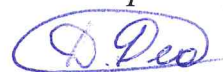


ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-
технических и радиотехнических измерений»

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

Специальность: 05.11.15 – Метрология и метрологическое обеспечение

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук,

Малимон Александр Никифорович

Менделеево – 2020 г.

Содержание

Введение	6
Глава 1. Обзор методов и систем передачи ЭСЧВ.....	19
1.1 Общая характеристика спутниковых и наземных способов передачи эталонных сигналов с наивысшими метрологическими характеристиками	19
1.1.1 Использование спутниковых методов для передачи эталонных сигналов	20
1.1.2 Использование наземных методов для передачи эталонных сигналов	23
1.1.3 Анализ состояния проблемы и выполненных в мире исследований по использованию ВОЛС для передачи ЭСЧВ.....	24
1.2 Факторы, оказывающие влияние на передачу ЭСЧВ в коротких и длинных ВОЛС.....	29
1.2.1 Затухание оптической несущей по мере ее распространения в волокне	31
1.2.2 Хроматическая дисперсия	34
1.2.3 Поляризационно-модовая дисперсия (ПМД)	36
1.2.4 Вынужденное рассеяние Мандельштама-Брюллиена (ВРМБ).....	41
1.2.5 Модуляция задержки оптической несущей в волокне из-за изменения атмосферного давления, воздействия акустических колебаний и механических вибраций	45
1.2.6 Изменение оптической длины канала ВОЛС при изменении температуры	46
1.3 Общая характеристика метода передачи ЭСЧ по ВОЛС без компенсации возмущений, вносимых линией.....	50
1.3.1 Необходимость использования систем компенсации возмущений, вносимых ВОЛС при передаче по линии эталонных сигналов	53
1.3.2 Теоретические оценки погрешности передачи ЭСЧВ по ВОЛС в оптических и коаксиальных кабелях длиной ~ 1 км.....	58
1.4 Выводы	60

Глава 2. Методы компенсации, вносимых каналов ВОЛС возмущений фазы, передаваемого эталонного сигнала	61
2.1 Методы пассивной компенсации и область их применения при передаче эталонных радиочастотных сигналов по ВОЛС	61
2.2 Принципы активной компенсации вносимых каналом ВОЛС возмущений фазы передаваемого эталонного сигнала	63
2.3 Два основных метода компенсации, вносимых каналом ВОЛС возмущений фазы передаваемого эталонного сигнала	66
2.4 Различные реализации метода электронной компенсации при передаче ЭСЧ по ВОЛС	69
2.5 Асимметричная схема электронной компенсации при передаче ЭСЧ по ВОЛС	72
2.6 Описание системы передачи ЭСЧ по ВОЛС с асимметричной электронной компенсацией	75
2.6.1 Узлы системы передачи ЭСЧ по ВОЛС	79
2.6.2 Формирователь сетки ЭСЧ – система ФСЭСЧ	80
2.6.3 Система передачи ЭСЧ по ВОЛС «туда и обратно»	85
2.6.4 Блок выработки сигнала ошибки – блок «ФД и ФНЧ»	87
2.6.5 Фазовращатель на основе 100 МГц кварцевого генератора	89
2.6.6 Система измерений погрешности передачи ЭСЧ по ВОЛС и мониторинга окружающей среды	91
2.7 Испытания системы передачи ЭСЧ по ВОЛС	92
2.7.1 Схема измерений для оценки вклада системы передачи в неопределенность сличений эталонов	92
2.7.2 Результаты испытаний системы передачи ЭСЧ по ВОЛС длиной 100 км с асимметричной электронной компенсацией	94
2.8 Выводы	95
Глава 3. Передача ЭСЧ по ВОЛС при поддержании температуры в местах размещения аппаратуры, входящей в систему передачи	97

3.1 Оценка требований к постоянству температуры в месте размещения электронной аппаратуры системы передачи ЭСЧ по ВОЛС	97
3.2 Технические характеристики термошкафа постоянных климатических условий.....	101
3.3 Результаты эксперимента по передаче ЭСЧ по ВОЛС при помещении аппаратуры на концах линии в климатическую камеру	102
3.4 Выводы.....	104
Глава 4. Система передачи ЭСЧ по ВОЛС с асимметричной электронной системой компенсации по линиям длиной более 100 км с использованием оптического двунаправленного усилителя	105
4.1 Система передачи ЭСЧ по ВОЛС с асимметричной электронной системой компенсации линии длиной 200 км	105
4.1.1 Оптические усилители	106
4.1.2 Лазер накачки оптического усилителя	108
4.1.3 Коэффициент усиления оптического усилителя	110
4.1.4 Усиленное спонтанное излучение в оптическом усилителе	112
4.1.5 Двунаправленный оптический EDFA усилитель, примененный при создании системы передачи ЭСЧ по ВОЛС для линии длиной более 100 км	114
4.1.6 Оптические перестраиваемые аттенюаторы.....	116
4.1.7 Схема системы передачи 100 МГц ЭСЧ по 200 км ВОЛС с асимметричной электронной компенсацией	118
4.2 Проект системы одновременного сличения по оптическому кабелю трех эталонов времени и частоты, расположенных в Московском регионе	120
4.2.1 Созданные в мире волоконно-оптические системы для сравнения территориально удаленных стандартов частоты оптического и микроволнового диапазонов.....	120
4.2.2 Какие эталоны можно непосредственно сравнить по ВОЛС.....	123
4.2.3 Предлагаемый вариант прокладки магистрального оптического кабеля в Московском регионе для передачи ЭСЧ между эталонами.....	124

4.2.4 Другие требования к электронным и оптоэлектронным компонентам необходимым для системы передачи ЭСЧ по ВОЛС	127
4.3 Схема системы передачи 100 МГц ЭСЧ по 400 км ВОЛС с асимметричной электронной компенсацией.....	129
4.4 Выводы.....	131
Заключение	132
Список сокращений	133
Библиография	136

Введение

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. Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1–2018 [1] оснащён двумя метрологическими цезиевыми реперами частоты фонтанного типа. Первичный эталон воспроизводит единицы времени и частоты с неисключённой систематической погрешностью (НСП) не более $5 \cdot 10^{-16}$ [2, 3]. 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) [4]. 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 $1 \cdot 10^{-15}$ (Таблица 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 (Таблица 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» [5]. 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 (Рисунок 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.



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

В таблице (Таблица 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.

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	Оптоэлектронная		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 [6]	16 км [7]	86 км [6]	100 км [8] (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	
			<u>Неограниченный диапазон коррекции фазы ЭСЧ с большим быстродействием</u>	
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			

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.

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 M. Kalhoun, Ł. Śliwczyński, 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 фазовой автоподстройки частоты (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 $u_{c\text{ сп}}$, 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 $u_{c\text{ сп}}$ 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 ФГУП «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.

Выражаю глубокую признательность и благодарность своей семье и родителям за оказанную поддержку. В процессе написания диссертации особо благодарю своего научного руководителя к.т.н. Малимона А.Н. за щедро передаваемый им накопленный опыт, за многочисленные консультации, конструктивные замечания и помощь в подготовке к защите. Отдельно благодарю начальника отделения ГМЦ ГСВЧ д.т.н. Блинова И.Ю. за продуктивные обсуждения в процессе написания диссертации.

Также выражаю благодарность руководству предприятия ФГУП «ВНИИФТРИ» в лице д.т.н. Донченко С.И. за предоставляемые возможности, помощь и доверие к молодым специалистам.

Благодарю весь коллектив центра № 75 ФГУП «ВНИИФТРИ» за отзывчивость, дружелюбие, помощь и конструктивный обмен знаниями и опытом.

Глава 1. Обзор методов и систем передачи ЭСЧВ

1.1 Общая характеристика спутниковых и наземных способов передачи эталонных сигналов с наивысшими метрологическими характеристиками

Для сличений территориально удаленных друг от друга стандартов частоты наиболее широко используется метод перевозимых квантовых часов и спутниковые каналы сличений [4]. Но точность таких сличений ограничена характеристиками спутниковых каналов и перевозимых часов. Поэтому важны и актуальны исследования, направленные на изучение альтернативных методов сличений территориально разнесенных стандартов, которые используют квантовые переходы как в микроволновом, так и в оптическом диапазонах. Такого рода исследования важны как для метрологии, так и для целого ряда приложений, требующих высокоточных время-частотных измерений.

На практике расстояние между стандартами частоты может покрывать континент или составлять всего лишь несколько десятков километров. Но в случаях, когда два эталона разделяет масштаб континента или несколько десятков километров, погрешность время-частотных сличений при использовании спутниковых каналов будет практически одинаковой. Поэтому необходимо проводить работы, направленные на создание таких наземных каналов передачи эталонных сигналов на расстояние в десятки и сотни километров, которые бы обеспечивали минимальную погрешность сличений и не ограничивали высокие метрологические характеристики эталонных сигналов.

Ниже перечислены методы, используемые для сличений сигналов частоты и времени эталонных квантовых стандартов, обладающих высокими метрологическими характеристиками, когда они территориально разнесены на большие расстояния.

1.1.1 Использование спутниковых методов для передачи эталонных сигналов

1. Спутниковый дуплексный метод TWSTFT. Такой метод использует СВЧ канал связи в открытом пространстве между двумя точками на Земле, где установлены квантовые часы, через спутник – ретранслятор, находящийся на стационарной орбите. Случайная составляющая погрешности (СКО) этого метода передачи сигнала времени может быть на уровне 0,3-1,0 нс, а точность калибровки и учета задержек времени в канале, реализуемом по такому методу (систематическая составляющая погрешности) составляет ~ 2 нс и в будущем может быть снижена до ~ 1 нс [9, 10, 11, 12]. Соответственно, погрешность передачи частоты будет лежать на уровне $\sim 10^{-14}$ на суточном интервале времени измерения.

2. Спутниковый метод Common View (CV). Метод CV является основным классическим методом сличений территориально разнесенных квантовых часов, который основывается на использовании навигационных спутников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS или ГЛОНАСС. Сигналы, генерируемые двумя квантовыми часами одновременно, сравниваются с сигналом, поступающим от одного и того же навигационного спутника. Таким путем влияние времени распространения сигнала от спутника на определение разности хода часов существенно ослабляется. Лаборатории, где

установлены часы, обмениваются результатами для выяснения разности хода часов. Метод CV основан на фазовых измерениях и может конкурировать с TWSTFT в отношении случайной составляющей погрешности сличений. Но точность калибровки, обеспечиваемая TWSTFT, является на сегодняшний день лучшей среди спутниковых радиочастотных методов. Погрешность метода Common View при сличениях времени составляет ~ 5 нс [13, 14], а погрешность передачи частоты составляет несколько единиц 10^{-14} на суточном интервале времени измерения.

Исследовались также некоторые другие спутниковые методы такие, как GPS PPP (precise point positioning), GPS AV (all in view), а также комбинированный метод TWSTFT-GPS [15, 16, 17]. Однако все эти методы, основанные на использовании спутникового радиоканала, имеют ряд проблем с калибровкой задержки в канале, что вносит неопределенность в абсолютное значение получаемой разности временных шкал. Несмотря на использование сложных и громоздких методов и систем, вклад в неопределенность измерения задержки “типа В” (обычно называемый систематической неопределенностью) составляет около 1 нс для TWSTFT и около 5 нс для GPS-систем [10, 18].

3. Спутниковый метод T2L2 и его модификации – это метод, реализующий в открытом пространстве оптический канал передачи информации о моменте времени двух территориально разнесенных квантовых часов через один спутник с использованием импульсных лазеров установленных на станциях лазерной дальнометрии вблизи мест размещения часов [19]. В последние два десятилетия этот метод исследуется и совершенствуется, и потенциально достижимая погрешность такого метода оценивается для случайной составляющей погрешности (СКО) на уровне в несколько десятков пикосекунд, а точность калибровки и учета задержек времени в реализуемом оптическом канале по такому

методу составляет сотни пикосекунд. Следует заметить, что импульсные лазеры, которые посылают оптические сигналы к спутнику всегда удалены от сличаемых эталонных часов, по крайней мере, на несколько сотен метров, а потому возникает необходимость решения задачи передачи с минимальной погрешностью сигналов частоты и времени от эталонных часов по коаксиальному или волоконно-оптическому кабелю к лазерам посылающим сигналы к спутникам.

В отличие от GPS в системе ГЛОНАСС космические аппараты оборудованы оптическими уголковыми отражателями, а следующее поколение спутников будет иметь аппаратуру, которая в бортовой шкале времени спутника может фиксировать момент прихода оптического импульса от наземных лазерных станций. Это позволяет реализовать в системе ГЛОНАСС сличения по оптическому каналу на основе модифицированного метода T2L2. Исследования и разработки в этом направлении последовательно ведутся. Сейчас можно сделать предварительный вывод о том, что из числа спутниковых методов наилучшие результаты по точности сличений должен дать в будущем модифицированный метод T2L2, реализованный на основе сети станций лазерной дальнометрии, установленных вблизи наземных пунктов управления системы ГЛОНАСС и мест размещения национальных первичного и вторичных эталонов. Сличения национального эталона и водородных хранителей, установленных в наземных пунктах управления системы ГЛОНАСС, а также сличения их с бортовыми шкалами времени будут обеспечивать лазерные дальномерные станции, работающие с навигационными модернизированными спутниками ГЛОНАСС.

1.1.2 Использование наземных методов для передачи эталонных сигналов

Метод сличений, использующий перевозимые квантовые часы. Для осуществления такого метода необходимы транспортабельные микроволновые квантовые часы или оптический стандарт частоты. Порядок сличений включает в себя сличения перевозимых часов с первыми квантовыми часами, размещенными в одном географическом пункте, затем перевозимые часы транспортируются наземным транспортом (а иногда и самолетом) в другой пункт, где они сличаются со вторыми квантовыми часами. Затем перевозимые часы возвращают в исходный географический пункт и вновь сличают с первыми квантовыми часами. Для выполнения сличений не только частот квантовых стандартов, размещенных в различных географических пунктах, но и шкал времени, формируемых этими стандартами, необходимо чтобы перевозимые часы не выключались на всем протяжении пути их перемещения.

