встречных оптических сигналов на концах линии были установлены оптические циркуляторы. Для ослабления влияния паразитных отражений в оптической линии на работу лазерных диодов использовались оптические изоляторы. При передаче в 200 км линии для компенсации ослабления сигнала использовались двунаправленные оптические усилители. Измерения при передаче ЭСЧВ на 100 км были выполнены как с оптическими усилителями, так и без них. В процессе эксперимента для оптических линий разной длины были получены следующие результаты:

- измерена временная нестабильность (TDEV) передачи эталонного сигнала времени,
- измерена нестабильность частоты (ADEV) передачи эталонного сигнала частоты,
- оценена стандартная суммарная неопределенность результатов измерений при передаче сигналов времени.

Анализ данных показал, что временная нестабильность при передаче ЭСЧВ составляет порядка 3 пс на интервалах наблюдений более 10^4 с в экспериментах без оптических усилителей. При передаче ЭСЧВ с оптическими усилителями временная нестабильность (TDEV) измерений увеличивалась примерно в 2 раза (рисунок 30). Неопределенность измерений UA для каждой линии была взята из оценок TDEV при минимальном времени усреднения.

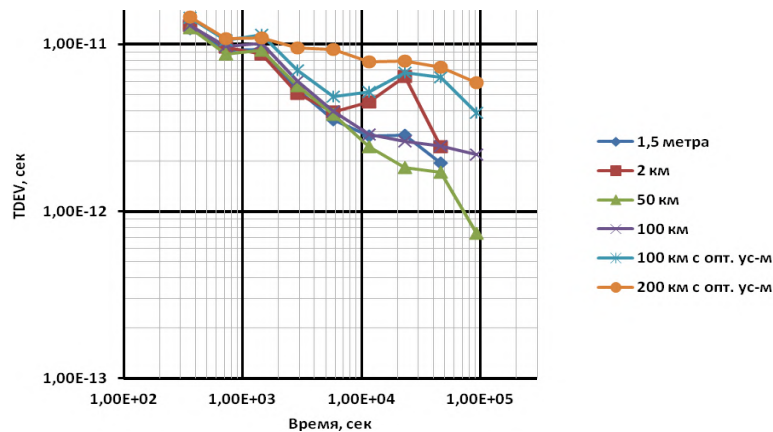


Рис. 30. Временная нестабильность TDEV передачи сигналов времени в линиях разной длины

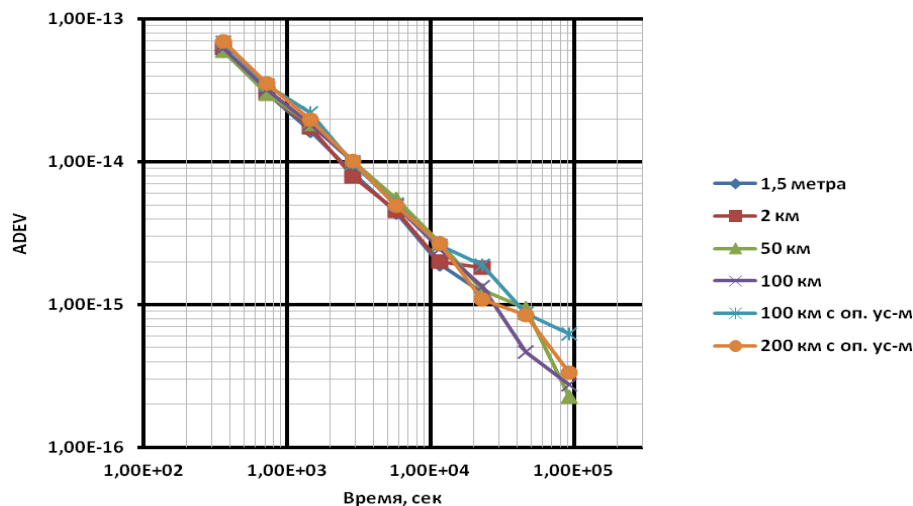


Рис. 31. Девиация Алана ADEV сигнала частотой 10 МГц при передаче ЭСЧВ в линиях разной длины

Нестабильность частоты (ADEV) передачи сигнала с частотой 10 МГц составила $3 \cdot 10^{-16}$ на интервале усреднения 1 сутки (рисунок 31).

Неопределенность измерений U_B при передаче ЭСЧВ складывается из температурной зависимости задержек в модемах SATRE и неопределенности измерений интервалов времени при калибровке задержек в кабелях (C-D) и может быть оценена следующим образом:

$$U_B = \sqrt{U_{B1}^2 + U_{B2}^2 + U_{B3}^2} \quad (10)$$

где:

