

На правах рукописи

Федорова Дарья Михайловна

РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ
ЭТАЛОННЫХ СИГНАЛОВ ЧАСТОТЫ С ЭЛЕКТРОННОЙ
КОМПЕНСАЦИЕЙ ВОЗМУЩЕНИЙ, ВНОСИМЫХ ВОЛОКОННОЙ
ЛИНИЕЙ, ДЛЯ СЛИЧЕНИЙ ТЕРРИТОРИАЛЬНО УДАЛЕННЫХ
ЭТАЛОНОВ

05.11.15 – Метрология и метрологическое обеспечение

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Менделеево - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»).

Научный руководитель: Малимон Александр Никифорович
кандидат технических наук, начальник отдела комплексов средств передачи ЭСВЧ по ВОЛС ФГУП «ВНИИФТРИ»

Официальные оппоненты: Крутиков Владимир Николаевич
доктор технических наук, руководитель Центра коллективного пользования высокоточными измерительными технологиями в области фотоники (ЦКП «ВНИИОФИ»), главный научный сотрудник ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» (ФГУП «ВНИИОФИ»).

Рыжков Анатолий Васильевич
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник научно-исследовательской части Московского технического университета связи и информатики (НИЧ «МТУСИ»).

Ведущая организация: Акционерное Общество «Российский институт радионавигации и времени» (АО «РИРВ»), Санкт-Петербург.

Защита состоится «30» июня 2020 г.
на заседании Диссертационного совета Д 308.005.01 в ФГУП «ВНИИФТРИ»,
141570, Московская обл., Солнечногорский район, п/о Менделеево,
тел. 8(495) 744-81-12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГУП «ВНИИФТРИ» <http://www.vniiftri.ru/ru/dissertatsionnyj-sovet>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2020 г.

Учёный секретарь Диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

М.В. Балаханов

Актуальность темы диссертации

Нестабильность частоты современных микроволновых стандартов на суточном интервале времени измерения составляет $\sim 3 \cdot 10^{-16}$, а у лучших оптических стандартов приближается к уровню $1 \cdot 10^{-18}$, например, у таких, как оптический криогенный стандарт частоты на охлажденных атомах стронция. В настоящее время Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1–2018 оснащён двумя метрологическими цезиевыми реперами частоты фонтанного типа. Первичный эталон воспроизводит единицы времени и частоты с неисключённой систематической погрешностью (НСП) не более $5 \cdot 10^{-16}$. В состав ГЭТ 1–2018, а также вторичных и рабочих эталонов входят водородные хранители (ВХ) – хранители частоты и времени на основе водородных мазеров, нестабильность частоты которых на суточном интервале времени измерения составляет $3 \cdot 10^{-16}$.

В настоящее время основные технологии сравнения шкал времени (ШВ) эталонов, рекомендованные Международным бюро мер и весов, основаны на использовании специализированных приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем или дуплексного метода передачи сигналов через геостационарный спутник (Two Way Satellite Time and Frequency Transfer – TWSTFT). Кроме неоспоримых преимуществ спутниковые методы имеют ряд существенных недостатков, основным из которых является то, что дальнейшее совершенствование этих методов очень дорогостоящий процесс. Минимальная достижимая погрешность спутниковых методов сравнения ШВ составляет порядка 1 нс, а погрешность сравнения частот двух территориально – разнесённых эталонов на интервале времени измерения в несколько суток – не ниже уровня $1 \cdot 10^{-15}$ (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительный анализ характеристик стандартов частоты и методов сличения частот территориально удаленных микроволновых стандартов

Тип стандарта частоты	Нестабильность частоты $\sigma_y(\tau)$, ($\tau_{\text{изм}} = 1 \text{сут}$)	Требуемая точность при выполнении сличений стандартов частоты	Метод сравнений частот	
			Наименование метода	Погрешность, вносимая системой передачи размера единицы
Рубидиевый	$1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-13}$	GNSS C/A	$1 \cdot 10^{-14}$
Цезиевый	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-14}$	GNSS C/A	$1 \cdot 10^{-14}$
Водородный пассивный	$1 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-15}$	GNSS PPP	$1 \cdot 10^{-15}$
Водородный активный	$1 \cdot 10^{-15}$	$3 \cdot 10^{-16}$	GNSS PPP	$1 \cdot 10^{-15}$
			По ВОЛС длиной 3 км без компенсации	$1 \cdot 10^{-15}$
Водородный активный нового поколения	$3 \cdot 10^{-16}$	$1 \cdot 10^{-16}$	По ВОЛС с компенсацией	Метод передачи по ВОЛС с компенсацией может обеспечить $< 1 \cdot 10^{-16}$
Рубидиевый на холодных атомах	$2 \cdot 10^{-16}$	$1 \cdot 10^{-16}$	По ВОЛС с компенсацией	

GNSS C/A – режим модуляции несущей частоты по кодовым сигналам КНС;

GNSS PPP – принцип работы основан на разности фаз несущих частот L1 и L2 КНС.

Из таблицы 1 можно сделать вывод о том, что в настоящее время неопределенность измерений при сличениях территориально удаленных эталонов спутниковыми методами определяется не характеристиками применяемых в них квантовых стандартов частоты, а свойствами спутниковых СВЧ каналов связи и устанавливаемой на его концах аппаратуры, обеспечивающей передачу эталонных сигналов частоты и времени (ЭСЧВ).

Поэтому крайне важны исследования и внедрение новых методов передачи ЭСЧВ, использующих иные каналы связи.

Перспективным направлением для целей передачи ЭСЧВ является использование волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). На 20-ом заседании Консультативного Комитета по времени и частоте (ССТФ), которое проходило 17-18 сентября 2015 г. в Севре, была сформулирована рекомендация номер 6 о «Разработке национальных и международных каналов сличений для совершенствования межконтинентальных методов сравнения часов и распространении сигналов времени и частоты заинтересованным сторонам». Так как сличения на больших расстояниях с использованием волоконных каналов продемонстрировали точность, которая сопоставима с точностью лучших существующих и будущих оптических стандартов, то ССТФ рекомендовал поддерживать исследования и разработки методов сравнения времени и частоты по волоконно-оптическим линиям для достижения уровня точности аналогичного уровню, демонстрируемому самыми передовыми стандартами частоты.

