

## КАЛИБРОВКА СРЕДСТВ ДУПЛЕКСНЫХ СРАВНЕНИЙ ШКАЛ ВРЕМЕНИ ФГУП «ВНИИФТРИ» И РТВ

И.Ю. Блинов, А.В. Наумов, А.Л. Капитонов, Ю.Ф. Смирнов  
ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

*Специалистами ФГУП «ВНИИФТРИ» совместно со специалистами РТВ была проведена калибровка канала сравнений шкал времени TWSTFT тремя независимыми методами. В статье приведено описание методов калибровок и представлены полученные результаты. Сообщается о практическом применении полученных результатов*

*Ключевые слова: сравнение шкал времени, калибровка, перевозимая станция, перевозимый калибровочный приёмник, перевозимые квантовые часы*

### Введение

Уровень согласования национальной шкалы времени UTC(SU) с Международной шкалой координированного времени UTC является важным целевым индикатором реализации Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» на 2012–2020 годы. С целью обеспечения требуемых характеристик формирования национальной шкалы времени ФГУП «ВНИИФТРИ» в 2011 году присоединился к Евроазиатской рабочей группе сравнений шкал времени TWSTFT со стационарной (SU01) и перевозимой (SU02) наземными станциями [1]. На сегодняшний день метод сравнений удаленных шкал времени, основанный на встречной передаче сигналов времени по каналам дуплексной связи через геостационарные спутники «Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer» (TWSTFT), имеет лучшую точность и оперативность по сравнению с другими известными методами. Для дости-

жения потенциальной точности сравнений удаленных шкал времени методом TWSTFT была необходима калибровка используемых для этого наземных средств. Соответствующая калибровка средств дуплексных сравнений шкал времени TWSTFT ФГУП «ВНИИФТРИ» и РТВ была выполнена в ноябре 2012 года. ФГУП «ВНИИФТРИ» при поддержке РТВ организовал сравнения шкал времени UTC(SU) и UTC(РТВ) с помощью перевозимой станции TWSTFT, перевозимого калибровочного приемника и перевозимых квантовых часов. По результатам сравнений шкал времени была получена калибровочная поправка на задержку станции SU01 относительно станции РТВ03.

В статье приведено описание методов сравнений шкал времени, окончательные результаты калибровки, а также результаты применения метода TWSTFT во ФГУП «ВНИИФТРИ».

## Транспортировка калибровочного оборудования

Для обеспечения высокоточных сравнений удаленных шкал времени необходимо транспортировать средства измерений от одного пункта к другому и обратно. Транспортировка калибровочного оборудования от ФГУП «ВНИИФТРИ» до РТВ и обратно осуществлялась мобильной лабораторией, оборудованной средствами автономного энергоснабжения и поддержания температурного режима. Мобильная лаборатория с калибровочным оборудованием транспортировалась своим ходом до г. Санкт-Петербург. От г. Санкт-Петербург до г. Любек (Гер-

мания) мобильная лаборатория перевозилась на рейсовом пароме по Балтийскому морю. По прибытию в г. Любек она транспортировалась также своим ходом до г. Брауншвейг. По завершению калибровочных работ в РТВ транспортировка мобильной лабораторией в ФГУП «ВНИИФТРИ» осуществлялась аналогичным образом и по тому же маршруту (рис. 1). При проведении калибровочных работ отказов и сбоев в работе используемых средств калибровки не было, средства энергоснабжения и поддержания температурного режима мобильной лаборатории обеспечивали нормальные условия функционирования аппаратуры.