Погрешность сличений квантовых стандартов, размещенных в различных географических пунктах, в первую очередь, зависит от характеристик перевозимых квантовых часов, которые по точности обычно уступают стационарным приборам. Погрешность сличений также ограничена неопределенностью оценок всего набора релятивистских поправок, которые необходимо учитывать в связи с движением перевозимых часов, а также из-за изменения гравитационного потенциала вдоль пути следования перевозимых часов. Эти факторы ограничивают точность сличений с помощью перевозимых квантовых часов, и она обычно не лучше 1 нс даже в том случае, когда между двумя географическими пунктами расстояние лежит в пределах от нескольких десятков до сотен километров.

Как уже было сказано выше, кроме неоспоримых преимуществ спутниковые методы имеют ряд существенных недостатков. Эти методы практически достигли

пределов точности, которые они могут обеспечить. И, кроме того, дальнейшее их совершенствование - 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 $1 \cdot 10^{-15}$ (Таблица 1).

Общий недостаток четырех вышеперечисленных спутниковых и наземных методов состоит в том, что они ограничивают точность сличений лучших современных стандартов частоты. Можно сделать вывод о том, что в настоящее время погрешность сравнения территориально разнесённых 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 ЭСЧВ. Поэтому крайне важны исследования новых методов передачи ЭСЧВ, использующих иные каналы связи. Необходимо, чтобы новые методы обеспечивали передачу ЭСЧВ между территориально удаленными высокоточными стандартами и не вносили дополнительную погрешность, которая повышает неопределенность результата их сличений.

1.1.3 Анализ состояния проблемы и выполненных в мире исследований по использованию ВОЛС для передачи ЭСЧВ

Исследования методов передачи ЭСЧВ по ВОЛС начали проводить позже, чем описанных выше спутниковых методов сличений. Методами передачи ЭСЧВ по ВОЛС заинтересовались в конце XX века из-за развития к этому времени систем связи и телекоммуникационных технологий на основе использования оптических

волокон. Выполненные к настоящему времени исследования подтвердили перспективность направления по использованию ВОЛС для целей передачи ЭСЧВ.

Предложения по реализации систем передачи эталонных сигналов по ВОЛС были выдвинуты в 90-х годах XX века. В 1995 году Кихара на конференции EFTF (European Frequency and Time Forum) доложил о методе передачи сигналов точного времени в уже существующих телекоммуникационных волоконно-оптических сетях связи [20, 21]. Его предложение было следующим: передавать сигналы эталонного времени в составе информационного потока в телекоммуникационных сетях. Он предложил метод реализующий способ передачи сигналов точного времени и синхронизации удаленных часов, в основе которого лежит обмен информацией о моментах поступления и отправки меток времени на вход и конец линии. Особенность его дуплексного метода заключается в том, чтобы вводить информацию о времени в незаполненные ячейки заголовка кадров (фреймов) в одном из каналов телекоммуникационного потока. По его оценкам метод должен дать возможность достижения погрешности передачи сигнала времени по ВОЛС на уровне ~ 10 нс на расстояниях до 1000 км [20]. Методы и применяемая стандартная аппаратура сетей связи обеспечивает в 100 раз меньшую точность, чем та которую можно получить методом Кихары. Это и стало основным стимулом начала исследований, связанных с передачей ЭСЧВ по оптоволокну.

Основная часть экспериментальных работ по передаче ЭСЧ по ВОЛС на расстояние от километра до нескольких десятков километров без компенсации и с компенсацией, вносимых линией возмущений фазы передаваемого сигнала, была начата после 2000-х годов. Первые же эксперименты показали, что, не используя системы компенсации, нельзя передать ЭСЧВ по ВОЛС без ухудшения его метрологических характеристик, даже в случае использования километровых

линий. В проекте «Кассини» сотрудники JPL (NASA) в США [22, 23], а следом за ними в совместных работах сотрудники LPL и SYRTE во Франции [6, 24] провели эксперименты с ВОЛС длиной в 16 и 86 километров, по которым передавались эталонные РЧ сигналы с компенсацией возмущений, вносимых волоконной линией. В результате проведенных исследований было достигнуто значение погрешности передачи эталонных частот 100 МГц и 1 ГГц ниже уровня 10^{-16} на суточном интервале времени измерения. Во Франции группой ученых из LPL+SYRTE проводятся исследования и в настоящее время, в которых проводятся эксперименты по передаче по оптоволокну эталонных частот радио, СВЧ и оптического диапазонов [6, 24, 25, 26, 27].

В Голдстоуне на территории комплекса дальней космической связи исследователи из JPL осуществляли свои эксперименты по специально созданной 16 километровой ВОЛС. В свою очередь сотрудники LPL и SYRTE в районе Парижа передавали сигналы по 86 километровой незадействованной «темной» жиле телекоммуникационного кабеля. Обеими этими группами использовался метод активной оптоэлектронной компенсации возмущений, вносимых оптоволоконной линией. Принцип работы такого метода компенсации описан ниже в главе 2.

Сравнение результатов экспериментов лабораторий различных стран, показывает, 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 специальный микрочип с двумя комплементарными управляемыми электронными линиями задержки (ЭЛЗ) и реализовала на его основе систему передачи ЭСЧВ по схеме активной симметричной электронной компенсации возмущений, вносимых ВОЛС. Данная

система передачи не лишена недостатков. При использовании такой системы значительно увеличивается джиттер переданного сигнала, следовательно, требуется разработка специальных систем уменьшения джиттера [8].

Эксперименты и исследования по передаче в телекоммуникационных линиях связи эталонных сигналов времени, используя метод Кихары, реализовали в лабораториях и метрологических центрах, в Чехии, Японии, Швеции [20, 28, 29]. Группы исследователей Швеции и Чехии использовали университетские и академические телекоммуникационные сети, а потому могли вносить в аппаратуру в узлах связи доработки и изменения при проведении своих экспериментов [28, 29]. При передаче сигнала времени на расстояние до 500 км была получена погрешность ~ 1 нс на суточном интервале времени измерения, а при передаче частоты $\sim 10^{-14}$ на суточном интервале времени измерения. Во ВНИИФТРИ были выполнены измерения по передаче эталонных сигналов времени с использованием модемов APCB фирмы «АЛТО» (Россия) по катушкам волокна длиной 25 и 50 км [30, 31] при изменениях температуры в диапазоне 0-60 °С. При передаче сигнала времени модемами APCB была получена погрешность ~ 1 нс. Но в результате проведения анализа работ [20, 28, 29] и экспериментов, реализованных во ВНИИФТРИ [30], можно сделать вывод о неперспективности работ, направленных на передачу эталонных сигналов в составе телекоммуникационного потока, если у исследователей нет доступа к телекоммуникационной сети, аппаратуру которой они могут изменить и доработать.

Погрешность передачи ЭСЧ методом Кихары соответствует той, которую получают при передаче по обычной выделенной волоконной линии без какой-либо компенсации.

В работах [30, 32, 33, 34] представлены результаты прогнозных исследований и экспериментов по передаче радиочастотных эталонных сигналов в коротких

волоконных линиях длиной в несколько километров. Выполнение этих работ позволило войти в круг научных и экспериментальных задач по проблеме передачи радиочастотных эталонных сигналов и определить ключевые наиболее важные направления исследований.

Следует подчеркнуть, что выбор лучшего технического решения, подходящего для передачи эталонных радиочастотных сигналов по длинной оптоволоконной линии, не будет наилучшим, если использовать его применительно к короткой линии передачи. Это в частности связано с тем, что в коротких линиях можно использовать большую мощность оптической несущей, чем в длинных линиях, и работать в диапазоне длин волн оптической несущей вблизи $\lambda = 1,31$ мкм, где хроматическая дисперсия стандартного волокна мала, но затухание сигнала практически в два раза выше, чем в диапазоне $\lambda = 1,55$ мкм. Поэтому для реализации передачи эталонных сигналов по длинным линиям на расстояние более 40 км необходимо использовать «главное окно прозрачности» волокна вблизи $\lambda = 1,55$ мкм, но в коротких линиях, в которых уровень затухания не играет существенной роли, предпочтительней выбор длины волны оптической несущей в области $\lambda = 1,31$ мкм, где реализуется передача радиочастотного сигнала с минимальным уровнем фазовых искажений, вызванных хроматической дисперсией волокна.

Завершая краткий обзор, отметим, что сейчас за рубежом и в России исследования по вопросу передачи ЭСЧВ по ВОЛС продолжаются. Способы передачи и компенсации возмущений, вносимых волоконной линией, видоизменяются и усложняются [26, 35, 36, 37, 38]. В каждом из диапазонов передаваемых частот системы передачи ЭСЧВ по ВОЛС не имеют окончательных однозначных схемотехнических решений. Несмотря на ведущиеся за рубежом в последние два десятилетия исследования, на рынке высокотехнологичного

оптоэлектронного оборудования практически нет предложений о продаже систем передачи эталонных сигналов по волоконно-оптическим линиям с компенсацией возмущений, вносимых линией. В последние годы на рынке появились только лишь образцы аппаратуры без устройств активной компенсации, которые могут передавать аналоговые радиочастотные сигналы и, в том числе, эталонные сигналы по коротким линиям длиной до нескольких километров. Такая аппаратура без устройств компенсации может обеспечить передачу частоты по ВОЛС с погрешностью на уровне в пределах 10^{-15} – 10^{-14} на суточном интервале времени измерения, что недостаточно для передачи на большие расстояния эталонных сигналов высокостабильных стандартов частоты, применяемых в национальных эталонах.

1.2 Факторы, оказывающие влияние на передачу ЭСЧВ в коротких и длинных ВОЛС

Главной целью при осуществлении доставки эталонного РЧ сигнала, передаваемого путем амплитудной модуляции оптической несущей, – получить на удаленном конце ВОЛС выходной эталонный сигнал с незначительным повышением относительного уровня его фазовых шумов. Достигнув эту цель, сигнал на удаленном конце будет точно воспроизводить частоту, и, следовательно, и ход эталонных часов, расположенных у начала линии.

Фаза сигнала, полученного на выходе линии, будет воспроизводить фазу ЭСЧ с некоторой задержкой, определяемой временем распространения оптического излучения по волокну. Задача заключается в том, чтобы временная задержка оставалась постоянной. Медленные изменения задержки вызывают низкочастотные вариации фазы ЭСЧ, переданного на конец линии, и они являются

в основном результатом изменения температуры окружающей среды. Стоит обратить внимание, что фаза переданного сигнала на выходе из линии будет подвержена не только вандеру, но и быстрым возмущениям – джиттеру, который является результатом влияния линии и двойного электрооптического преобразования ЭСЧ на концах линии.

Частота передаваемого сигнала на выходе линии из некомпенсированного волокна описывается уравнением:

$$f_{out}(t) = f_{in}(t) + \frac{d\varphi(t)}{dt}, \quad (1)$$

где $f_{in}(t)$ и $f_{out}(t)$ - мгновенные значения частоты передаваемого радиочастотного сигнала на входе и выходе линии в момент времени t , $d\varphi(t)/dt$ – производная переменной составляющей $\varphi(t)$ фазы выходного сигнала $\Phi_{out}(t) = \Phi_{ol} + \varphi(t)$, (где Φ_{ol} – постоянная составляющая сдвига фазы выходного сигнала, обусловленная постоянной составляющей τ_{ol} задержки сигнала в линии). Величина задержки сигнала в линии $\tau_{out}(t) = \tau_{ol} + \tau(t)$ также имеет переменную составляющую задержки $\tau(t)$. Сдвиг частоты сигнала на выходе линии на величину $d\varphi(t)/dt$ возникает из-за изменения задержки $\tau(t)$ относительно периода радиочастоты, так что

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = 2\pi f_{in}(t) \frac{d\tau(t)}{dt}. \quad (2)$$

Когда для передачи радиочастоты, используются волоконные линии, то сдвиг частоты выходного сигнала, определяемый скоростью изменения задержки сигнала в линии $d\tau(t)/dt$ будет более ощутимым при больших вариациях температуры

окружающей среды и в более длинных линиях (более подробно этот вопрос рассмотрен в главе 2).

Вместе с фактором температурных вариаций окружающей среды есть ряд других физических закономерностей, оказывающих влияние на распространение оптической несущей в оптоволокне и ведущих к деградации – изменению формы, ослаблению, и изменениям фазы передаваемого на удаленный конец линии эталонного сигнала. Ниже представлены эти факторы:

- 1) Затухание оптической несущей по мере ее распространения в волокне;
- 2) Хроматическая дисперсия в оптическом волокне;
- 3) Поляризационно–модовая дисперсия (ПМД);
- 4) Вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна в волокне;
- 5) Модуляция задержки оптической несущей в волокне из-за изменения атмосферного давления, воздействия акустических колебаний и механических вибраций;
- 6) Изменение оптической длины канала ВОЛС из-за изменения температуры.

Для определения факторов, которые вносят наибольший вклад в вариации задержки сигнала, передаваемого по ВОЛС, проанализируем более подробно каждый из этих факторов.

1.2.1 Затухание оптической несущей по мере ее распространения в волокне

Затухание - один из основных параметров оптического волокна. Чем меньше затухает распространяемый сигнал в волокне, тем больше расстояние на которое его можно передать. Коэффициент затухания в оптическом волокне (ОВ) зависит от следующих факторов (Рисунок 2):

- потери за счет рэлеевского рассеяния;
- рассеяние, происходящее на дефектах волокна;
- собственное поглощение;
- примесное поглощение;
- кабельные потери;
- потери на макро и микроизгибах.

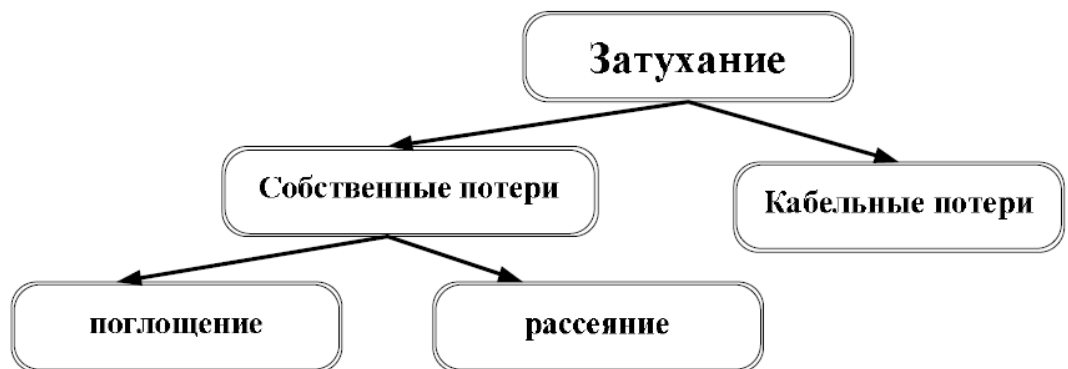


Рисунок 2. Различные виды затухания в волокне

Собственное потери, вызваны только чистым кремнием, тогда как внешние потери вызваны наличием примесей в волокне.