Необходимо отметить, что без использования устройств компенсации возмущений, вносимых волоконно-оптическим каналом, эталонный сигнал частоты (ЭСЧ) можно передать по нему на расстояние до 1 км с СКДО $\sim 5 \cdot 10^{-16}$, а на 100 км с СКДО $\sim 5 \cdot 10^{-14}$ на интервале времени измерения 10^5 с. Следовательно, не применяя специально разработанные пассивные и активные методы и устройства компенсации, нельзя передать по ВОЛС без потери точности сигнал современного микроволнового стандарта частоты даже на расстояние в несколько сотен метров. Поэтому актуальной задачей является создание систем передачи эталонных радиочастотных сигналов, вклад которых в суммарную стандартную неопределенность измерений при сличениях частот территориально удаленных эталонов не превышает $1 \cdot 10^{-16}$.

Таким образом, *возникает противоречие* между имеющимися в настоящее время характеристиками ВХ и техническими характеристиками каналов на основе волоконно-оптических линий, посредством которых предлагается производить сравнение этих эталонов. Для разрешения сложившегося противоречия требуется разработка систем передачи ЭСЧ по ВОЛС, которые обеспечат компенсацию вносимых линией возмущений фазы передаваемого эталонного сигнала. Последние два десятилетия в метрологических центрах мира и в лабораториях лазерной физики проводятся исследования в этом направлении и выполняются эксперименты, которые подтверждают, что, используя системы пассивной и активной компенсации возмущений, вносимых линией, возможно передать по ВОЛС эталонные сигналы без потери их высокой точности на расстояние до нескольких сотен километров.

Исследования по созданию систем передачи ЭСЧВ по ВОЛС ведутся в разных направлениях (см. рис. 1), и это связано с двумя обстоятельствами. Принципы построения систем передачи и применяемые методы компенсации, во-первых, зависят от того, в каком диапазоне частот находится передаваемый сигнал, а также определяются расстоянием, на которое его необходимо доставить. Это также связано с тем, что возмущающие передаваемый сигнал физические факторы волокна по-разному проявляют себя при распространении в волоконной линии сигналов радио, СВЧ и оптического диапазонов. Поэтому нельзя создать универсальную систему, которая бы одновременно осуществляла высокоточную передачу по ВОЛС сигналов, несущих информацию о эталонной частоте в очень широком диапазоне частот. Специфика разрабатываемых систем передачи ЭСЧ по ВОЛС должна учитывать, как значение передаваемой частоты, так и расстояние, на которое ее необходимо доставить. И кроме того, свои особенности имеют системы передачи сигналов эталонного времени по ВОЛС.



Рис. 1. Структура направлений исследований по проблеме передачи эталонных сигналов частоты по ВОЛС. Цветом выделены те методы, которые разрабатывал и исследовал соискатель

В таблице 2 представлены результаты экспериментов метрологических центров по передаче эталонных частот по ВОЛС с активными системами компенсации. Из множества опубликованных и проанализированных работ в таблице представлены только те, в которых передавались радиочастотные сигналы по ВОЛС длиной в пределах от нескольких десятков до сотен километров, и погрешность, вносимая системой передачи, была меньше $1 \cdot 10^{-16}$ на суточном интервале времени измерения.

Результаты экспериментов лабораторий различных стран показывают, что систему передачи ЭСЧВ по ВОЛС с наибольшей длиной линии испытали в Польше (Central Office of Measures, Time and Frequency Laboratory). Достижение этой лаборатории связано, в первую очередь, с тем, что она разработала и выпустила единичной серией специальную микросхему, содержащую две комплементарные аналоговые управляемые электронные линии задержки (ЭЛЗ) и реализовала на ее основе систему передачи ЭСЧВ с активной симметричной компенсацией возмущений, вносимых ВОЛС. Данная система передачи не лишена недостатков. Применяемые в ней управляемые ЭЛЗ значительно увеличивают джиттер переданного сигнала, следовательно,

требуется разработка для такой системы специальных устройств, уменьшающих джиттер переданного сигнала.

Таблица 2 - Анализ систем компенсации, разработанных в различных лабораториях

Лаборатория	LPL, LNE-SYRTE, Франция	JPL, США	LPL, LNE-SYRTE, Франция	Central Office of Measures Польша
Метод активной компенсации	Опто-электронная		Электронная асимметричная	Электронная симметричная
Корректирующее фазу ЭСЧ устройство	Управляемая оптическая линии задержки (ОЛЗ)	Две управляемых ОЛЗ	Управляемый по частоте кварцевый генератор в качестве фазовращателя	Специально разработанный микрочип управляемой электронной линии задержки
Передаваемая частота	1 ГГц	1 ГГц (100 МГц)	100 МГц	10 МГц
СКДО, $\tau = 1 \cdot 10^5$ с	$5 \cdot 10^{-18}$	$5 \cdot 10^{-18}$ ($3 \cdot 10^{-17}$)	$3 \cdot 10^{-17}$	$3 \cdot 10^{-17}$
Длина ВОЛС, с которой реализована передача	86 км	16 км	86 км	100 км (макс. 420 км)
Достоинства метода активной компенсации	При передаче 100 МГц по 100 км линии СКДО $4 \cdot 10^{-17}$ при $\tau = 10^5$ с (результат ВНИИФТРИ)	Позволяет передать ЭСЧ на расстояние более 86 км		
		Неограниченный диапазон коррекции фазы ЭСЧ с большим быстродействием		
Недостатки метода активной компенсации	Диапазон регулировки фазы ЭСЧ ограничен ОЛЗ. Компенсация с малым быстродействием ~ 1 Гц	Требует фильтрации быстрых возмущений фазы сигнала, проделавшего путь «туда и обратно».		Значительно возрастает джиттер переданного ЭСЧ. Требуется разработка специальных систем уменьшения джиттера переданного ЭСЧ.
Объем выполненных исследований	Эксперименты с линиями длиной более 86 км не проводились			

Анализ результатов экспериментов, проведенных в лабораториях, показал, что оптимальное решение поставленной в диссертационной работе задачи сличения по ВОЛС частот водородных хранителей трех эталонов, расположенных в Московском регионе на расстоянии до 200 км, - Государственного первичного эталона времени и частоты ГЭТ 1-2018, Центрального синхронизатора (ЦС) ГЛОНАСС и Вторичного эталона (ВЭ), с неопределенностью измерений, вносимой системой передачи, не более $1 \cdot 10^{-16}$ можно обеспечить при использовании метода передачи ЭСЧ по ВОЛС с активной электронной асимметричной компенсацией.