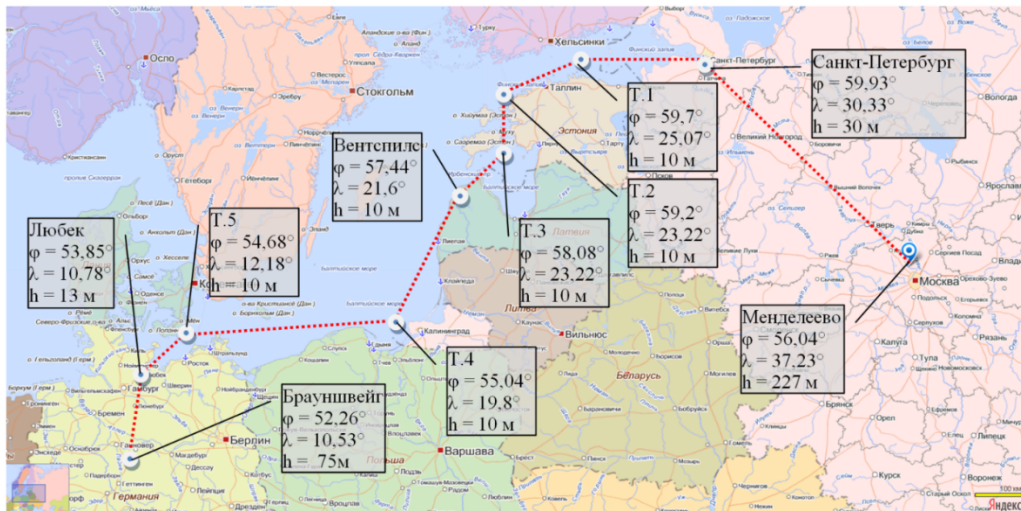


Рис. 1. Маршрут движения мобильной лаборатории

## Сравнение шкал времени с помощью перевозимой станции TWSTFT

Перед поездкой в РТВ и по возвращению во ФГУП «ВНИИФТРИ» проводилась взаимная калиб-

ровка 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 рис. 2. При этом результаты взаимной калибровки станций до и после поезд-

ки совпали. Разность задержек сигналов станций SU01 и SU02 составила минус 4,0 нс с неопределенностью измерений uB1 не более 0,5 нс (рис. 3).

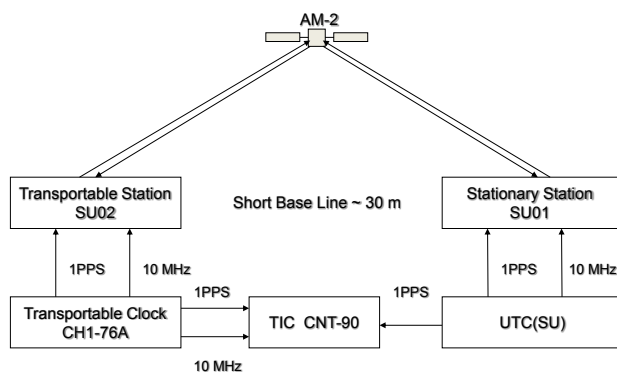


Рис. 2. Схема соединений станций SU01 и SU02 в ФГУП «ВНИИФТРИ»

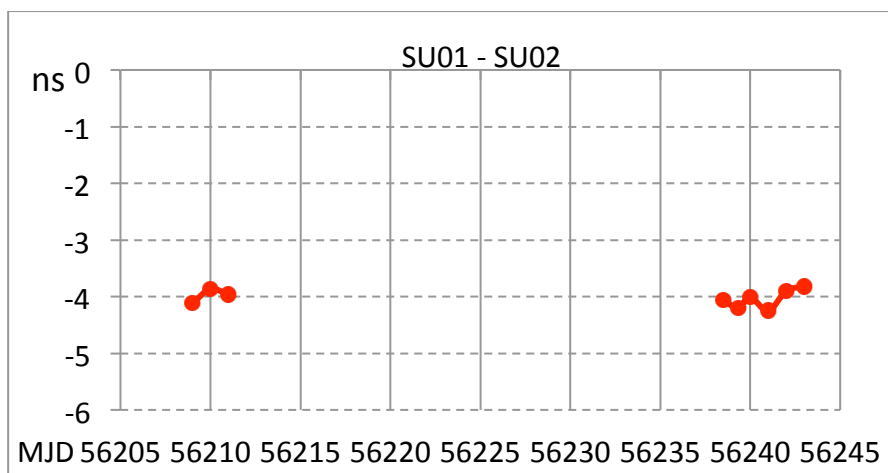


Рис. 3. Среднесуточные результаты измерений станций SU01 и SU02 на короткой базе до и после поездки в РТВ