Коэффициент полного затухания α [дБ/км] определяется по формуле [39]:

$$\alpha = \alpha_n + \alpha_{\text{рэл}} + \alpha_{\text{пр}} + \alpha_{\text{к}}, \quad (3)$$

где α_n – коэффициент затухания, обусловленный потерями на поглощение световой энергии; $\alpha_{\text{рэл}}$ – коэффициент затухания, обусловленный рэлеевским

рассеиванием; $\alpha_{\text{пр}}$ – коэффициент затухания, вызванный присутствующими в волокне примесями; $\alpha_{\text{к}}$ – дополнительные кабельные потери.

Потери в кварцевых оптических волокнах от длины волны света представлены зависимостью (Рисунок 3). Как видно из этого рисунка, потери ограничиваются: рэлеевским рассеянием, инфракрасным поглощением и резонансным поглощением ионов ОН («водяные» пики). Кривая на рисунке носит иллюстративный характер, так как для разных производителей и разных типов волокон величина потерь может различаться [40]. Наибольшее отличие может наблюдаться в «водяных» пиках на $\lambda = 1290$ нм и 1383 нм.

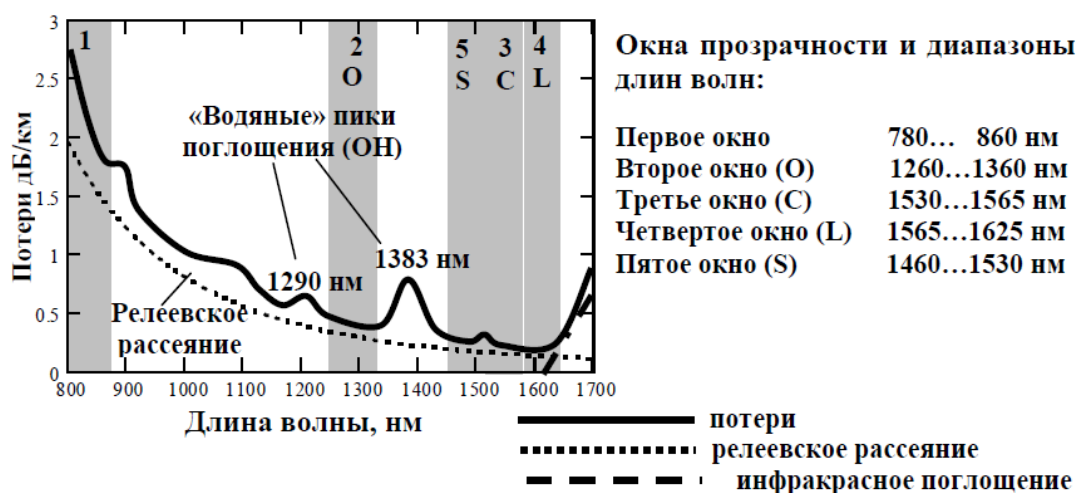


Рисунок 3. Положение окон прозрачности в кварцевых оптических волокнах и спектр потерь в них

При увеличении длины волны ($\sim 1/\lambda^4$) рэлеевское рассеяние уменьшается, а инфракрасное поглощение - увеличивается. Минимум потерь приходится на длину волны $\lambda = 1550$ нм. У лучших образцов одномодовых волокон потери для этой длины волны составляют 0.19 дБ/км.

1.2.2 Хроматическая дисперсия

В оптической связи дисперсию обычно связывают с явлением уширения световых импульсов после их прохождения через дисперсионную среду. В одномодовых волокнах уширение импульсов вызвано двумя эффектами – хроматической дисперсией (D) и поляризационной модовой дисперсией (PMD).

Как правило, преобладает хроматическая дисперсия, а поляризационная модовая дисперсия начинает проявляться при расстояниях между ретрансляторами в несколько сотен километров и скорости передачи выше 10 Гбит/с. Рассмотрим, во-первых, хроматическую дисперсию. Так как спектр оптического сигнала имеет конечную ширину, а разные спектральные компоненты этого сигнала движутся в волокне с различной скоростью, возникает хроматическая дисперсия (Рисунок 4).

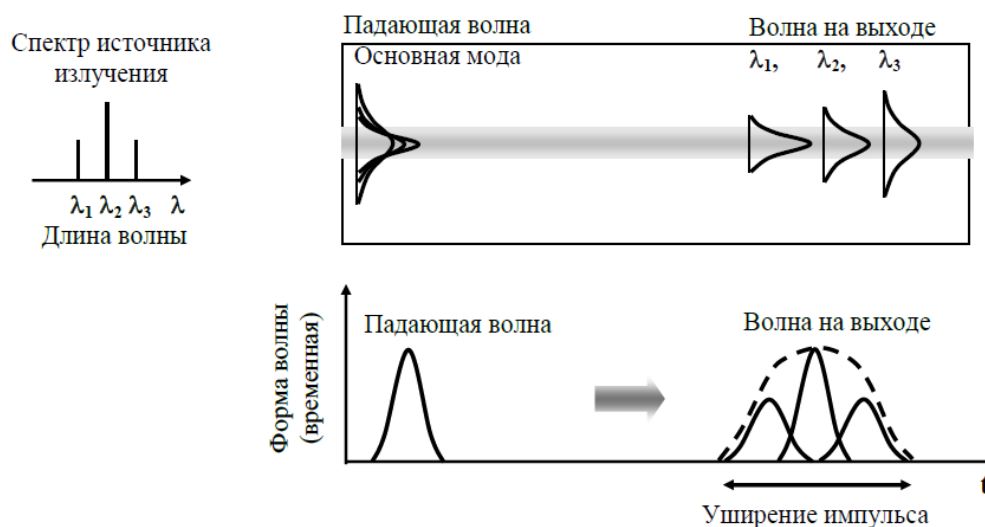


Рисунок 4. Материальная и волноводная дисперсии в одномодовом волокне [40]

Примерный ход запаздывания импульсов $\tau(\lambda)$, а также коэффициента дисперсии $D(\lambda)$ от длины волны излучения λ (Рисунок 5). Коэффициент дисперсии

$D(\lambda) = (1/L) \cdot \Delta\tau / \Delta\lambda$ рассчитывается из зависимости удельного запаздывания $\tau(\lambda)/L$ от длины волны излучения, где L – длина волокна.

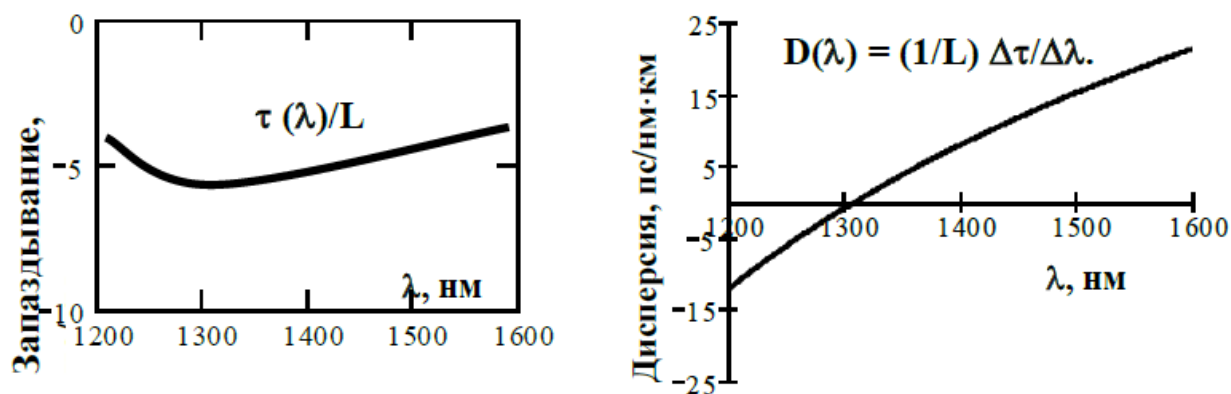


Рисунок 5. Зависимость от длины волны λ запаздывания $\tau(\lambda)$ и коэффициента дисперсии $D(\lambda)$ в одномодовом волокне

Хроматическая дисперсия приводит не только к уширению импульсов, но и может быть использована для их сжатия. Если собрать линию, из двух участков волокон одинаковой длины и равной по модулю, но противоположной по знаку хроматической дисперсией, то результирующая дисперсия такой линии будет равна нулю. И импульс, который уширился на первом участке линии, на втором участке будет сжат до начальной величины (Рисунок 6) [40].

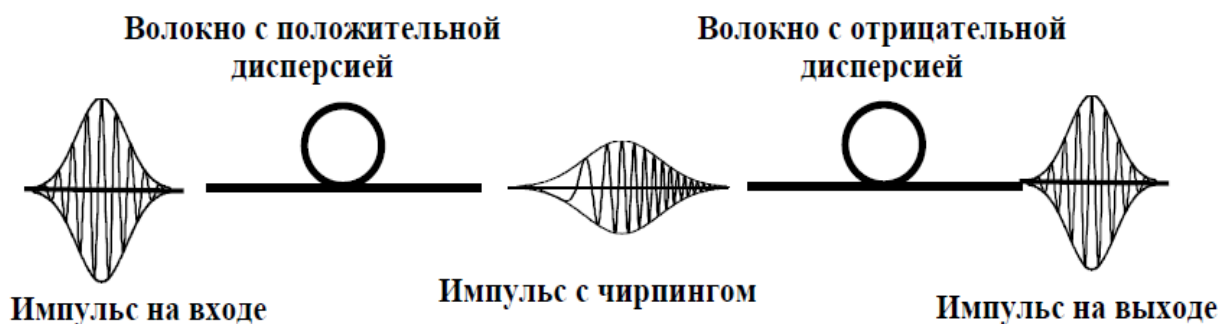


Рисунок 6. Схема прохождения импульса света через участки волокна одинаковой длины, с равной по модулю, но противоположной по знаку хроматической дисперсией

Стандартное одномодовое волокно на длине волны 1550 нм имеет коэффициент хроматической дисперсии $D(\lambda) = 17$ пс/нм·км. Влияние хроматической дисперсии D на передаваемый эталонный радиочастотный сигнал сказывается в большей степени при передаче сигналов СВЧ диапазона.

1.2.3 Поляризационно-модовая дисперсия (ПМД)

Свет, которые распространяется в одномодовом волокне, можно представить в виде суммы двух поляризационных мод. Каждая из них распространяется параллельно оси волокна со своим значением фазовой и групповой скорости. Фазовый фронт у мод плоский, а нормаль к плоскости фазового фронта параллельна оси волокна. Пространственное распределение полей у поляризационных мод волокна одинаковое (гауссово), и отличаются они только тем, что поляризованы ортогонально [40].

Свет распространяется в волокне так же, как и в случае распространения плоской волны в свободном пространстве. Плоскую волну можно представить в виде двух ортогонально поляризованных плоских волн. У поляризационных мод обычно используют линейно поляризованные моды LP_{01} (LP – linear polarized), так как в волокне обычно преобладает линейное двулучепреломление (Рисунок 7).

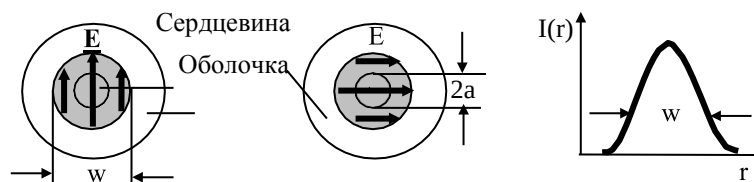


Рисунок 7. Распределение интенсивности ($I(r) \sim \exp[-2r^2/(w/2)^2]$) и направление электрического поля E в поляризационных модах волокна, w – диаметр моды, $2a$ – диаметр сердцевины

Показатель преломления в телекоммуникационных оптических волокнах зависит от состояния поляризации света, т.е. эти волокна обладают двулучепреломлением, причем обычно линейным. Оно наводится в номинально круглом волокне. При изготовлении в круглом волокне появляется небольшая эллиптичность сердцевинки и внутренние напряжения, не обладающие аксиальной симметрией (Рисунок 8). Так как появившиеся в волокне натяжения не имеют выделенного направления, величина и азимут линейного двулучепреломления изменяется случайным образом вдоль оси волокна.

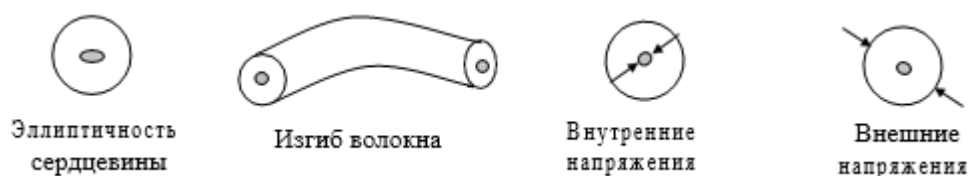


Рисунок 8. Причины возникновения двулучепреломления в оптических волокнах

Участки волокна менее длины корреляции нерегулярностей двулучепреломления можно рассматривать как однородные, но стоит помнить, что поляризационная анизотропия распределена по длине волокна нерегулярно. На указанном участке волокна можно возбудить быструю и медленную поляризационные моды, которые распространяются вдоль волокна и при этом не обмениваются мощностью. Фазовые скорости этих поляризационных мод обратно пропорциональны величине показателей преломления:

$$v_6 = c/n_6 \text{ и } v_m = c/n_m, \quad (4)$$

где n_6 – показатель преломления вдоль быстрой оси, n_m – показатель преломления вдоль медленной оси. А разность их фазовых набегов прямо

пропорциональна разности показателей преломления ($\Delta n = n_m - n_o$) и длине участка волокна L :

$$\Delta\varphi = (2\pi/\lambda) (L/v_m - L/v_o) = (2\pi/\lambda) \Delta n L. \quad (5)$$

Если будут возбуждены сразу обе поляризационные моды, то состояние света будет периодически изменяться вдоль всего волокна с периодом равным длине биений L_o (Рисунок 9). Длина биений находится из условия, что разность фазовых набегов поляризационных мод равна 2π и выражается через разность показателей преломления:

$$L_o = \lambda/\Delta n \quad (6)$$

У оптических волокон при $\lambda = 1550$ нм $L_o = 5$ м, что соответствует разности показателей преломления $\Delta n = 3 \cdot 10^{-7}$.