Цель работы

Совершенствование технических средств Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли Российской Федерации.

Объект исследования

Системы передачи радиочастотных эталонных сигналов по волоконно-оптическим линиям, которые могут обеспечить проведение высокоточных сличений территориально удаленных друг от друга эталонов.

Предмет исследования

Метод передачи эталонного сигнала, несущего информацию о частоте первичного эталона ГЭТ 1-2018 по волоконно-оптическим линиям длиной до 200 км, использующий активную электронную компенсацию возмущений, вносимых линией.

Разработке и исследованию по передаче эталонных радиочастот по волоконной линии посвящены труды В.Г. Пальчикова, А.Н. Малимона, С.Н. Слюсарева. За рубежом данным вопросом занимались М. Kalhoun, Ł. 'Sliwaczy'nski, D.R. Gozzard, G. Santarelli.

Передачей сигналов времени и сравнения ШВ эталонов занимались А.В. Иванов, А.В. Рыжков, О.В. Колмогоров, M. Rost, D. Piester, W. Yang, S.Ch. Ebenhag.

Однако в проведенных до настоящего исследованиях не изучен вопрос и не исследовались системы передачи эталонных сигналов частоты по ВОЛС с асимметричной схемой активной электронной компенсации с линиями длиной более 86 км.

Основная научная задача

Разработка и исследование систем передачи эталонных радиочастотных сигналов на оптической несущей по волоконным линиям длиной до 200 км с активной электронной компенсацией. Вклад таких систем в суммарную стандартную неопределенность измерений при сличениях частот территориально удаленных эталонов не должен превышать $1 \cdot 10^{-16}$.

Частные научные задачи

1. Разработать и исследовать системы передачи ЭСЧ по ВОЛС длиной от 100 км до 200 км с активной асимметричной электронной компенсацией.
2. Разработать модель оценки суммарной стандартной неопределенности измерений при передаче с компенсацией по ВОЛС размера единицы частоты от ГЭТ 1-2018 к вторичному эталону.
3. Сформулировать критерии, определяющие требования к постоянству поддержания температуры в местах размещения оптоэлектронной аппаратуры на концах волоконной линии.
4. Провести циклы измерений погрешностей передачи ЭСЧ по волоконным линиям различной длины 1, 100, 147, 200 км.
5. Разработать систему передачи ЭСЧ, обеспечивающую сличения частот территориально удаленных эталонов по волоконным линиям длиной до 400 км.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Метод передачи ЭСЧ по ВОЛС, использующий асимметричную электронную компенсацию, обеспечивает передачу по линиям длиной до 100 км частоты 100 МГц сигнала водородного хранителя первичного эталона ГЭТ 1-2018 с неопределенностью измерений, вносимой системой передачи размера единицы частоты, не превышающей $1 \cdot 10^{-16}$.
2. Выполнение технического требования по термостабилизации электронной аппаратуры на концах линии в пределах $\pm 0,2$ °С обеспечивает передачу на расстояние до 100 км частоты 100 МГц сигнала водородного хранителя первичного эталона ГЭТ 1-2018 с неопределенностью измерений, вносимой системой передачи ЭСЧ по ВОЛС, не превышающей $4 \cdot 10^{-17}$.
3. Система асимметричной электронной компенсации при использовании одного промежуточного двунаправленного оптического усилителя обеспечивает передачу по 200 км линии сигнала 100 МГц водородного хранителя первичного эталона ГЭТ 1-2018 с неопределенностью измерений, вносимой системой передачи ЭСЧ по ВОЛС, не превышающей $9 \cdot 10^{-17}$.

Научная новизна

1. Впервые разработана система передачи ЭСЧ по ВОЛС с асимметричной электронной компенсацией, обеспечиваемой двумя петлями ФАПЧ. Одна из петель фильтрует шумы сигнала, проделавшего путь по линии туда и обратно, а вторая осуществляет компенсационную коррекцию фазы передаваемого эталонного сигнала.
2. Впервые реализована и исследована система передачи ЭСЧ по ВОЛС по схеме асимметричной компенсации, обеспечивающая передачу сигнала 100 МГц водородного хранителя первичного эталона ГЭТ 1-2018 на расстояние 200 км с неопределенностью $u_{с\text{сп}}$, вносимой системой передачи размера единицы частоты, не превышающей $1 \cdot 10^{-16}$.

3. Впервые разработана система передачи ЭСЧ по ВОЛС на 400 км с асимметричной электронной компенсацией, в которой используются только лишь два оптических двунаправленных усилителя. (Обычно при такой длине линии применяют от 4 до 6 оптических усилителей).

4. Получена оценка вклада системы передачи ЭСЧ по ВОЛС, построенной на основе асимметричной электронной компенсации, в суммарную стандартную неопределенность воспроизведения размера единицы частоты вторичным эталоном. Экспериментально подтверждено, что вклад системы передачи $\alpha_{\text{с сп}}$ при использовании волоконных линий длиной до 400 км не превышает $3 \cdot 10^{-16}$.

Практическая значимость

Разработанная система передачи эталонных радиочастотных сигналов на оптической несущей по волоконным линиям длиной до 200 км с активной электронной компенсацией обеспечивает вклад в суммарную стандартную неопределенность измерений при сличениях частот территориально удаленных эталонов не более $1 \cdot 10^{-16}$. Результаты выполненных исследований использовались при создании системы передачи ЭСЧ на территории НПО ВНИИФТРИ для сличений, входящих в состав ГЭТ 1-2018 водородных хранителей и стандартов частоты.

Личный вклад автора

Все экспериментальные и теоретические результаты, представленные в настоящей работе, получены автором лично. Автор принимал активное участие в разработке системы передачи ЭСЧ по ВОЛС с асимметричной электронной компенсацией, обеспечиваемой двумя петлями ФАПЧ, результаты исследования которой представлены в работе. Автором реализована и исследована система передачи ЭСЧ по ВОЛС по схеме асимметричной компенсации, обеспечивающая передачу сигнала 100 МГц ВХ

на расстояние от 100 до 200 км. Автором разработана система передачи ЭСЧ по ВОЛС на 400 км с асимметричной электронной компенсацией, в которой используются только лишь два оптических двунаправленных усилителя.