Измерения в РТВ с помощью SU01 выполнялись в период MJD перевозимой станции TWSTFT SU02 56231 - 56233 в соответствии со схемой, приведенной на рис. 4. Для *Альманах современной метрологии, 2015, №2*

сравнений шкал времени UTC(PTB) и пассивного водородного стандарта частоты и времени Ч1-76А использовался цезиевый стандарт частоты

и времени типа HP5071A из состава оборудования PTB. При этом неопределенность измерений  $uB2$  составила 0,2 нс.

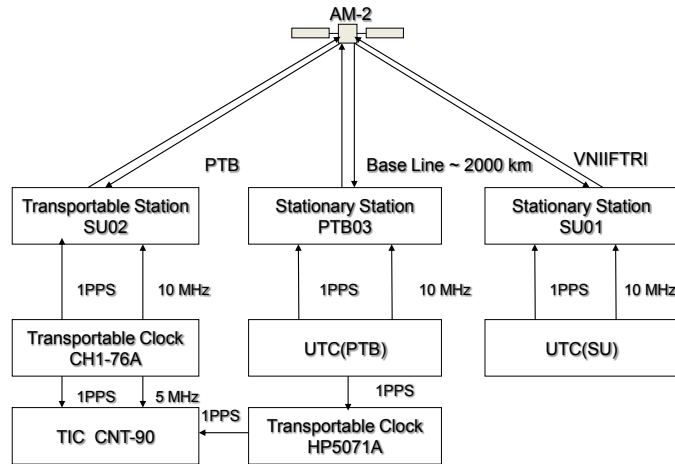


Рис.4. Схема соединений станций PTB03 и SU02 в PTB

С целью определения калибровочной поправки на задержку станции SU01 относительно станции PTB03 была проведена обработка результатов измерений, полученных с помощью перевозимой 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» [2]. При этом поправка на эффект Саньяка для линии SU01 – PTB03 при использовании

ИСЗ Экспресс AM-2 составила - 42,2 нс.

Неопределенность измерений  $uA$ , 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 измерений  $uB3$  не превышала 0,9 нс (табл. 1) при полной сходимости результатов, полученных по сигналам 1 Гц сравниваемых шкал времени при одновременной работе трех станций TWSTFT согласно соотношению  $[(PTB03-U02) + (SU02-SU01) + (SU01-TB03)] = 0$ .

Таблица 1

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	uA нс	uB1 нс	uB2 нс	uB3 нс	uB 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

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

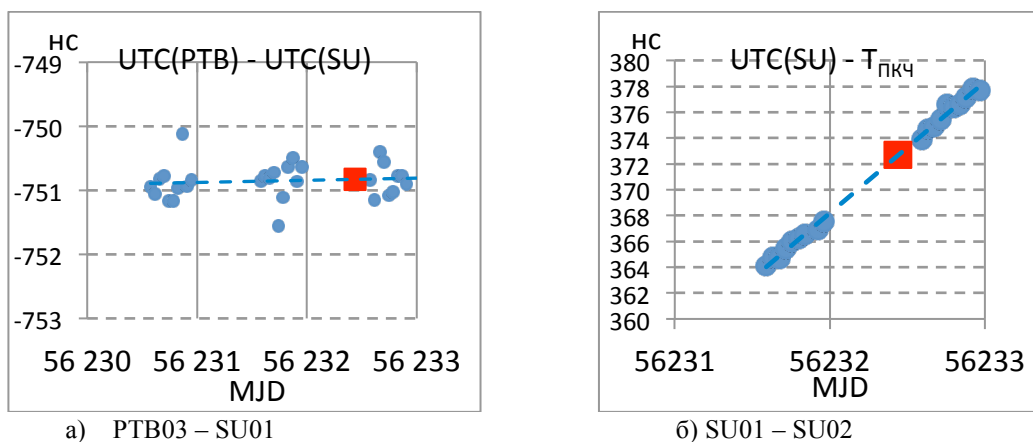


Рис. 5. Результаты сравнений шкал времени с помощью станций TWSTFT SU01, SU02 и PTB03