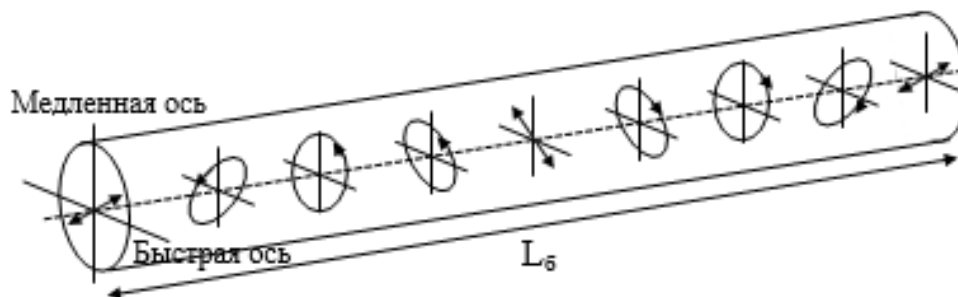


Рисунок 9. Двулучепреломление волокна приводит к периодическому изменению состояния поляризации света от линейного к эллиптическому, круговому, эллиптическому, линейному

Двулучепреломление приводит не только к появлению разности фазовых запаздываний поляризационных мод, но и к появлению у них разности групповых

запаздываний (DGD – differential group delay) и, соответственно, к уширению импульсов (Рисунок 10):

$$\Delta\tau(\text{пс}) = \delta\tau(\text{пс/км}) \times L(\text{км}), \quad (7)$$

где $\delta\tau$ - разности групповых запаздываний поляризационных мод на единице длины волокна. Так как в первом приближении фазовые и групповые скорости поляризационных мод примерно равны друг другу, то с помощью (4) находим:

$$\delta\tau \approx (1/v_m - 1/v_o) = \Delta n/c. \quad (8)$$

Полагая в (8) $\Delta n = 3 \cdot 10^{-7}$ и $c = 3 \cdot 10^5$ км/с, получим $\delta\tau = 1$ пс/км.

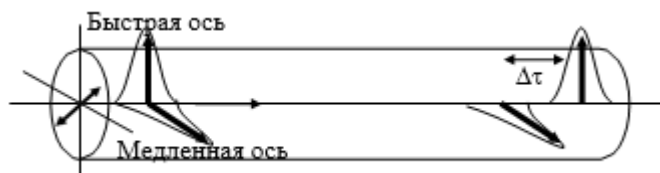


Рисунок 10. Уширение импульсов в волокне с двулучепреломлением

В волокнах с регулярным (не изменяющимся по длине волокна) двулучепреломлением, возможно избежать уширения импульса из-за DGD. Для этого необходимо, чтобы направление поляризации на входе в такое волокно, совпадало с направлением оси двулучепреломления волокна. Таким образом, в волокне будет возбуждаться только одна поляризационная мода, а импульс не будет расширяться из-за двулучепреломления волокна. Обычно длина волокна существенно превышает длину корреляции его неоднородностей. В таком случае

возбуждается и вторая поляризационная мода, что приведет к уширению импульсов.

Так как связь между поляризационными модами волокна является случайной и может приводить к увеличению и к уменьшению DGD (разности групповых запаздываний поляризационных мод), то в длинном волокне среднее значение DGD ($\langle \Delta\tau \rangle$) увеличивается не как в (8), прямо пропорционально длине волокна, а прямо пропорционально квадратному корню из длины волокна.

$$\langle \Delta\tau \rangle (\text{пс}) = \text{PMD} (\text{пс/км}^{1/2}) \times L^{1/2} (\text{км}^{1/2}). \quad (9)$$

Коэффициент поляризационной модовой дисперсии - PMD выражается (с точностью до коэффициента порядка единицы) через $\delta\tau$ и длину корреляции нерегулярностей двулучепреломления L_c соотношением

$$\text{PMD} (\text{пс/км}^{1/2}) = \delta\tau (\text{пс/км}) \times L_c^{1/2} (\text{км}^{1/2}). \quad (10)$$

Влияние PMD в линии возрастает:

- если увеличивать частоту передаваемого эталонного сигнала;
- если увеличивать количества участков линии;
- если увеличивать количество каналов, так как возрастает вероятность большого отклонения дифференциальной групповой задержки от среднего значения хотя бы в одном канале.

Однако если контролировать геометрию волокна, PMD можно уменьшить, что было осуществлено технологически в последние годы в процессе изготовления новых типов волокна.

Но так как в конце 1980-х годов было проложено свыше 80 миллионов километров волокна, соответствующего Рекомендациям ITU-T G.652, большинство существующих в настоящий момент кабельных сетей подвержены влиянию PMD. Явление PMD минимально проявляется в волокнах, соответствующих Рекомендациям ITU-T G.653, G.654 и G.655. В обычных волокнах коэффициент *PMD* достигает $1...2 \text{ пс/км}^{1/2}$, а у лучших образцов новых типов волокна он равен $0,2 \text{ пс/км}^{1/2}$ [40].

1.2.4 Вынужденное рассеяние Мандельштама-Брюллиена (ВРМБ).

ВРМБ – это нелинейный эффект, который проявляется в процессе неупругого рассеяния света на акустических фонах, генерируемых за счет взаимодействия падающей и стоксовой волн. Среди нелинейных эффектов в волокне ВРМБ имеет самый низкий порог мощности возникновения. Эффект ВРМБ лавинообразно нарастает при превышении некоторого порога мощности лазерного излучения подаваемого в волокно. Это ограничивает мощность оптической несущей, которая используется для передачи ЭСЧВ по волоконной линии, что, в свою очередь, приводит к ограничению дальности, на которую может быть передан эталонный сигнал без регенерации.

При появлении вынужденного обратного рассеяния Мандельштама - Бриллюэна излучение лазера создает периодические области с переменным показателем преломления, то есть дифракционную решетку, которая расходится от оптического пучка подобно акустической волне. Отражения, которые вызваны этой виртуальной решеткой, усиливаются и обнаруживаются в форме обратно рассеянного света с доплеровским понижением частоты (сдвигом в область длинных волн). Это явление

приводит к значительному повышению уровня шумов и нестабильности распространения оптического сигнала, так как большая часть его мощности рассеивается назад. При появлении ВРМБ в волоконной линии, по которой передается на оптической несущей эталонный радиочастотный сигнал, он зашумляется, деградирует и теряет свои эталонные свойства.

С точки зрения квантовой механики ВРМБ - это процесс уничтожения фотона накачки с одновременным появлением стоксова фотона и акустического фонона (Рисунок 11).

$$\begin{cases} \hbar\omega_0 = \hbar\omega_s + \hbar\omega_A \\ \vec{k}_0 = \vec{k}_s + \vec{k}_A \end{cases} \quad (11)$$

$$\omega_0 - \omega_s = 2v_A k_0 \sin\theta$$

$$\omega_A = v_A |\vec{k}_A| = 2v_A |\vec{k}_0| \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (12)$$

где $\hbar$ – постоянная Планка, $\omega_0, \omega_s, \omega_A$ – частоты фотона накачки, стоксова фотона и акустического фонона соответственно, $\vec{k}_0, \vec{k}_s, \vec{k}_A$ – волновые векторы, θ – угол между направлениями распространения волн накачки и стоксовой. Уравнение (12) показывает, что смещение частоты стоксовой волны зависит от угла рассеяния.

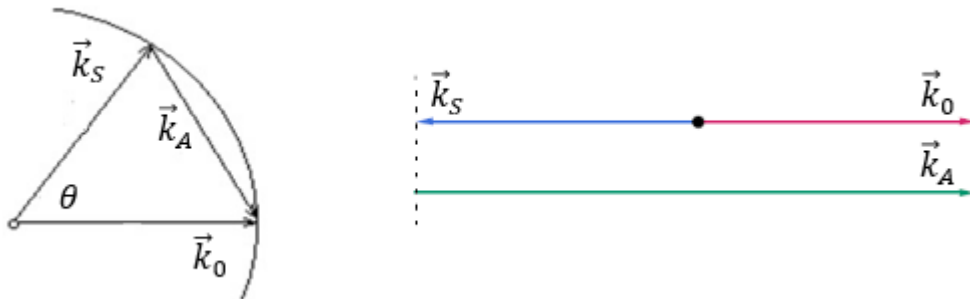


Рисунок 11. Пояснение прохождения процесса ВРМБ

В волоконном световоде смещение частоты стоксовой волны максимально для обратного направления ($\theta=\pi$) и исчезает для прямого направления, совпадающего с вектором накачки ($\theta=0$). Например, для оптического излучения с длиной волны 1525 нм в волокне, соответствующем Рек. ITU-T G.653, рассеиваемое обратно излучение понижает свою частоту примерно на 10,7 ГГц (+0,085 нм) и имеет полосу около 60 МГц (Рисунок 12). Для волокон Рек. ITU-T G.652 рассеиваемый обратно сигнал в том же волновом диапазоне снижает частоту на 11 ГГц (+0.088 нм) и имеет полосу около 30 МГц.

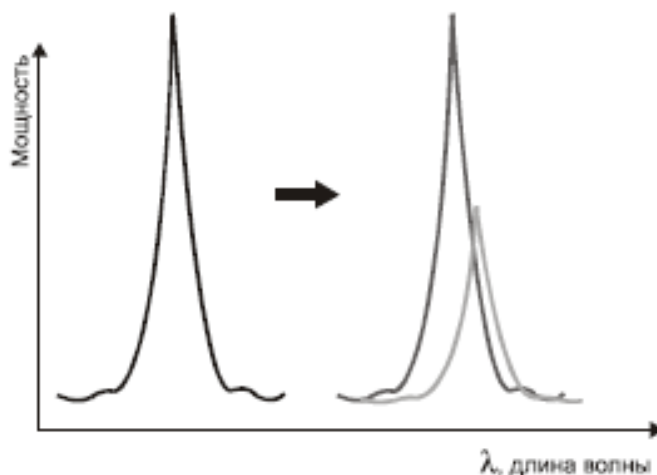


Рисунок 12. ВРМБ приводит к появлению в канале ВОЛС паразитного оптического излучения с длиной волны большей, чем лазерная несущая эталонного сигнала

Бриллюновское частотное смещение:

Для обратного направления ($\theta= \pi$) смещение частоты дается выражением:

$$\nu_B = \frac{\omega_A}{2\pi} = \frac{2 \cdot n \cdot \nu_A}{\lambda_0}, \quad (13)$$

где ω_A - частота акустической волны, n – показатель преломления, λ_0 – длина волны накачки [41].

Выражение для пороговой мощности лазерной несущей, после достижения которой ВРМБ лавинообразно нарастает:

$$P_{sbs} = \frac{21S_{эфф}}{g_B(\nu)L_{эфф}}, \quad (14)$$

где $S_{эфф}$ – эффективная площадь оптического волокна, $g_B(\nu)$ – максимальный бриллюеновский коэффициент усиления на центральной бриллюеновской частоте ν_B , $L_{эфф}$ – эффективная длина оптического волокна, $L_{эфф} = \frac{1-e^{\alpha L}}{\alpha}$. Рост интенсивности стоксовой волны характеризуется коэффициентом усиления при ВРМБ $g_B(\nu)$, максимальным при $\nu = \nu_B$ [42].

Для узкополосного источника излучения: $L_{эфф} = 20$ км, $g_B(\nu_B) = 3 \cdot 5 \cdot 10^{-11}$ м/Вт, $S_{эфф} = 85$ мкм², где α – коэффициент затухания лазерного излучения, находим $P_{SBS} = 1,5$ мВт.

Явление ВРМБ необходимо учитывать на практике, если мощность монохроматического пучка света в волокне превышает 2 дБм. Возникновение ВРМБ зависит от ряда факторов:

- от ширины линии лазерного источника (чем она шире, тем пороговый уровень выше);
- эффективной площади поперечного сечения волокна (чем она больше, тем лучше);
- длины волокна (в коротких линиях длиной до 10 км можно использовать в несколько раз большую мощность оптической несущей).

Для того, чтобы подавить ВРМБ в системах были разработаны следующие методы. Один из них заключается в быстрой (~50 кГц) модуляции лазерной несущей и размывании ее до частоты порядка 1 ГГц, что намного превышает полосу 30-60 МГц рассеиваемого назад излучения ВРМБ [41]. Применение такого метода позволяет повысить мощность лазерного излучения, подаваемого в длинные волоконные линии.

1.2.5 Модуляция задержки оптической несущей в волокне из-за изменения атмосферного давления, воздействия акустических колебаний и механических вибраций

Вариации атмосферного давления вызывают изменения механического напряжения в волокне, что приводит к изменениям его показателя преломления n и длины волоконной линии L . Изменение давления P во времени приводит к изменениям оптической длины волокна:

$$\frac{d(nL)_p}{dt} = \left(L \frac{dn}{dP} + n \frac{dL}{dP} \right) \frac{dP}{dt} \quad (15)$$

Коэффициенты dn/dP и dL/dP известны – они составляют $5 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$ и 10^{-11} м/Па соответственно [43, 44].

Анализ фактических данных изменения погоды в Московском регионе показывает, что максимальная скорость изменения атмосферного давления может достигать $0,01 \text{ Па/с}$. Для 100 км линии основной вклад в сдвиг частоты дает первое слагаемое в скобках выражения (15). При скорости изменения атмосферного давления $0,01 \text{ Па/с}$ сдвиг частоты сигнала на выходе 100 км линии в относительном выражении составит $5 \cdot 10^{-17}$, а для 200 км линии – $1 \cdot 10^{-16}$.

Воздействия на волокно быстрых акустических колебаний вызывает такое же быстрое изменение акустического давления на волокно, что приводит к модуляции его показателя преломления. Это приводит к уширению спектра оптической несущей и может привести к дополнительному джиттеру сигнала, принимаемого на удаленном конце линии. Если акустическая модуляция носит регулярный характер, то на выходе из линии сдвига среднего значения частоты

радиочастотного сигнала практически не будет, но увеличится кратковременная нестабильность его частоты.