Степень достоверности результатов работы

Результаты исследований подтверждаются достоверными экспериментальными методиками, выполненными на основе калиброванного и сертифицированного измерительного оборудования, а также современных прецизионных приборов. Кроме того, большинство полученных экспериментальных результатов находятся в согласии с предварительно проведенными теоретическими исследованиями.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на Международных симпозиумах «Метрология времени и пространства» (2012 г. Менделеево, 2014 г. Суздаль, 2018 г. Менделеево), на Международных конференциях "Лазерные, плазменные исследования и технологии" ЛаПлаз (2013, 2014, 2015, 2018, 2019, г. Москва), на IX Всероссийской научно-технической конференции (2018 г. Москва), VIII International Symposium MPLP-2018 (2018, г. Новосибирск), а также на научно-практических конференциях молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке» (2013, 2014, 2015, 2018, 2019, п. Менделеево). Материалы диссертации были представлены на соискание премии им. С.А. Христиановича по направлению «Исследование параметров времени и частоты», проводимой среди молодых ученых ФГУП «ВНИИФТРИ» в 2015 году.

Основные положения работы отражены в журнале «Измерительная техника», сборниках трудов: «Метрология времени и пространства», «Лазерные, плазменные исследования и технологии», «Modern problems of

laser physics». Результаты диссертационного исследования содержатся в 9 публикациях, среди них 4 публикации входят в список реферируемых журналов, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы из 69 наименований. Общий объем диссертации составляет 144 страницы, включая список цитированной литературы. Диссертация содержит 54 рисунка и 8 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, указаны цели и задачи исследования, сформулированы выносимые на защиту основные положения, обозначена практическая значимость и личный вклад автора, приведен краткий анализ применения волоконно-оптических линий для целей передачи эталонных радиочастотных сигналов с использованием устройств компенсации возмущений, вносимых системой передачи.

В главе 1 последовательно излагаются и исследуются способы решения задачи передачи эталонного сигнала частоты наземными и спутниковыми методами. Это теоретическое исследование является принципиально важным в вопросе решения задачи создания системы передачи эталонных радиочастотных сигналов на оптической несущей по волоконным линиям длиной до 200 км с вкладом в суммарную стандартную неопределенность измерений при сличениях частот территориально удаленных эталонов не более $1 \cdot 10^{-16}$.

В разделе 1.2 отмечено, что действие целого ряда физических факторов, влияющих на оптическое волокно, возмущают фазу передаваемого эталонного радиочастотного сигнала, что приводит к ухудшению его метрологических характеристик, так что на конце линии нестабильность его частоты может увеличиться на несколько порядков. В разделе сделан вывод о том, что

вариации задержки сигнала из-за изменений температуры волоконной линии, характеризуемые коэффициентом $\alpha_{\text{ТКЗ}} = 38 \text{ пс} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, и температурный фактор, действие которого приводит к вариациям задержки сигнала при изменении температуры окружающей среды в местах размещения электронно-оптической аппаратуры, вносят доминирующий вклад в дополнительную нестабильность переданных сигналов времени и частоты по волоконным линиям.

В разделе 1.3 описана схема передачи ЭСЧ в коротких линиях без устройств компенсации. Обоснована необходимость использования активных устройств компенсации возмущений, вносимых ВОЛС, при передаче ЭСЧ в длинных линиях.

Для передачи по каналу ВОЛС сигнала микроволнового стандарта используют в качестве переносчика информации об его частоте оптическую несущую, которая модулируется по амплитуде передаваемым радиочастотным сигналом. При этом частота модулирующего радиочастотного сигнала синтезируется на основе микроволнового эталонного источника, а оптическое излучение служит для него просто несущей (рис. 2).

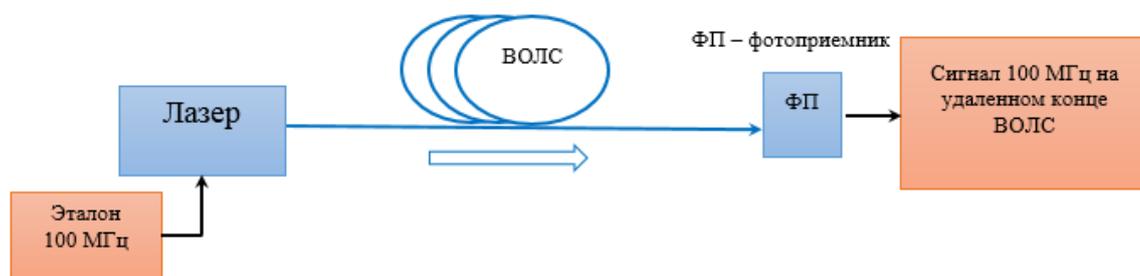


Рис. 2. Схема передачи эталонного радиочастотного эталонного сигнала без использования устройств компенсации

Вклад системы передачи в СКДО радиочастотного сигнала, переданного без устройств компенсации на конец волоконной линии, можно теоретически оценить, используя формулу:

$$\sigma_y(\tau) = \alpha_{\text{ТКЗ}} \frac{LdT}{\tau} \sin^2\left(\frac{\pi\tau}{T_p}\right),$$

где $\alpha_{\text{ТКЗ}} = 38 \text{ пс} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ – температурный коэффициент задержки сигнала в волокне, L – длина волоконной линии, T_p – период температурной волны, dT – изменение температуры окружающей среды, τ – время усреднения в секундах.

Анализ метеорологических данных в Московском регионе, где будет располагаться разрабатываемая система передачи ЭСЧ по ВОЛС, говорит о том, что перепады температуры воздуха составляют в сутки до $10 \text{ }^\circ\text{C}$, а в течение года $\sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$. Но при размещении оптического кабеля под землей на глубине 1 метра диапазон изменений его температуры уменьшается. При передаче радиочастотного эталонного сигнала по подземному оптическому кабелю длиной $\sim 1 \text{ км}$ вклад системы передачи, не имеющей устройства компенсации, в СКДО принимаемого на выходе из кабеля сигнала будет на уровне $\sim 10^{-15}$ на суточном интервале времени измерения. Для волоконной 100 км линии при изменениях ее температуры в течение суток на 1 – 3 градуса СКДО переданного сигнала будет на уровне $\sim 10^{-13}$ на суточном интервале времени измерения.