На рис. 5 а и 5 б квадратами отмечены значения, полученные интерполяцией результатов измерений на момент сравнений шкал времени UTC(PTB) и ПКЧ цезиевым стандартом частоты и времени HP5071A из состава PTB.

Суммарная стандартная неопределенность измерений uB при сравнении шкал времени с помощью перевозимой станции TWSTFT со-

ставила 1 нс.

**Сравнение шкал времени с помощью перевозимого калибровочного приемника**

Сравнение шкал времени UTC(SU) и UTC(PTB) с помощью перевозимого калибровочного приемника (ПКП) сигналов GNSS TTS-3 выполнялись по типовому методу, изложенному, например, в Rapport BIPM-2010/01 «Relative characteriza-

tion of GNSS receiver delays for GPS and GLONASS C/A codes in the L1 frequency band at the OP, SU, PTB and AOS» [3]. Метод основан на не изменности внутренней задержки в приемнике при его транспортировке. Результаты сравнений шкал времени с помощью перевозимого калибровочного приемника TTS-3 представ-

лены на рис. 5. Этот метод позволяет сравнивать шкалы времени с высокой степенью достоверности, но с невысокой точностью (табл. 2). Оценка неопределенности  $u_A$  по результатам измерений не превышает 1,4 нс, при этом для данного метода неопределенность измерений  $u_B$  не превышала 3,0 нс [3].

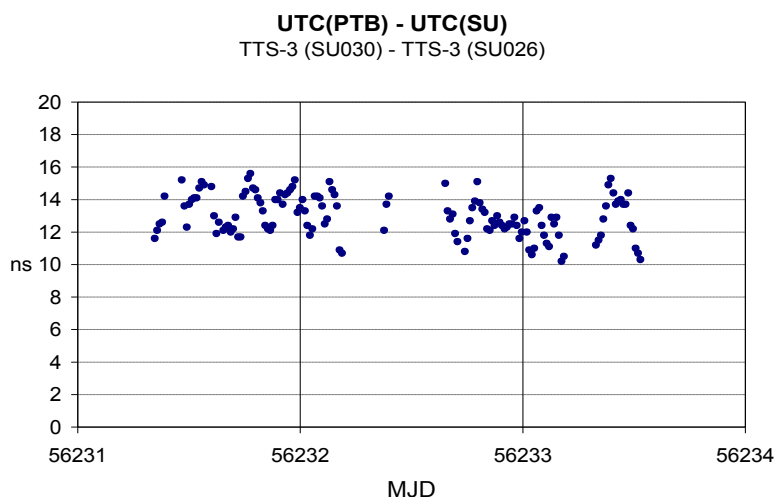


Рис. 6. Результаты сравнений шкал времени с помощью перевозимого калибровочного приемника TTS-3

Таблица 2

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

#### Сравнение шкал времени с помощью перевозимых квантовых часов

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» [4]. При обработке результатов измерений также учитывались Рекомендации ITU TF. 1010-1 «Реляти-

вистские эффекты в системе координированного времени вблизи Земли». Перевозимые квантовые часы на основе пассивного водородного стандарта частоты и времени Ч1-76А на протяжении всего маршрута находились в нормальных рабочих условиях, что позволило реализовать высокие метрологические характеристики ПКЧ. 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 (рис. 7). Переход к шкале времени UTC(PTB) от шкалы времени ПКЧ осуществлялся по данным измерений, выполненных с помощью транспортируемого цезиевого стандарта частоты и времени HP5071А из состава РТВ.