Воздействие механических вибраций на волокно может быть аналогичным акустическим возмущениям. Но оно может быть существенно большим, так как механическое воздействие может искривлять волокно, что через механизм ПМД может приводить к скачкам времени распространения сигнала в волокне и скачкам частоты получаемого на конце линии радиочастотного сигнала.

1.2.6 Изменение оптической длины канала ВОЛС при изменении температуры

Вариации температуры среды, окружающей линию, будут изменять ее оптическую длину и, соответственно, путь пройденный эталонным сигналом до выхода из линии. Передаваемый на конец линии сигнал будет испытывать вариации задержки из-за изменения температуры среды. Снижение точности эталонных сигналов на выходе длинной линии из-за изменений температуры характерно как для коаксиальных, так и волоконно-оптических кабелей.

Рассмотрим распространение сигнала в оптическом кабеле. Временная задержка сигнала в оптическом волокне может быть измерена, например, с помощью оптического рефлектометра, и эта задержка может быть учтена при определении истинного положения переданного сигнала на шкале эталонного времени. Однако, как указано выше, серьезной проблемой является нестабильность задержки, обусловленная вариациями температуры. Рассмотрим уравнение для времени распространения τ сигнала в волокне:

$$\tau = L \cdot n / c , \quad (16)$$

где L – длина волокна, n – коэффициент преломления волокна и c – скорость света в вакууме. Вариацию $\Delta\tau$ задержки можно записать в виде:

$$\Delta\tau = \frac{L}{c} \frac{\partial n}{\partial T} + L\alpha \frac{n}{c} \Delta T + LD\Delta\lambda, \quad (17)$$

где ΔT – изменение температуры волокна, α – температурный коэффициент расширения, D – коэффициент хроматической дисперсии волокна, и λ – это длина волны лазера, излучение которого распространяется в волокне, $\Delta\lambda$ – сдвиг длины волны лазера при изменении температуры. В уравнении (17) с правой стороны первый член отвечает за температурную зависимость коэффициента преломления, второй – за температурное расширение волокна, третий – за хроматическую дисперсию волокна, и он характеризует изменение задержки сигнала при отклонении на $\Delta\lambda$ лазерной длины волны из-за изменения температуры лазера или по другой причине.

Первые два слагаемых описывают температурную чувствительность задержки распространения сигнала в волокне. Эту чувствительность обозначим коэффициентом $\dot{\alpha}_{КТЗ}$. Этот коэффициент измерен, $\dot{\alpha}_{КТЗ}$ для разных типов волокна (Таблица 3) [37]. В этой же таблице приведен коэффициент затухания оптических волокон разных типов. Следует отметить, что температурный коэффициент задержки сигнала в волокне для разных окон прозрачности волокна на длинах волн 1.31 мкм и 1.55 мкм практически одинаков.

Таблица 3 – Затухание и температурная чувствительность задержки распространения сигнала в оптическом волокне.

Тип волокна	Длина волны нм	Температурный коэффициент $\alpha_{КТЗ}$ пс/(км·К)	Затухание дБ/км
SMF–28	1550	36.80	0,20
SMF–28	1310	37.97	0,36
SMF–DS	1550	38.67	0,25
LEAF	1550	37.97	0,25

Для оценки воздействия третьего слагаемого в уравнении (17) можно считать, что $\Delta\lambda < 0,01\text{нм}$, так как это может быть реализовано для лазеров, оснащенных термоэлектрическим охладителем. И так как хроматическая дисперсия любого типа волокна имеет величину не более ~ 17 пс/нм·км, то изменение задержки в линии из-за хроматической дисперсии будет не более, чем 0.2 пс/км.

Все описанные в разделе 1.2 физические факторы, которые влияют на передаваемый сигнал, сведены для наглядности в таблицу (Таблица 4).

Таблица 4 - Влияние физических факторов на вариацию задержки передаваемого эталонного сигнала по волоконной линии

Факторы, оказывающие влияние на передачу ЭСЧВ в коротких и длинных ВОЛС	Характерный для этого фактора коэффициент	Методы ослабления действия возмущающего фактора
Затухание оптической несущей в волокне	Погонный коэффициент затухания 0,2 дБ/км для длины волны 1550 нм, 0,4 дБ/км для длины волны 1310 нм	Для компенсации ослабления оптической несущей в линию вводят промежуточные оптические

		усилители и оптические фильтры, которые устанавливаются через 60-100 км
Хроматическая дисперсия волокна	Для стандартного волокна 17 пс/нм·км для длины волны 1550 нм, для $\Delta\lambda < 0,01$ нм: $D\Delta\lambda = 0,2$ пс/км	Использование когерентных лазеров $\Delta\lambda < 0,01$ нм. Включение в состав передающей линии отрезков волокна с отрицательной дисперсией.
Поляризационно-модовая дисперсия волокна	0,2 пс/√км	Использовать современное волокно с низким коэффициентом ПМД. При прокладке оптоволоконных кабелей избегать их деформации и растяжения
Вынужденное рассеяние Мандельштама-Брюллиена в волокне	Вносит ограничение на мощность оптической несущей, отправляемой в волокно.	Мощность оптической несущей, отправляемой в волокно должна быть ≤ 2 дБм
Модуляция задержки оптической несущей в волокне из-за изменения атмосферного давления	В Московском регионе максимальная скорость изменения атмосферного давления может достигать <u>0,01 Па/с</u>	Сдвиг частоты сигнала на выходе <u>100 км</u> линии в относительном выражении составит $5 \cdot 10^{-17}$, а для <u>200 км</u> линии – $1 \cdot 10^{-16}$.
Температурная зависимость задержки сигнала в передающей и принимающей аппаратуре	Температурный коэффициент задержки сигнала α в комплексе аппаратуры, используемой для передачи ЭСЧ <u>40 пс/К</u> $\leq \alpha \leq 120$ пс/К	Помещение аппаратуры, расположенной на концах ВОЛС в термокамеры, в которых поддерживается температура в пределах $\pm 0,2$ К
Температурная зависимость задержки сигнала в волокне	Температурный коэффициент задержки сигнала в волокне <u>38 пс/К·км</u>	Использование методов пассивной и активной компенсации, ослабляющих влияние температурного фактора волокна
Стимулированное рассеяние Рамана	Вносит ограничение на мощность оптической несущей, отправляемой в волокно.	Мощность оптической несущей, отправляемой в волокно должна быть ≤ 25 дБм

Из таблицы можно сделать вывод (Рисунок 13) о том, что вариации задержки сигнала из-за изменений температуры волокна, характеризуемые коэффициентом $\dot{\alpha}_{КТЗ} = 38$ пс/(км·К) 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.

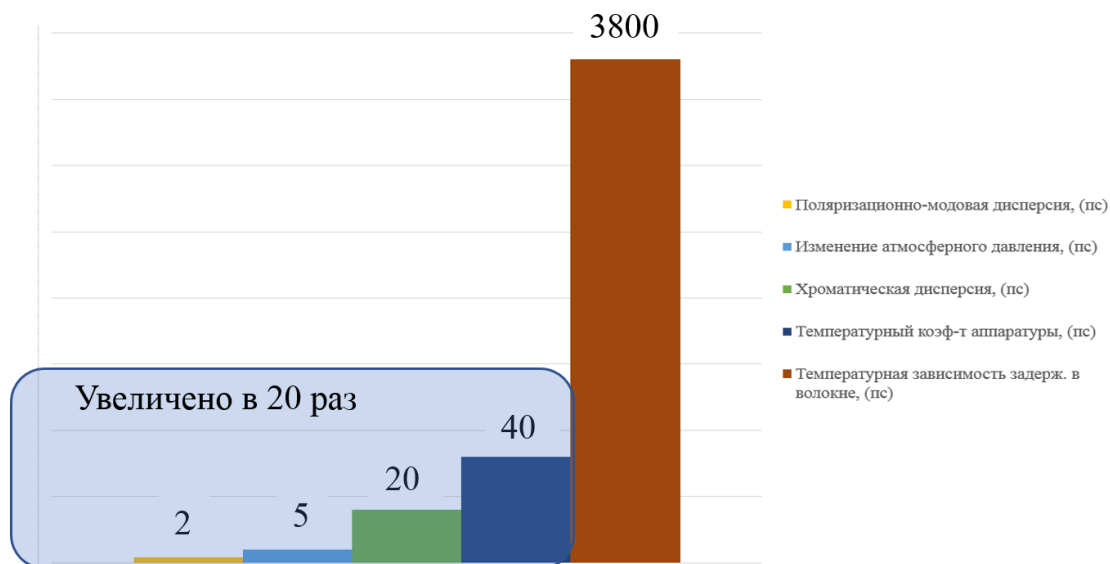


Рисунок 13. Влияние физических факторов на вариацию задержки передаваемого эталонного сигнала для 100 км линии при изменении температуры на 1 °C

1.3 Общая характеристика метода передачи ЭСЧ по ВОЛС без компенсации возмущений, вносимых линией

Чтобы передать высокостабильную оптическую частоту по каналу ВОЛС, можно использовать в качестве переносчика информации о частоте непосредственно непрерывное оптическое излучение, частота которого определяется оптическим стандартом.

Возможна также осуществить передачу информации о частоте по ВОЛС с помощью модуляции оптического сигнала радиочастотным эталонным сигналом. Частота модулирующего радиосигнала синтезируется на основе микроволнового

эталона или стандарта, а оптическое излучение служит несущей для эталонного РЧ сигнала.

Первый способ прямой передачи эталонной оптической частоты необходим для сличений оптических стандартов. А вторым способом можно передать эталонную радиочастоту посредством модуляции оптической при сличениях микроволновых стандартов.

Первый способ предъявляет высокие требования к спектральным характеристикам оптической несущей и требует использования фазовой модуляции передаваемого по каналу оптического сигнала. Применение фазовой модуляции при передаче высокостабильного сигнала оптической частоты обусловлено необходимостью функционирования устройств компенсации вносимых каналом ВОЛС шумов.

Во втором методе не предъявляются очень высокие требования к спектральным характеристикам оптической несущей.

Основным предметом исследований настоящей работы является передача по ВОЛС эталонных радиочастот, генерируемых водородными хранителями (мазерами), входящими в состав Государственного эталона времени и частоты (ГЭВЧ). Передаваемый эталонный радиочастотный сигнал синтезируется обычно в диапазоне от 5 до 1000 МГц на основе выходного сигнала микроволнового водородного стандарта.

На рисунке (Рисунок 14) представлена схема передачи эталонного сигнала без устройств компенсации. В этой схеме передаваемый эталонный сигнал частотой 100 МГц модулирует ток полупроводникового лазера с длиной волны $\lambda=1.5$ или 1.3 мкм.

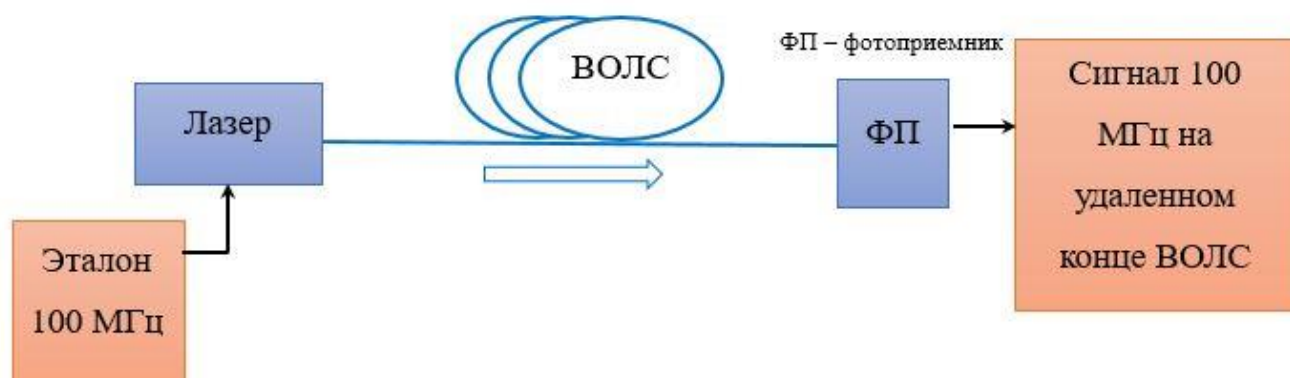


Рисунок 14. Схема передачи эталонного радиочастотного сигнала без устройств компенсации

Выбранная длина волны мало затухает в волокне. По ВОЛС распространяется модулированное по амплитуде излучение лазера, а на ее удаленном конце детектируется фотоприемником ФП. Фотоприемник преобразует амплитудно-модулированное оптическое излучение лазера в сигнал с частотой 100 МГц.

Использование ВОЛС для передачи эталонных радиочастотных сигналов в сравнении с передачей по радиочастотным коаксиальным кабелям дает в сотни раз меньшее затухание передаваемого радио или СВЧ сигнала. Стандартное оптическое волокно имеет коэффициент линейного температурного расширения в 15-20 раз меньший, чем у стандартного коаксиального кабеля.

Но следует отметить, что в процессе двойного радиооптического преобразования и распространения излучения в канале ВОЛС вносятся случайные и температурно-обусловленные возмущения фазы передаваемого эталонного сигнала, которые оказывают существенное влияние на характеристики сигнала, принимаемого на удаленном конце. Поэтому сигнал, принимаемый на ФП, имеет большую по сравнению с эталонным нестабильность частоты. Кроме того, из-за

медленных (суточных и сезонных) изменений температуры окружающей среды, эталонный сигнал в ВОЛС приобретает дрейфы фазы, что приводит к сдвигам значения частоты у принимаемого сигнала.

Таким образом, указанные выше физические факторы и ряд других, влияющих на канал связи из оптического волокна, возмущают фазу передаваемого эталонного сигнала, что приводит к ухудшению его метрологических характеристик. На конце линии нестабильность частоты принимаемого сигнала может увеличиться на несколько порядков, а среднее значение частоты существенно отклоняться от эталонного значения. В результате переданный по ВОЛС сигнал полностью теряет свои эталонные свойства. Но воздействие факторов, возмущающих фазу передаваемого эталонного сигнала, может быть существенно ослаблено, если в системе передачи ЭСЧВ по ВОЛС использовать специально разработанные устройства, компенсирующие вносимые волоконной линией возмущения.