Результаты проведенных в главе 1 расчетов наглядно демонстрируют, что для проведения сличений эталонов, расположенных в Московском регионе, необходимо разрабатывать систему передачи эталонных радиочастотных сигналов с активной компенсацией возмущений, вносимых ВОЛС.

В главе 2 описаны методы компенсации вносимых каналом ВОЛС возмущений фазы передаваемого эталонного сигнала. При анализе существующие методы компенсации были разделены на активные и пассивные.

В разделе 2.1 описаны методы пассивной компенсации и область их применения при передаче эталонных радиочастотных сигналов по ВОЛС.

В разделах 2.2 и 2.3 рассматриваются принципы активной компенсации возмущений, вносимых ВОЛС, которые подразделяются на электронные и оптоэлектронные. Проанализированы результаты, полученные в различных лабораториях, и сделан вывод о том, что системы передачи ЭСЧ по ВОЛС с устройствами компенсации фазовых шумов, вносимых оптическим каналом, могут обеспечить передачу эталонных радиочастот на расстояние десятки и сотни километров практически без внесения дополнительной неопределенности.

В разделе 2.4 описана сущность метода активной симметричной и асимметричной электронной компенсации возмущений, вносимых линией при передаче ЭСЧ по ВОЛС.

Обоснован выбор решения задачи сличения по ВОЛС частот водородных хранителей трех эталонов, расположенных в Московском регионе на расстоянии до 200 км, с неопределенностью измерений, вносимой системой передачи, не более $1 \cdot 10^{-16}$. Была выбрана система передачи ЭСЧ по ВОЛС с активной электронной асимметричной компенсацией.

В разделе 2.5 представлены уравнения, поясняющие принцип работы схемы с электронной компенсацией.

В разделе 2.6 дано описание системы передачи ЭСЧ по ВОЛС с асимметричной электронной компенсацией (рис. 3).

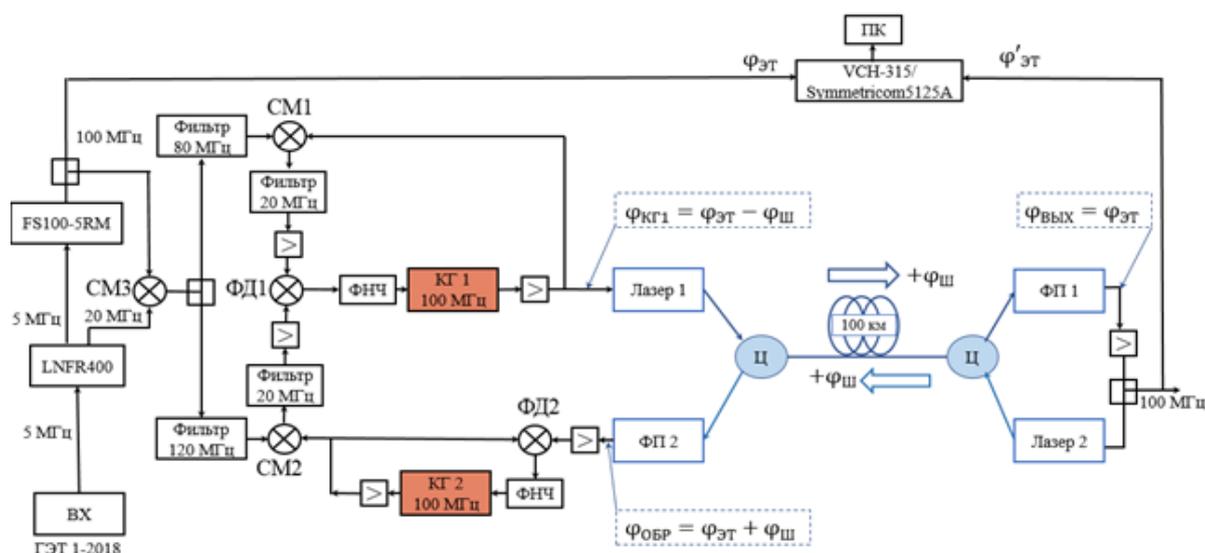


Рис. 3. Схема передачи 100 МГц ЭСЧ по 100 км ВОЛС с асимметричной электронной компенсацией Лазер 1-2 – лазеры; ФП1-ФП2 – фотоприемники; Ц – оптические циркуляторы; СМ1-СМ3 – смесители; ФД – фазовый детектор; ФНЧ – фильтр нижних частот; КГ1-КГ2 – кварцевые генераторы; ПК – персональный компьютер; LNFR-400 – малошумящий генератор; FS100RM-5 – умножитель частоты; 5125A – измеритель нестабильности частоты Microsemi; VCH-315 – компаратор

В разделе 2.7 представлена разработанная согласно ГОСТ 8.381-2009 модель для расчёта вклада системы передачи по ВОЛС в суммарную неопределенность измерений при передаче размера единицы частоты. Суммарная стандартная неопределенность воспроизведения единицы частоты $u_{СЭ2}$ вторичного эталона, сличаемого с первичным:

$$u_{СЭ2} = \sqrt{u_{СЭ1}^2 + u_{АЭ2}^2 + u_{ССП}^2},$$

где $u_{СЭ1}$ – стандартная суммарная неопределенность первичного эталона, $u_{АЭ2}$ – стандартная неопределенность по типу А вторичного эталона, $u_{ССП}$ – суммарная стандартная неопределенность системы передачи по ВОЛС размера единицы частоты:

$$u_{ССП} = \sqrt{u_{А}^2 + u_{В1}^2 + u_{В2}^2},$$

где $u_{А}$ – стандартная неопределенность типа А (случайная), статистически определяемая в процессе измерений частоты переданного сигнала компаратором, $u_{В1}$ – стандартная неопределенность по типу В, определяемая

расчетом, учитывающим характеристики средства измерений - компаратора и температурные условия проведения измерений, $u_{B1} = 2 \cdot 10^{-17}$, u_{B2} – стандартная неопределенность по типу В, определяемая учетом температурных характеристик аппаратуры системы передачи установленной на концах линии.