- U_{B1} , U_{B2} – температурная зависимость задержек модемов SATRE, равная 30 пс/К.
- U_{B3} – неопределенность калибровки измерителя интервалов времени TimeTech Multi-Channel TIC 10409, равная 50 пс.
- В процессе измерений температура в лаборатории поддерживалась в пределах одного градуса. При этом оценивалось влияние на точность передачи сигналов времени различных факторов: уровня оптического сигнала в линии, изменения длины оптической линии в широких пределах, медленные изменения длины оптической линии с небольшой скоростью.
- Изменения уровней оптических сигналов в пределах до 6 dB, а также изменение длины линии со скоростью меньшей, чем 16 пс/с, практически не сказывалось на погрешности передачи сигнала времени. Наиболее существенным фактором, определяющим значение разности задержек двухпутевой передачи ЭСЧВ, является изменение дли-

ны оптической линии в широких пределах. Для определения влияния длины линии на точность передачи сигналов времени была проведена серия экспериментов с линиями разной длины, от 1,5 м до 100 км без оптических усилителей, а также 100 км и 200 км с оптическими двунаправленными усилителями от 1,5 м до 200 км (таблица 7).

Таблица 7
 Результаты измерений для разных длин оптических линий
 * – линия с оптическим усилителем

№ п/п	Длина линии	Задержка А-В, пс	UА, пс	UВ, пс	U, пс
1	1,5 м	- 798	13	66	67
2	2 км	- 464	13	66	67
3	50 км	- 306	13	66	67
4	100 км	- 831	13	66	67
5	100 км *	4 646	14	66	67
6	200 км *	4 131	15	66	68

Классический метод TWSTFT передачи ЭСЧВ предполагает, что значение разности двухпутевой задержки не зависит от длины линии передачи, но измерения с применением ВОЛС показали, что такая зависимость существует. Наиболее вероятной причиной является наличие переотражений оптического сигнала в ВОЛС. Результаты измерений показали, что при передаче сигналов времени по ВОЛС значение разности двухпутевой задержки может существенно меняться от линии к линии, оставаясь при этом постоянным для каждой линии.

Выполненный эксперимент подтверждает возможность передачи ЭСЧВ по ВОЛС в линиях длиной до нескольких сотен километров.

Литература

1. William J. Klepczynski, U.S. Naval Observatory. TWSTFT: Its History, Evolution and People, PTTI, 2014.
2. Steele J. McA., Markowitz W. and Lidback C.A. Telstar Time Synchronization// Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on (Volume:IM-13, Issue: 4), 1964.
3. Markowitz W., Lidback C.A., Uyeda H. and Muramatsu K. Clock Synchronization via Relay II Satellite// IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (Impact Factor: 1.71), 1967.
4. Kaiser J., Veenstra L., Ackermann E. and Seidel F. Small Earth Terminals at 12/14 GHz// Comsat Technical Review, v. 9, № 2, part B, Fall 1979. Hartl P., Gieschen N., Mussener K., Schaefer W. and Wende C., High Accuracy Global Time Transfer Via Geosynchronous Telecommunication Satellites with MITREX, Z. Flugwiss, Weltraumforsch, 7 (1983), Heft 5.
5. Report of the 2nd Meeting of the BIPM Ad-Hoc Working Group on Two-Way Satellite Time Transfer, October 1992, BIPM.
6. Landis G.P., White J., Gifford A., Beard R. and Murray J.A., A New Two-Way Time Transfer Modem. Proceedings of the 21st PTTI Meeting, 1989.
7. Отчеты заседания рабочих групп ССТФ TWSTFT <http://www.bipm.org/wg/AllowedDocuments.jsp?wg=WGTWSTFT>
8. Рекомендация МСЭ-R TF.1153-3. Международный союз электросвязи, Рекомендации МСЭ-R. Оперативное использование двухсторонней передачи сигналов времени и частоты через спутники с применением псевдослучайных кодов, том 2010 года, серия TF.
10. Fujieda M. et al. Carrier-phase-based two-way satellite time and frequency transfer // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, 2012, v. 59, №.12, с. 2625-2630.
11. Fujieda M. et al. Carrier-phase two-way satellite frequency transfer over a very long baseline //Metrologia, 2014, v. 51, №.3, с. 253.
12. Gotoh T. et al. Development of a GPU-based two-way time transfer modem //Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on 2011, v. 60, №. 7, с. 2495-2499.
13. Блинов И.Ю., Лузгин Д.В., Капитонов А.Л., Наумов А.В., Смирнов Ю.Ф. Калибровка канала дуплексных сравнений шкал времени TWSTFT между ФГУП «ВНИИФТРИ» и РТВ.- Труды Института прикладной астрономии РАН, вып. 27, 2013.
14. Dienert M. A New Modem for Microwave Time Synchronization via Geosynchronous Telecommunication Satellites / Proceedings of 6th European Frequency and Time Forum, 1992, p. 143 – 147.
15. Гайгеров Б.А., Сысоев В.П. Учет релятивистских эффектов при сличении *Альманах современной метрологии, 2016, №8*

нии шкал времени с помощью перевозимых квантовых часов// Измерительная техника, 2012, №2, с. 25 – 29.

16. SATRE 10139 Datasheet.

http://www.timetech.de/datasheet/10221_Datasheet.pdf

17. <http://products.emcore.com/avcat/images/documents/dataSheet/Optiva-OTS-1L6.pdf>.