1.3.1 Необходимость использования систем компенсации возмущений, вносимых ВОЛС при передаче по линии эталонных сигналов.

Оптические волокна являются лучшими для передачи оптических сигналов на большие расстояния, так как обладают гибкостью, отличными шумовыми характеристиками и слабым затуханием. Одним из основных факторов, определяющих качество передачи ЭСЧВ по ВОЛС, является температурный фактор, действие которого приводит к вариациям задержки сигнала при изменении температуры окружающей среды в местах размещения аппаратуры и волоконной линии. В результате фаза эталонного сигнала на удаленном конце линии будет испытывать медленные температурно-детерминированные вариации, а также

быстрые случайные флуктуации. Изменения фазы, обусловленные вариацией задержки передаваемого сигнала в промежуточных материальных средах и устройствах, приводят к увеличению нестабильности частоты эталонного сигнала на удаленном конце линии. Следует отметить, что быстрые случайные флуктуации за счет усреднения нивелируются при измерениях и практически не приводят к сдвигу среднего значения частоты. Но медленные температурные вариации - сезонные, суточные и из-за циклической работы систем кондиционирования, которые оказывают влияние как на саму оптическую линию, так и на передающую и принимающую оптоэлектронную аппаратуру, приводят к увеличению нестабильности передаваемой частоты и к сдвигу среднего значения частоты сигнала, принятого на конце линии.

Согласно выводам раздела 1.2, наибольший вклад в нестабильность частоты передаваемого эталонного сигнала вносят изменения задержки сигнала в волокне из-за вариаций температуры окружающей среды.

Изменения задержки распространения сигнала в ВОЛС ~ 6 км, протянутой в подземном телекоммуникационном канале, представлены на рисунке (Рисунок 15) [45].

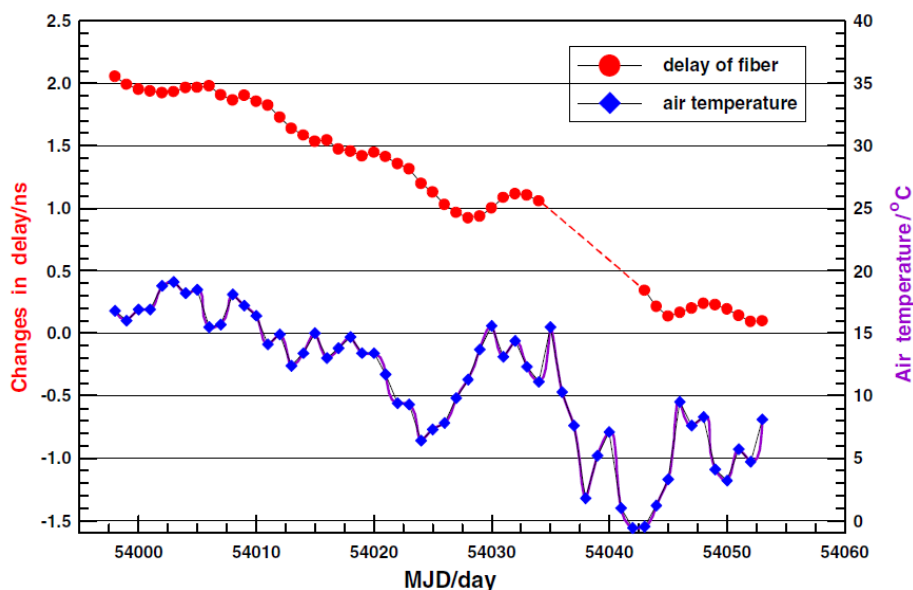


Рисунок 15. Зависимость изменения задержки распространения сигнала в волоконной линии (верхняя кривая) и изменение температуры воздуха на протяжении ~ 60 дней (нижняя кривая) [45]

Изменение температуры воздуха над поверхностью земли в течение суток почти не отражается в виде суточных «быстрых» изменений задержки в подземном кабеле, а медленные сезонные изменения температуры отчетливо видны.

В NASA (Калифорния) на территории приемо–передающего комплекса дальней космической связи были исследованы сезонные изменения температуры на различной глубине от поверхности земли [22, 23]. Исследования позволили сделать вывод о том, что суточное изменение температуры воздуха над поверхностью земли мало отражается на температуре под землей в независимости от глубины (Рисунок 15).

Размах изменения температур $\sim 18^\circ\text{C}$ на глубине 60 см под землей в течение полугода характерен для московского региона (Рисунок 16) [46].

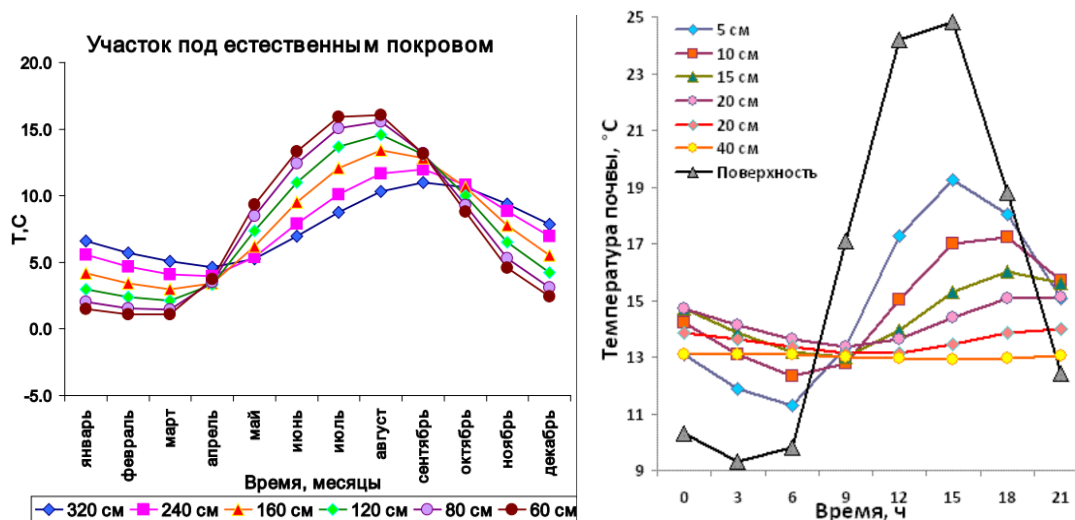


Рисунок 16. Годовой (слева) и суточный (справа) ход температуры грунта на разной глубине в Московской области [46]

Анализ результатов измерений (Рисунок 15) позволяет сделать вывод о том, что поверхностный слой земли, обладающий значительной теплоемкостью и относительно малой теплопроводностью, исполняет роль пассивного термостата, сглаживающего под землей вариации температуры над ее поверхностью.

Из графика (Рисунок 16) следует, что сезонное изменение температуры на глубине 3,2 м составляет 6°C . Таким образом, прокладывание ВОЛС на больших глубинах сезонные колебания температуры уменьшаются в несколько раз.

Так как тепловая волна с суточным циклом ослабляется с ростом глубины экспоненциально, то снижение суточных колебаний температуры в глубине грунта многократно больше. Для мокрого песка температуро-проводность составляет $7 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ [47], а характерная длина тепловой волны с суточным периодом порядка 0,25 м, таким образом, каждый полуметровый слой грунта ослабляет на порядок суточное колебание температуры воздуха над его поверхностью.

К подземному кабелю проникает медленная периодическая волна дневного повышения температуры, что приводит к модуляции фазы эталонного сигнала на

выходе из линии. Это вызывает ухудшение долговременной стабильности эталонного сигнала на выходе ВОЛС. В наибольшей степени это влияет на значение долговременной стабильности эталонного сигнала на интервалах времени измерения близких к полупериоду температурной волны.

Этот вывод можно подтвердить теоретически. Предположим, что модуляция осуществляется синусоидальной температурной волной. В таком случае долговременная нестабильность $\sigma_y(\tau)$ (СКДО - дисперсия Аллана) сигнала на выходе ВОЛС, подвергающегося фазовой модуляции из-за влияния медленной синусоидальной температурной волны, можно оценить на основании следующего выражения [48]:

$$\sigma_y(\tau) = \Delta T \cdot \frac{K_{TKЗ} \cdot n \cdot L}{c} \cdot \frac{\sin^2(\pi \tau \nu_0)}{\tau}, \quad (18)$$

где ΔT – полная амплитуда (размах) температурной волны в градусах, $K_{TKЗ} = \dot{\alpha}_{КТЗ}(c/n)$ – температурный коэффициент временной задержки сигнала в волокне, $\dot{\alpha}_{КТЗ} = 38$ пс/(км·К), $n = 1,465$ – показатель преломления волокна, L – длина оптического кабеля, c – скорость света в вакууме, τ – время измерения в секундах, ν_0 – частота температурной волны.

Выражение (18) достигает локального максимума, когда аргумент синуса равен $\pi/2$. Это соответствует тому, что при температурной волне с периодом в сутки на интервале измерения $\tau = 1/2$ суток будет максимум для девиации Аллана $\sigma_y(\tau)$.

1.3.2 Теоретические оценки погрешности передачи ЭСЧВ по ВОЛС в оптических и коаксиальных кабелях длиной ~ 1 км

На глубине $\sim 0,7$ метра вариации суточных изменений температуры кабеля, расположенного в подземном канале, составляют $0,5$ °С, а сезонные вариации изменений температуры для подземного кабеля ~ 20 °С. Таким образом, на кабель воздействуют две температурные волны: быстрая с суточным периодом, изменяющая температуру со скоростью до $\pm 0,5$ °С /сутки, и медленная (сезонная), вызывающая медленный дрейф температуры кабеля со среднесуточной скоростью до $\pm 0,15$ °С /сутки.

Приведенная теоретическая оценка девиации Аллана $\sim 4 \cdot 10^{-16}$ получаемой эталонной частоты на выходе 1 км оптического кабеля, которую можно получить на суточном интервале времени измерения, соответствуют результатам измерений (Рисунок 17) и экспериментальным данным, полученным группой исследователей из Франции [49].

Выполненные теоретические оценки и анализ экспериментальных результатов позволяют сделать следующие выводы.

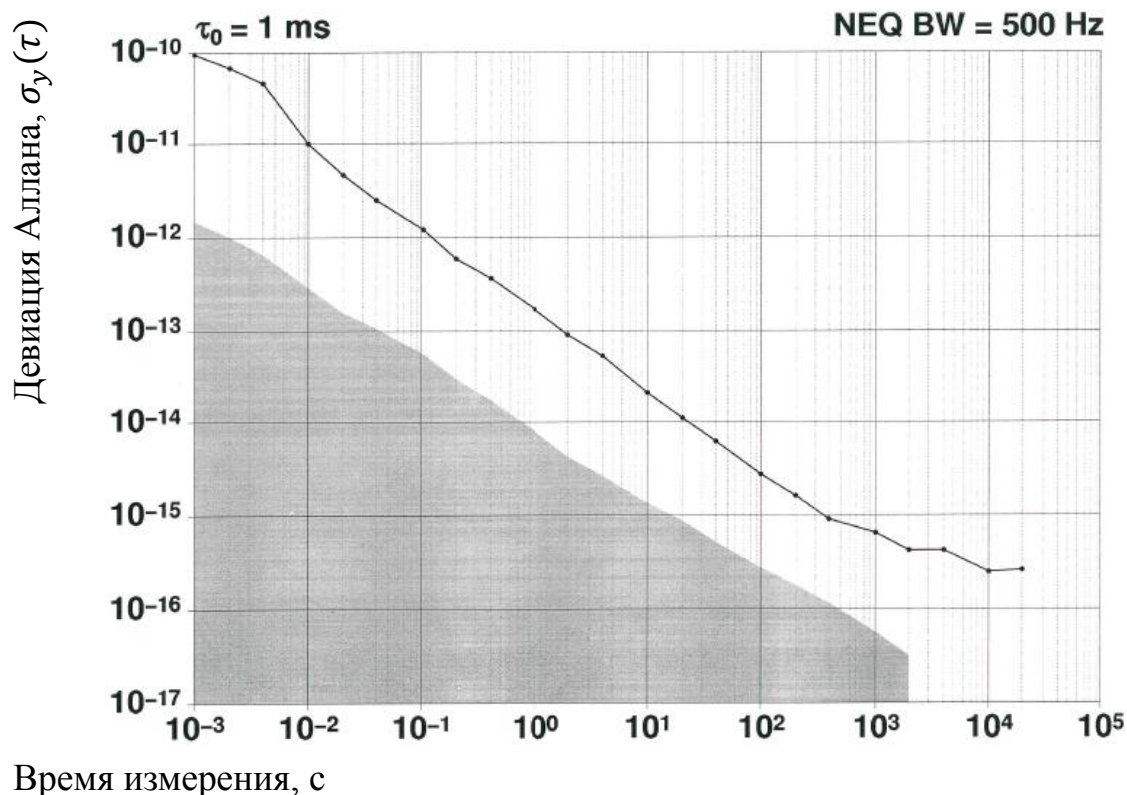


Рисунок 17. СКДО сигнала 100 МГц, переданного по 1 км ВОЛС без компенсации

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°C , а в течение года $\sim 40^\circ\text{C}$. 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 ~ 1 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 $1 \div 3$ градуса СКДО переданного сигнала будет на уровне $\sim 10^{-13}$ на суточном интервале времени измерения [50].

1.4 Выводы

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.

Глава 2. Методы компенсации, вносимых каналов ВОЛС возмущений фазы, передаваемого эталонного сигнала

Для того чтобы ослабить действие возмущающих факторов применяют пассивные и активные методы компенсации. Цель пассивных методов компенсации – улучшение физических характеристик оптоволокна или ослабление их влияния на передаваемый сигнал, а активные методы непосредственно воздействуют на фазу передаваемого ЭСЧ для коррекции возмущений, порождаемых ВОЛС.

2.1 Методы пассивной компенсации и область их применения при передаче эталонных радиочастотных сигналов по ВОЛС

Проведенные в последнее десятилетие в различных лабораториях и метрологических центрах исследования позволили разработать методы пассивной и активной компенсации, существенно ослабляющие влияние деградации эталонного сигнала по мере его распространения в ВОЛС. Применение этих методов обеспечивает передачу эталонных сигналов наилучших стандартов частоты на расстояния в сотни километров без потери их точности.