Проведение исследований в лабораторных условиях позволило провести их по схеме на рис. 4. Так как начало и конец линии находятся в одном помещении, то измерения по такой схеме исключают влияние дрейфа частоты ВХ, что позволяет более точно определить $u_{C\text{ сп}}$.

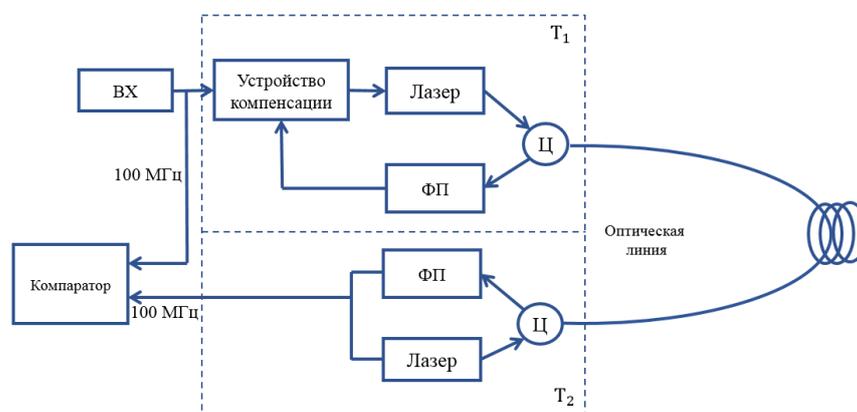
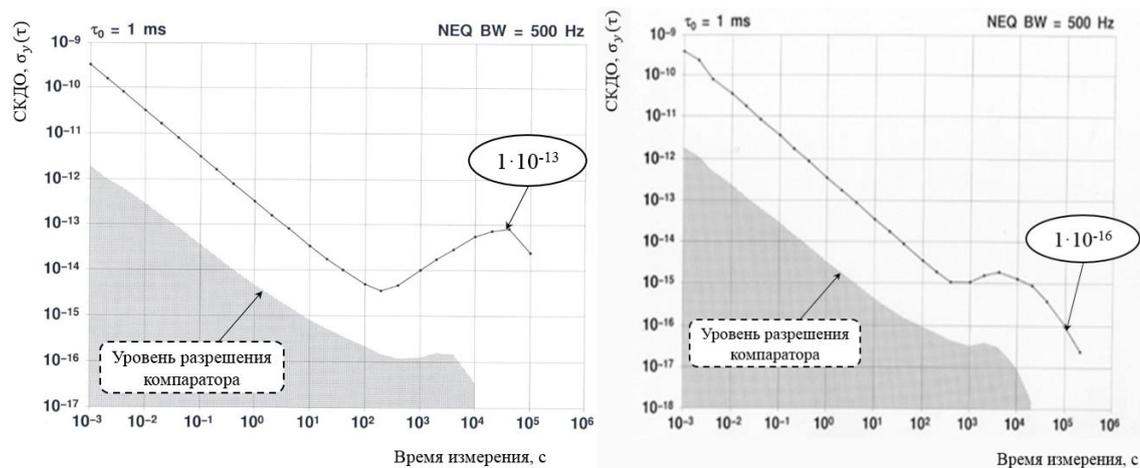


Рис. 4. Схема измерений СКДО сигнала, принимаемого на конце волоконно-оптической линии, относительно эталонного сигнала ВХ, который подается на вход системы передачи

Измерения, проведенные в процессе испытаний, показали (см. рис. 5), что при включении электронной компенсации система передачи ЭСЧ по 100 км ВОЛС вносит дополнительную неопределенность в результат измерения частоты, которая не превышает $1 \cdot 10^{-16}$. Испытания позволили сделать вывод о том, что точность компенсации может быть улучшена в несколько раз, если будет стабилизирована температура на концах ВОЛС в местах размещения узлов и электронной аппаратуры, входящей в систему передачи ЭСЧ.



Система компенсации выключена

Система компенсации включена

Рис. 5 СКДО сигнала, принимаемого на конце 100 км волоконно-оптической линии, относительно эталонного сигнала ВХ, который подавался на вход системы передачи

В главе 3 описаны эксперименты по передаче ЭСЧ при поддержании постоянства температуры в местах размещения аппаратуры, входящей в систему передачи.

Применение систем компенсации возмущений, вносимых волоконной линией, может быть нецелесообразным, если линия коротка и аппаратура на концах линии не находится в термостабилизированных помещениях, так как вариация задержки эталонного сигнала будет определяться не температурой линии, а этой аппаратурой.

Время задержки сигнала в любом электронном или оптоэлектронном устройстве зависит от температуры. Температурный коэффициент времени задержки в таких устройствах может иметь разный знак и типичную величину в пределах от $3 \text{ пс} \cdot \text{°C}^{-1}$ до $30 \text{ пс} \cdot \text{°C}^{-1}$. Так, например, высокостабильные буферные усилители эталонных сигналов 100 МГц с единичным коэффициентом усиления, специально сконструированные для метрологических целей, имеют температурный коэффициент в пределах от 3 до $10 \text{ пс} \cdot \text{°C}^{-1}$. Более сложные электронные устройства могут иметь температурный коэффициент $\sim 30 \text{ пс} \cdot \text{°C}^{-1}$. Изменение температуры в местах

расположения аппаратуры на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ оказывает влияние на фазу передаваемого сигнала такое же, как изменение на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ температуры 1 км волокна. Поэтому в диссертации были разработаны требования к условиям термостабилизации электронной аппаратуры в пределах $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, выполнение которых обеспечивает передачу на расстояние до 100 км сигнала 100 МГц водородного хранителя первичного эталона ГЭТ 1-2018 с неопределенностью измерений, вносимой системой передачи ЭСЧ по ВОЛС, не превышающей $4 \cdot 10^{-17}$. Согласно разработанным требованиям проведен эксперимент по схеме на рис. 6, в котором для поддержания температуры в указанных пределах аппаратура была помещена в камеру постоянных климатических условий Binder KBF-720.