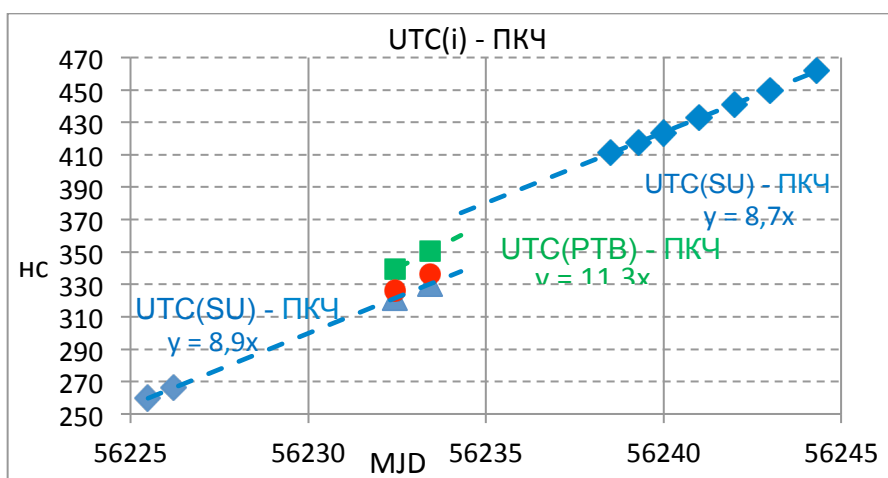


Рис. 7. Результаты сравнений шкал времени с помощью перевозимых квантовых часов Ч1-76А. Красные точки – значения, полученные с учетом поправок на релятивистские эффекты и на эффект Саньяка. Синие ромбы – прогноз значений UTC(SU) – ПКЧ. Зеленые квадраты – результаты сравнений UTC(PTB) – ПКЧ, полученные в РТВ с помощью цезиевого стандарта частоты HP5071А из состава РТВ.

Следует отметить высокий уровень метрологических характеристик, который обеспечили перевозимые квантовые часы Ч1-76А. В соответствии с данными измерений, частота ПКЧ за время транспортирования практически не изменилась,

что позволило с высокой точностью оценить и учесть влияние релятивистских эффектов и эффекта Саньяка. На момент сравнений шкал времени с учетом реальных метрологических характеристик ПКЧ Ч1-76А неопределенность измерений  $\mu\text{В}$  не превышала 3,0 нс (табл. 3).

Таблица 3

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

MJD	UTC(PTB) – ПКЧ нс	Поправка на релятивистские 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

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

Сводные оценки смещений шкал времени UTC(SU) и UTC(PTB), выполненные по результатам калибровки, представлены в табл. 4.

Таблица 4

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

	UTC(PTB) – UTC(SU), нс		
	Перевозимая станция SU02	ПКП TTS-3	ПКЧ Ч1-76А
MJD 56231,50		13,5	
MJD 56232,44	12,7	12,9	12,9
MJD 56233,43	13,0	12,4	14,1
uA	0,3	1,4	0,1
uB	1,0	3,0	3,0
u	1,1	3,3	3,0

Результаты оценок смещений шкал времени UTC(SU) и UTC(PTB), полученные тремя независимыми методами, согласуются в пределах соответствующих неопределенностей результатов измерений. Очевидно, что уровень согласования результатов независимых измерений характеризует достоверность резуль-

татов калибровки канала TWSTFT между средствами PTB и ФГУП «ВНИИФТРИ».

Таким образом, экспериментальным методом была получена калибровочная поправка CALR на задержку станции SU01 относительно станции PTB03, значение которой составило 764,0 нс с неопределенно-



стью измерений и 1,1 нс. Этот результат был официально зафиксирован в ВРМ с присвоением для стан-

ции SU01 идентификатора калибровки CI 281 от 23 мая 2013 года.