К методам пассивной компенсации можно отнести последовательное включение в оптическую линию отрезков волокна с отрицательной дисперсией, что ослабляет влияние хроматической дисперсии на форму импульса переданного сигнала. К этим же методам можно отнести и поляризационное скремблирование оптической несущей, что ослабляет влияние поляризационно-модовой дисперсии (PMD) на вариации временной задержки передаваемого по волокну эталонного сигнала.

Фаза принимаемого на выходе волоконной линии радиочастотного сигнала приобретает вандер и джиттер. Вандер – это медленные вариации времени прохождения сигнала по линии, и он в основном обусловлен температурными изменениями длины волокна. Джиттер – это быстрые вариации времени прохождения сигнала по линии, и он обусловлен механизмом поляризационно-модовой дисперсии (PMD) в оптическом волокне, усиливаемым акустическим и вибрационным воздействием окружающей среды.

При распространении импульсного оптического сигнала в волокне изменяется не только амплитуда, но и форма импульса - фронт его растягивается, импульс «расползается». Из факторов, влияющих на форму импульса, прежде всего, необходимо указать на хроматическую дисперсию - зависимость скорости распространения оптической волны в волокне от ее длины волны. Следующим, существенно влияющим на распространение сигнала в длинной волоконно-оптической линии фактором, является поляризационно-модовая дисперсия (PMD). Влияние хроматической дисперсии и PMD на распространяемый эталонный сигнал в волокне можно ослабить, применяя те или иные методы пассивной компенсации.

К методам пассивной компенсации можно отнести последовательное включение в оптическую линию отрезков волокна с отрицательной дисперсией, что ослабляет влияние хроматической дисперсии на форму импульса переданного сигнала. К этим же методам можно отнести и поляризационное скремблирование оптической несущей, что ослабляет влияние PMD на вариации временной задержки передаваемого по волокну эталонного сигнала.

При подаче лазерного излучения в оптическое волокно в нем генерируется дополнительное излучение из-за ВРМБ. С неупругим ВРМБ в оптическом волокне, также как и с упругим рассеянием Рэлея, необходимо бороться, так как оно детектируется фотоприемниками наряду с полезным сигналом и тем самым

оказывает влияние на фазу переданного на удаленный конец линии сигнала и ухудшают его отношение сигнал-шум.

В [51] описан метод пассивной компенсации, который может обеспечить в линиях длиной до нескольких километров высокий уровень точности передачи ЭСЧ даже без использования систем активной компенсации. Реализация такого метода пассивной компенсации основана на применении нового типа оптического волокна, особенность которого заключается в том, что оно покрыто специальным жидкокристаллическим полимером с отрицательным коэффициентом линейного расширения. В результате такое оптоволокно обладает температурным коэффициентом задержки сигнала в волокне на порядок меньшим, чем стандартное волокно SMF-28. В 2013 году появились сообщения фирмы Linden Photonic (Германия) о том, что ею изготавливается такое волокно по цене, экономически приемлемой для линий длиной порядка километра.

2.2 Принципы активной компенсации вносимых каналом ВОЛС возмущений фазы передаваемого эталонного сигнала

Получаемый на удаленном конце ВОЛС продетектированный сигнал не может быть непосредственно сличен с ЭСЧ, который подается на вход в линию. Но коррекция фазовых возмущений сигнала, которые накапливаются при его распространении по ВОЛС, должна осуществляться до подачи сигнала в линию. Поэтому необходима двунаправленная передача радиочастотного эталонного сигнала и выработка сигнала коррекции у входа в линию. Реализация принципа активной компенсации фазовых возмущений, вносимых каналом ВОЛС представлена на схеме (Рисунок 18).

В основе принципа компенсации лежит:

- а) двунаправленное (туда и обратно) распространение в прямом и обратном направлении эталонного сигнала в одном и том же оптическом волокне,
- б) предположение, что при прохождении в прямом и обратном направлении сигнал подвергается одинаковым возмущениям [52].

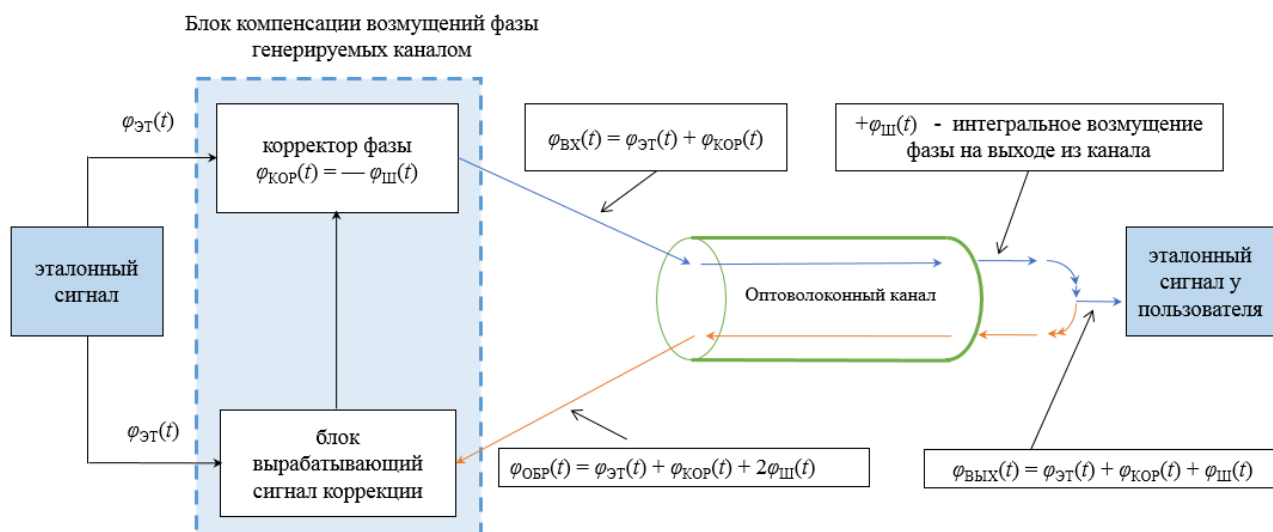


Рисунок 18. Схема, поясняющая принцип компенсации вносимых ВОЛС возмущений фазы передаваемого ЭСЧ

Коррекция фазы передаваемого ЭСЧ на величину $\varphi_{\text{кор}}$ для компенсации вносимого линией интегрального возмущения фазы может быть выполнена двумя способами: либо путем сдвига фазы фазовращателем модулирующего эталонного РЧ сигнала, либо путем изменения времени распространения оптического сигнала в волокне при помощи управляемой ОЛЗ. На рисунке (Рисунок 18) приведена схема коррекции для случая, когда сдвигается фаза РЧ эталонного сигнала. На выходе канала сигнал $A_{\text{вых}}(t)$, подвергшийся деградации, детектируется, и он будет равен:

$$A_{\text{вых}}(t) = A_0 \sin(\omega_{\text{ЭТ}} t + \varphi_{\text{ЭТ}} + \varphi_{\text{КОР}} + \varphi_{\text{Ш}}), \quad (19)$$

где $\omega_{\text{ЭТ}} = 2\pi f_{\text{ЭТ}}$, а $f_{\text{ЭТ}}$ - частота эталонного (радиочастотного) сигнала, $\varphi_{\text{ЭТ}}$ – начальная фаза эталонного сигнала, $\varphi_{\text{КОР}}$ - величина коррекции фазы корректором, $\varphi_{\text{Ш}}$ – интегральное шумовое возмущение фазы сигнала на выходе канала при прохождении им канала в одном направлении.

Радиочастотный сигнал, полученный на конце линии, после детектирования модулированного по амплитуде оптического излучения, разделяется на два. Одна часть - пользователю, а вторая – используется для формирования обратного оптического сигнала и передачи его к началу линии. Обратный (возвратившийся) оптический сигнал детектируется у входа в линию, и это дает РЧ сигнал, который несет информацию о вносимых линией возмущениях фазы. При сравнении фаз двух сигналов – эталонного и обратного у входа в канал вырабатывается сигнал коррекции $\varphi_{\text{КОР}}(t)$, который управляет устройством фазовой коррекции подаваемого в канал эталонного сигнала. Если будет выполнено условие:

$$\varphi_{\text{КОР}}(t) = -\varphi_{\text{Ш}}(t), \quad (20)$$

то шумовые возмущения фазы будут устранены в каждый момент времени t , и фаза радиочастотного сигнала (19), полученного после детектирования оптического амплитудно-модулированного излучения на удаленном конце канала, будет соответствовать эталонному сигналу [53].

С помощью устройств компенсации, работающих по описанному принципу, факторы, приводящие к вариациям фазы передаваемого по каналу ВОЛС эталонного сигнала, могут быть скомпенсированы. В результате акустические,

механические и температурные воздействия окружающей среды на оптоволоконную систему передачи будут значительно ослаблены.

2.3 Два основных метода компенсации, вносимых каналом ВОЛС возмущений фазы передаваемого эталонного сигнала

Для уменьшения погрешности передачи эталонных сигналов используют схемы активной компенсации вносимых линией возмущений. Как отмечено выше активная компенсация основана на двунаправленной передаче эталонного сигнала туда и обратно и выработке корректирующего сигнала, компенсирующего возмущения фазы эталонного сигнала порожденные ВОЛС. Существует два основных метода активной компенсации возмущений, вносимых ВОЛС. Первый – это метод электронной компенсации, второй – метод оптоэлектронной компенсации [32, 33, 34, 49].

Работа системы передачи ЭСЧВ, построенной по схеме активной электронной компенсации (Рисунок 19), заключается в следующем. Излучение двух лазеров ОТ, установленных на концах линии, распространяются встречно в оптоволоконной линии. Для разделения оптических сигналов, распространяющихся навстречу друг другу, используются оптические циркуляторы Ц.

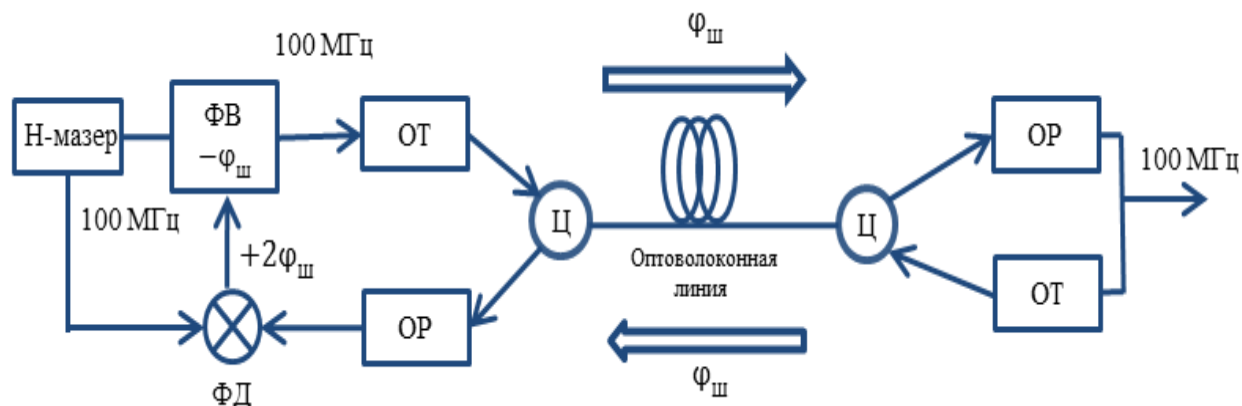


Рисунок 19. Упрощенная схема передачи эталонной частоты с электронной компенсацией возмущений, вносимых оптоволоконной линией. Ц – оптический циркулятор, ФВ – электронный фазовращатель, ФД – фотоприемники

Эталонный РЧ сигнал поступает на вход ВОЛС через электронный фазовращатель, сигнал коррекции для которого вырабатывается на фазовом детекторе ФД у входа в линию после сравнения фазы сигнала, пробежавшего туда и обратно с фазой эталона. Полученная таким образом интегральная шумовая фазовая ошибка $2\varphi_{ш}$ в два раза больше, чем величина возмущения фазы $\varphi_{ш}$ при пробеге эталонного сигнала по линии в одну сторону. Поэтому ошибка $2\varphi_{ш}$ делится на два, и пропорциональный ей сигнал с обратным знаком поступает на вход управления электронного фазовращателя, установленного перед началом оптической линии. Электронный фазовращатель корректирует фазу отправляемого в линию эталонного сигнала на величину $\varphi_{кор} = -\varphi_{ш}$. Таким образом, вносимые оптоволоконной линией возмущения фазы эталонного сигнала, передаваемого на удаленный конец ВОЛС, минимизируются, так как в полосе фазовой автоподстройки $\varphi_{ш} + \varphi_{кор} \rightarrow 0$.

Эффективным методом подавления возмущений, вносимых волокном, является прямое воздействие на оптическую среду канала связи. Исследования по

реализации данного метода были начаты более десяти лет назад в нескольких лабораториях JPL (NASA), LNR - SYRTE + LPL [22, 23, 24, 6]. Такой метод подавления возмущений фазы передаваемого по ВОЛС сигнала назван оптоэлектронной компенсацией. Работа схемы с активной оптоэлектронной компенсацией (Рисунок 20) строится на основе использования управляемой оптической линии задержки.

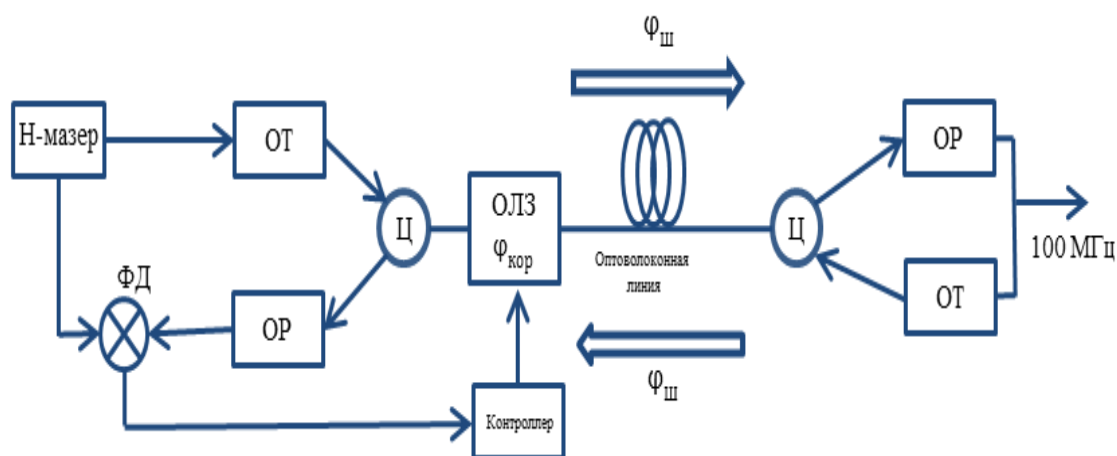


Рисунок 20. Упрощенная схема передачи эталонной частоты с оптоэлектронной компенсацией возмущений вносимых оптоволоконной линией

Сигнал фазовой ошибки, вырабатываемый на фазовом детекторе после сравнения фазы сигнала эталонной частоты с фазой сигнала, проделавшего путь в прямом и обратном направлении, управляет оптической длиной линии с помощью ОЛЗ. Вносимые ВОЛС возмущения фазы эталонного сигнала компенсируются с помощью изменения длины оптической линии, и в полосе автоподстройки частота сигнала, переданного на удаленный конец ВОЛС, соответствует с высокой точностью частоте эталонного сигнала.