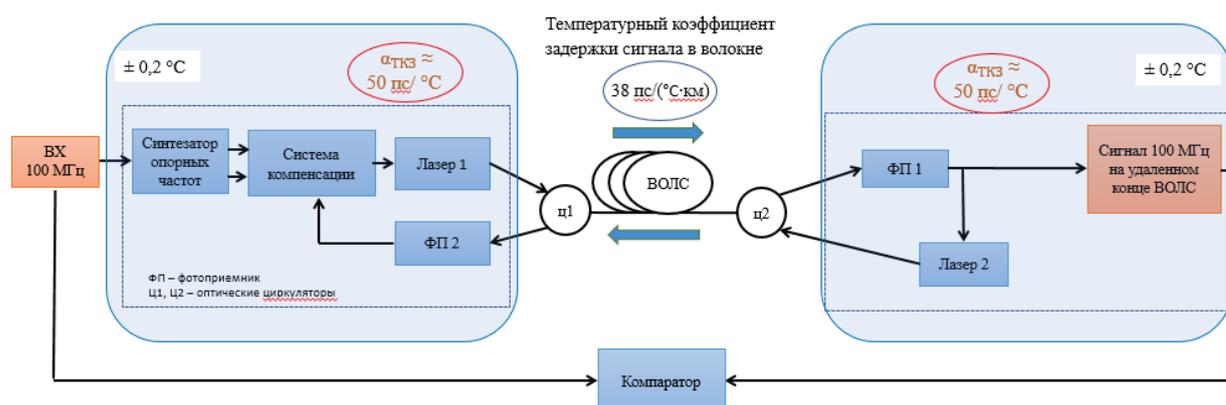
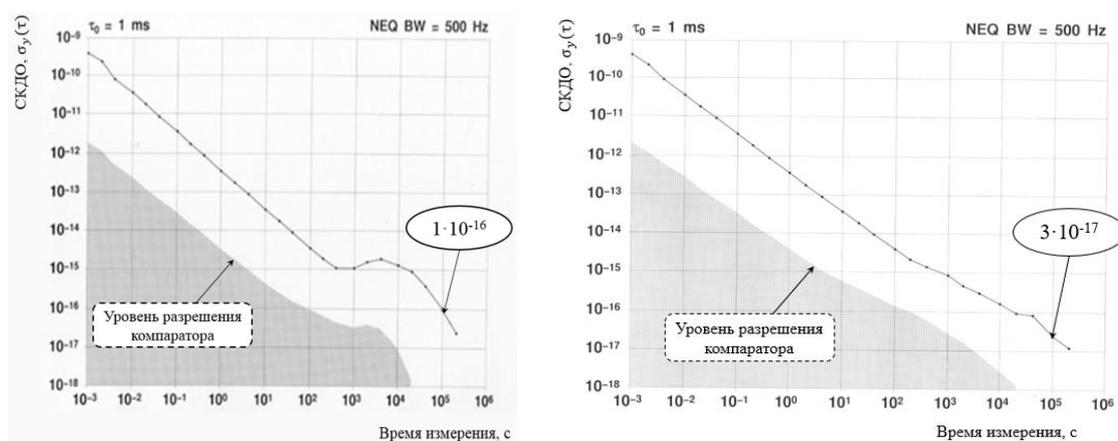


Рис. 6. Схема измерений при передаче эталонного радиочастотного сигнала с электронной компенсацией, когда аппаратура на концах линии помещена в термокамеру

Результаты проведенных испытаний системы передачи ЭСЧ по ВОЛС длиной 100 км с электронной аппаратурой, помещенной в климатическую камеру, показали уменьшение СКДО на интервалах времени измерения от 103 до 105 с на порядок величины, что является существенным улучшением результатов (см. рис 7).



Без термостатирования аппаратуры С термостатированием аппаратуры

Рис. 7. СКДО сигнала, принимаемого на конце 100 км волоконно-оптической линии, относительно эталонного сигнала ВХ, который подавался на вход системы передачи

Глава 4 посвящена системе передачи ЭСЧ по ВОЛС с асимметричной электронной системой компенсации по линиям длиной более 100 км с использованием оптического двунаправленного EDFA усилителя.

В разделе 4.1 описана реализация метода электронной компенсации при передаче ЭСЧ по ВОЛС длиной 200 км при использовании одного оптического двунаправленного EDFA - усилителя. Переход к передаче ЭСЧ в более длинных оптических линиях требует усиления оптической несущей, а потому необходимо вводить в систему передачи специальные промежуточные двунаправленные EDFA усилители. Следует отметить, что при введении в систему передачи оптических усилителей повысится уровень шумов эталонных сигналов, получаемых на конце линии. Поэтому экспериментальная реализация передачи ЭСЧ в более длинных линиях с промежуточными двунаправленными оптическими усилителями не является тривиальной задачей. После проведения доработки системы передачи ЭСЧ по ВОЛС для линии длиной 200 км были проведены испытания, в результате которых СКДО составляет $8 \cdot 10^{-17}$ (см. рис.8).

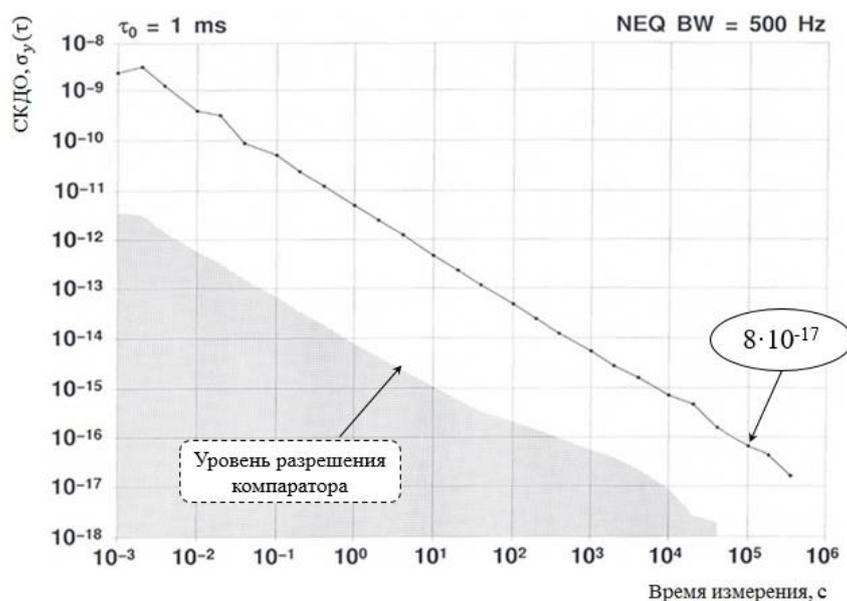


Рис. 8. СКДО сигнала, принимаемого на конце 200 км волоконно-оптической линии, относительно эталонного сигнала ВХ, который подавался на вход системы передачи с термостатированием аппаратуры на концах линии

В разделе 4.2 представлен проект системы одновременного сличения по оптическому кабелю трех эталонов времени и частоты, расположенных в Московском регионе.