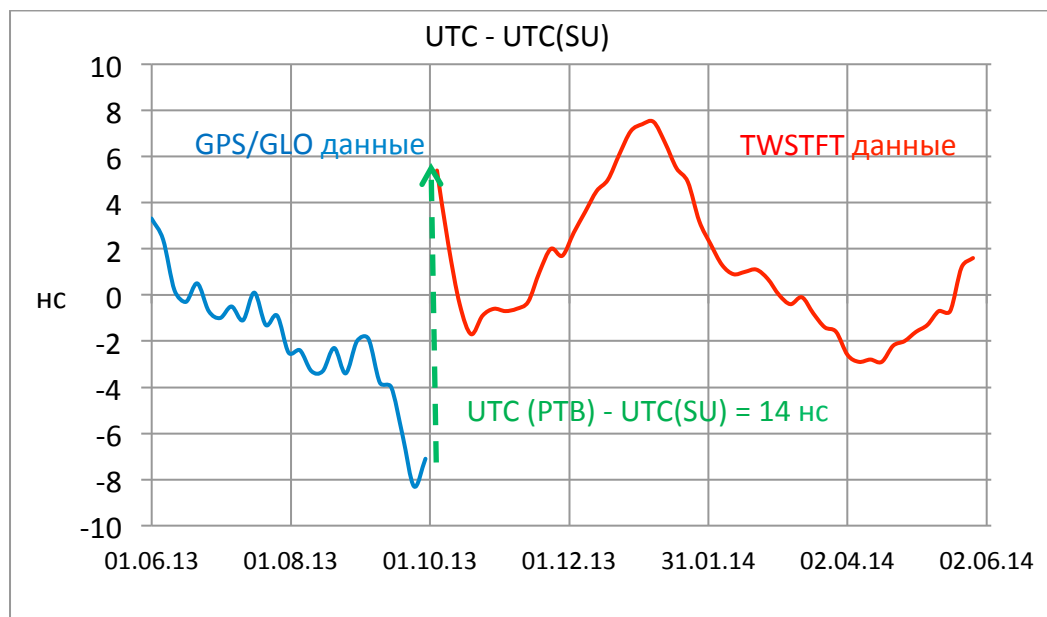


Рис. 8. Переход ВРМ к расчету UTC - UTC(SU) от данных GPS/ГЛОНАСС к данным TWSTFT

Начиная с октября 2013 года для вычислений величины UTC - UTC(SU) по результатам взаимных сравнений шкал времени UTC(SU) и UTC(РТВ) ВРМ перешел от данных GPS/ГЛОНАСС к данным TWSTFT (рис. 8). При этом ВРМ скорректировал текущие значения величины UTC(РТВ) - UTC(SU) на 14 нс для приведения его в соответствие с полученными результатами калибровки. Переход ВРМ от данных GPS/ГЛОНАСС к данным TWSTFT обеспечил существенное повышение точности национальной реализации Международной шкалы координированного времени.

### Заключение

Калибровка канала дуплексных сравнений шкал времени TWSTFT между ФГУП «ВНИИФТРИ» и РТВ на основе результатов сравнений шкал времени UTC(SU) и UTC(РТВ) с помощью перевозимого комплекта аппаратуры TWSTFT, перевозимого калибровочного приемника GNSS и перевозимых квантовых часов была успешно выполнена. Калибровка позволила реализовать потенциально возможную точность сравнений шкалы времени UTC(SU) со шкалой времени UTC(РТВ) и обеспечить

требуемый уровень характеристик формирования UTC(SU).

### Литература

1. Смирнов Ю.Ф., Норец И.Б., Наумов А.В. Реализация метода TWSTFT в Главном метрологическом центре Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли // Труды ИПА РАН. - СПб.: Наука, 2012. - вып. 23, с. 389 – 391.

2. Recommendation ITU TF.1153-3. The operational use of two-way satellite time and frequency transfer employing pseudorandom noise codes.

3. Levandowski W. Rapport BIPM-2010/01 Relative characterization of GNSS receiver delays for GPS and GLONASS C/A codes in the L1 frequency band at the OP, SU, PTB and AOS.

4. Гайгеров Б.А., Сысоев В.П. // Измерительная техника, 2012, №2 с. 25.