В разделе 4.3 приведено описание системы передачи ЭСЧ по ВОЛС после ее доработки для использования волоконной линии длиной до 400 км. Представлены результаты суммарной стандартной неопределенности системы передачи по ВОЛС размера единицы частоты для линий разной длины:

$$u_{\text{С СП}} = \sqrt{(u_{\text{А}}^2 + u_{\text{В1}}^2 + u_{\text{В2}}^2)} = 4 \cdot 10^{-17} \dots 2,5 \cdot 10^{-16} \text{ для } L = 100 \dots 400 \text{ км, где}$$

$$u_{\text{А}} = 3 \cdot 10^{-17} \dots 2,5 \cdot 10^{-16} \text{ при } \tau = 10^5 \text{ с;}$$

$u_{\text{В1}} \leq 2 \cdot 10^{-17}$ – неопределенность по типу В, связанная с систематической погрешностью компаратора при $\Delta T = 0,2$ °С;

$u_{\text{В2}} \leq 2 \cdot 10^{-17}$ – неопределенность по типу В, определяемая учетом температурных характеристик аппаратуры на концах линии при $\Delta T = 0,2$ °С.

Основные результаты и выводы

В диссертационной работе поставлена и решена актуальная научно-техническая задача: разработка и исследование систем передачи эталонных радиочастотных сигналов на оптической несущей по волоконным линиям длиной до 200 км с активной электронной компенсацией. Вклад таких систем в суммарную стандартную неопределенность измерений при сличениях частот территориально удаленных эталонов не должен превышать $1 \cdot 10^{-16}$.

В процессе диссертационного исследования получены следующие научные результаты:

1. Подтверждена возможность передачи по ВОЛС ЭСЧ водородного хранителя ГЭТ 1-2018 на расстояние до 200 км с использованием только одного промежуточного двунаправленного EDFA усилителя.
2. Оценена неопределенность, вносимая системой передачи ЭСЧ по ВОЛС, построенной на основе активной электронной компенсации для волоконных линий различной длины в пределах 400 км.
3. Подтверждено, что система передачи ЭСЧ по каналу ВОЛС с активной электронной компенсацией может передать эталонный сигнал ГЭТ 1-2018 частотой 100 МГц на расстояние до 200 км практически без внесения дополнительной неопределённости, так как суммарная стандартная неопределенность измерений при воспроизведении единицы частоты ГЭТ 1-2018 в несколько раз больше.

Список публикаций по теме диссертации

1. Федорова Д.М. Передача эталонных радиочастот по волоконно-оптической линии с электронной компенсацией возмущений / Д.М. Федорова, Р.И. Балаев, А.Ф. Курчанов, В.И. Троян, А.Н. Малимон // Измерительная техника. – 2015. – № 9. – С. 34-37.

2. Балаев Р.И. Характеристики фазостабильных коаксиальных и оптических кабелей, используемых для передачи информации об эталонном

времени и частоте / Р.И. Балаев, Д.М. Федорова, А.Н. Малимон, А.Ф. Курчанов // Альманах современной метрологии. – 2015. – № 2. – С. 165-179.

3. Fedorova D.M. Using of Optic Fiber Links for Reference Frequency Transmission Over a Distance up to 85 km / D.M. Fedorova, A.N. Malimon, R.I. Balaev, A.F. Kurchanov, V.I. Troyan // Physics Procedia. – 2015. – Vol. 72. – P. 165-179, Vol. 72, pp. 227–231, 2015.

4. Федорова Д.М. Оценка точности передачи эталонного сигнала водородного генератора по волоконно-оптической линии связи с электронной компенсацией возмущений / Д.М. Федорова, Р.И. Балаев, А.Ф. Курчанов, В.И. Троян, А.Н. Малимон // Измерительная техника. – 2017. – № 8. – С. 38-42.

5. Колмогоров О.В. Система передачи эталонных сигналов частоты и времени по оптическому кабелю / О.В. Колмогоров, А.Н. Щипунов, Д.В. Прохоров, С.С. Донченко, С.Г. Бувев, А.Н. Малимон, Р.И. Балаев, Д.М. Федорова // Измерительная техника. – 2017. – № 9. – С. 29-32.

6. Колмогоров О.В. Комплекс средств для сравнения по ВОЛС шкал времени эталонов и передачи эталонных радиочастотных сигналов / О.В. Колмогоров, А.Н. Щипунов, Д.В. Прохоров, С.С. Донченко, С.Г. Бувев, А.Н. Малимон, Р.И. Балаев, Д.М. Федорова // Альманах современной метрологии. – 2017. – № 11. – С. 150-170.

7. Балаев Р.И. Методы передачи эталонных сигналов частоты и времени по волоконнооптическим линиям с компенсацией возмущений, вносимых линией / Р.И. Балаев, Д.М. Федорова, А.Н. Малимон, А.Ф. Курчанов, В.В. Бакулинская // Мир измерений. – 2018. – № 1. – С. 16-22.

8. Наумов А.В. Двухсторонняя передача сигналов времени и частоты по оптическим линиям связи с использованием модемов SATRE / А.В. Наумов, Р.И. Балаев, А.Н. Малимон, Д.М. Федорова // Измерительная техника. – 2018. – № 10. – С. 41-42.

9. Сутырин Д. В. Оптический репер частоты для применения в национальной шкале времени / Д. В. Сутырин, О. И. Бердасов, С. Ю. Антропов, А. Ю. Грибов, Р. И. Балаев, Е. Ф. Стельмашенко, Д. М. Федорова, А. Н. Малимон, С. Н. Слюсарев // Квантовая электроника. – 2019. – Т. 10. – С. 199-204.

ФГУП «ВНИИФТРИ». Подписано к печати 24.03.2020 г.
Объем 1,0 уч-изд. л. Тираж 100 экз. Зак. № 42
Полиграфучасток ФГУП «ВНИИФТРИ»
141570, п/о Менделеево, Солнечногорский р-н
Московская обл.