Проведенные в нескольких лабораториях мира исследования подтверждают, что при использовании активных систем компенсации возможно передать эталонный сигнал частоты с СКДО на уровне $10^{-17} \dots 10^{-16}$ на суточном интервале

времени измерения в ВОЛС длиной от километра до нескольких десятков километров.

Для решения основной задачи диссертации требуется создать систему передачи с линией длиной более 100 км. В такой системе передачи для компенсации сезонных изменений задержки в 100 км волоконной линии необходим диапазон перестройки ~ 100 нс. Реализовать такой диапазон перестройки с помощью ОЛЗ затруднительно. В работе [53, 54] была использована ОЛЗ на основе температурно-управляемой 8 км катушки волокна, которая могла обеспечить диапазон регулирования 10 нс. Такого диапазона регулировки недостаточно и требуется увеличение длины линии в катушке ОЛЗ, что, в свою очередь, приводит к очень малому быстродействию системы фазовой автоподстройки (для катушки ОЛЗ 8 км – 1 Гц).

С учетом того, что схема (Рисунок 21) с оптоэлектронной компенсацией возмущений, вносимых оптоволоконной линией, не обладает достаточным диапазоном регулирования и компенсация в ней осуществляется с малым быстродействием, был сделан вывод, что для решения основной задачи диссертации данная схема является неподходящей. И в диссертационной работе была разработана и исследовалась система передачи ЭСЧ, построенная по схеме активной электронной компенсации.

2.4 Различные реализации метода электронной компенсации при передаче ЭСЧ по ВОЛС

В схемах с активной электронной компенсацией могут использоваться в качестве компенсационного устройства перестраиваемые по частоте кварцевые генераторы (Рисунок 19) или управляемые ЭЛЗ (Рисунок 21). Коррекция фазы

передаваемого эталонного сигнала на величину $\varphi_{\text{КОР}}$ для компенсации вносимого линией интегрального возмущения фазы эталонного сигнала может быть выполнена двояко: либо путем сдвига фазовращателем фазы радиочастотного сигнала эталонной частоты, либо путем изменения задержки передаваемого сигнала электронной линией задержки. И то и другое приводит к сдвигу фазы эталонного сигнала на выходе корректора, устанавливаемого перед оптическим транмиттером ОТ у входа в линию.

Имеющиеся на рынке микросхемы с линиями задержки управляются цифровым сигналом и перестраиваются дискретными шагами. При малом шаге перестройки ~ 10 пс они имеют диапазон перестройки до 10 нс. Этого недостаточно для компенсации сезонных изменений задержки в 100 км волоконной линии. Для реализации эффективного фазовращателя для 100 км линии необходимо, чтобы шаг перестройки был ниже 10 пс, а диапазон перестройки был ~ 100 нс.

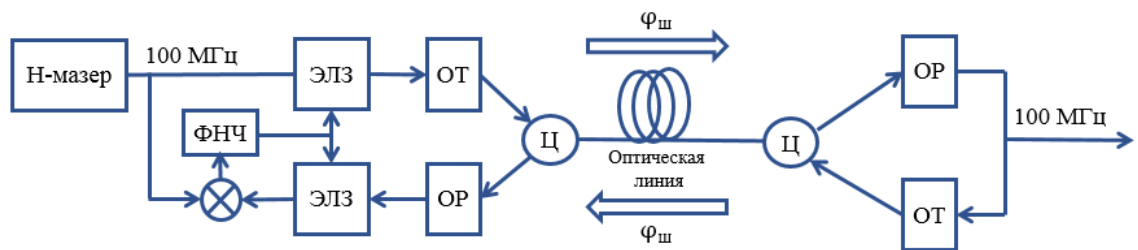


Рисунок 21. Упрощенная схема передачи эталонной частоты 100 МГц с электронной компенсацией возмущений, вносимых оптоволоконной линией. ЭЛЗ – две комплементарные управляемые оптические линии задержки, ФНЧ – фильтр нижних частот

Можно попытаться использовать управляемые механические линии задержки тромбонного типа. Но они медленно перестраиваются и достаточно быстро изнашиваются в месте механического контакта ламелей в «коаксиальном

тромбоне» [53]. Внешний вид (Рисунок 22) перестраиваемой линии задержки тромбонного типа фирмы Colby Instruments. Inc.



Рисунок 22. Внешний вид перестраиваемой линии задержки PDL-100A [55]

Успехов в реализации схемы электронной компенсации (Рисунок 21) добились исследователи из Польши [8]. Они инициировали создание опытных образцов специального микрочипа, который в одном кристалле содержал две аналоговые управляемые 100 нс линии задержки и цифровой фазовый детектор. Так как две линии задержки с диапазоном регулирования 100 нс были выполнены в одном кристалле, то они обладали симметрией задержек в каждом канале. Для схемы, представленной выше, авторами работы [8, 56] были проведены экспериментальные измерения при передаче сигналов времени на 20 км, 60 км, а затем и на 420 км по «темной» жиле подземного телекоммуникационного кабеля [56]. Погрешность передачи эталонной частоты в эксперименте оценена авторами на уровне $4 \cdot 10^{-17}$.

Следует отметить, что схема компенсации (Рисунок 21) имеет недостаток. Управляемые электронные линии задержки порождают дополнительный джиттер

передаваемого сигнала. И для получения удовлетворительной кратковременной стабильности сигнала необходимо разрабатывать и включать в систему передачи специальные электронные устройства, снижающие джиттер переданного на удаленный конец линии эталонного сигнала.

Анализ экспериментов различных лабораторий и исследования, выполненные в рамках диссертационной работы, позволили сделать следующий вывод. Для решения задачи сличения по ВОЛС частот водородных хранителей трех эталонов - ГЭВЧ, ЦС ГЛОНАСС и вторичного эталона, расположенных в Московском регионе на расстоянии до 200 км, необходимо создать систему передачи ЭСЧ по ВОЛС с асимметричной электронной компенсацией, в которой в качестве компенсационного устройства используется перестраиваемый по частоте кварцевый генератор.

2.5 Асимметричная схема электронной компенсации при передаче ЭСЧ по ВОЛС

Сотрудники JPL (NASA) [7] предложили схему (Рисунок 23), развивающую идею (Рисунок 19). В качестве фазовращателя в ней применяется система ФАПЧ вспомогательного кварцевого генератора, установленного на передающей стороне.

В этой схеме (Рисунок 23) динамичная фазовая коррекция обеспечивается с помощью управляемого по частоте кварцевого генератора на 100 МГц. Сигнал этого кварцевого генератора с круговой частотой $\omega_{\text{КГ}}$ модулирует оптическое излучение лазерного диода, и в этой схеме частота и фаза входного сигнала равны частоте и фазе кварцевого генератора $\omega_{\text{ВХ}} = \omega_{\text{КГ}}$, $\varphi_{\text{ВХ}} = \varphi_{\text{КГ}}$. На основе эталонного сигнала с частотой $\omega_{\text{ЭТ}}$ и фазой $\varphi_{\text{ЭТ}}$ синтезируются два опорных радиочастотных сигнала с частотами $(1 + 1/10)\omega_{\text{ЭТ}}$ и $(1 - 1/10)\omega_{\text{ЭТ}}$. Каждый из этих двух опорных

сигналов на смесителях смешивается - первый с входным сигналом $\omega_{ВХ}$, а второй с сигналом $\omega_{ОБР}$, пробежавшим по линии туда и обратно. На выходе смесителей получаются два сигнала с частотами $(1/10)\omega_{ЭТ}$. Их сравнение на фазовом детекторе дает сигнал ошибки, который фильтруется в ФНЧ и управляет частотой кварцевого генератора. При замкнутой петле обратной связи стабильность и точность эталонного сигнала передается на выходной конец оптического канала, так как реализуется в среднем соотношение фаз такое, что $\varphi_{ВХ} = \varphi_{ЭТ} - \varphi_{Ш}$ и $\varphi_{ВЫХ} = \varphi_{ЭТ}$.

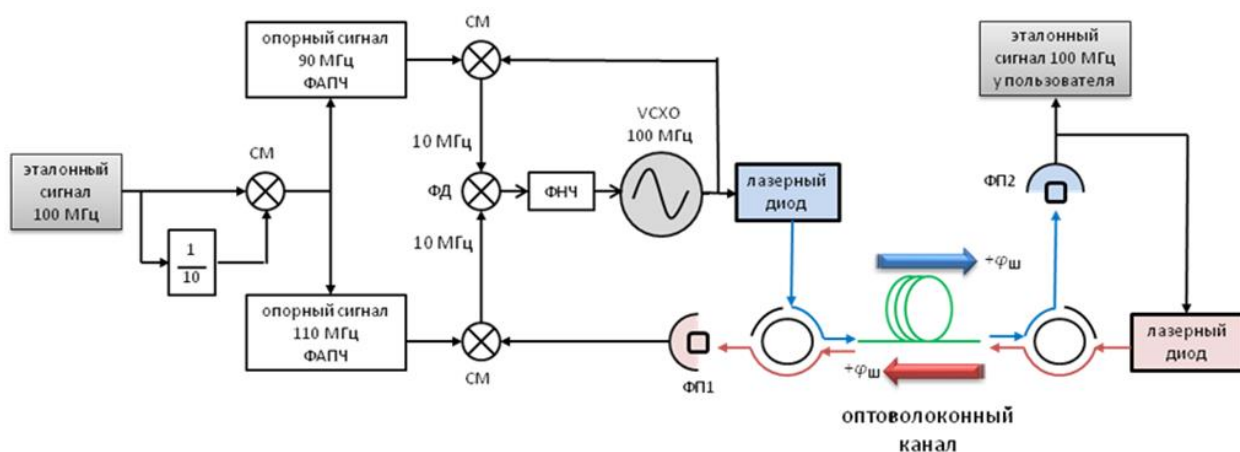


Рисунок 23. Упрощённая схема передачи сигнала эталонной частоты по ВОЛС с электронной компенсацией возмущений фазы эталонного сигнала вносимых линиями [7]

Рассмотрим, как достигаются эти соотношения фаз в схеме (Рисунок 23).

Продетектированный фотоприемником ФП2 на удаленном конце оптического кабеля сигнал $V_{вых}(t)$ после одного пробега пропорционален:

$$V_{ВЫХ}(t) \propto \sin(\omega_{КГ}t + \varphi_{КГ} + \varphi_{Ш}), \quad (21)$$

Обратно вернувшийся оптический сигнал $V_{обр}(t)$, испытавший такое же фазовое возмущение на обратном пути, после детектирования фотоприемником ФП1 у начала канала будет иметь вид:

$$V_{ОБР}(t) \propto \sin(\omega_{КГ}t + \varphi_{КГ} + 2\varphi_{Ш}). \quad (22)$$

Один из сигналов частотой 10 МГц, который получается на выходе верхнего смесителя и подается на фазовый детектор, имеет вид:

$$V_1(t) \propto \sin[(\omega_{КГ} - 2\pi \cdot 90\text{МГц})t + \varphi_{КГ} - \frac{9}{10}\varphi_{ЭТ}]. \quad (23)$$

Второй сигнал частотой 10 МГц, который получается на выходе нижнего смесителя и также подается на фазовый детектор, имеет вид:

$$V_2(t) \propto \sin[(2\pi \cdot 110\text{МГц} - \omega_{КГ})t - \varphi_{КГ} - 2\varphi_{Ш} + \frac{11}{10}\varphi_{ЭТ}]. \quad (24)$$

При перемножении этих двух 10 МГц сигналов на фазовом детекторе их фазы вычитаются, и получается сигнал ошибки $V_{ош}(t)$ пропорциональный:

$$V_{ОШ}(t) \propto 2\varphi_{КГ} + 2\varphi_{Ш} - \frac{20}{10}\varphi_{ЭТ} \quad (25)$$

При работающей системе фазовой автоподстройки частоты этот сигнал ошибки обнуляется и из этого следует, что выполняется соотношение фаз:

$$\varphi_{КГ} = \varphi_{ЭТ} - \varphi_{Ш}. \quad (26)$$

При пробеге сигнала по каналу в одну сторону к фазе входного сигнала $\varphi_{\text{ВХ}} = \varphi_{\text{КГ}} = \varphi_{\text{ЭТ}} - \varphi_{\text{Ш}}$ добавляется шумовая добавка $\varphi_{\text{Ш}}$, порождаемая каналом, и на выходе канала получаем фазу

$$\varphi_{\text{ВЫХ}} = \varphi_{\text{ЭТ}}, \quad (27)$$

которая равна фазе $\varphi_{\text{ЭТ}}$ эталонного сигнала.

Схема (Рисунок 23) была реализована для линии длиной 86 км, что недостаточно для решения основной задачи диссертации. Также следует отметить, что в схему можно внести изменения, которые могут улучшить фильтрацию быстрых возмущений фазы сигнала, проделавшего по линии путь «туда и обратно».

2.6 Описание системы передачи ЭСЧ по ВОЛС с асимметричной электронной компенсацией

Была разработана схема передачи 100 МГц ЭСЧ по 100 км ВОЛС с системой асимметричной электронной компенсации (Рисунок 24). В этой схеме фазовая коррекция передаваемого сигнала обеспечивается с помощью управляемого по частоте кварцевого генератора КГ1 на 100 МГц.

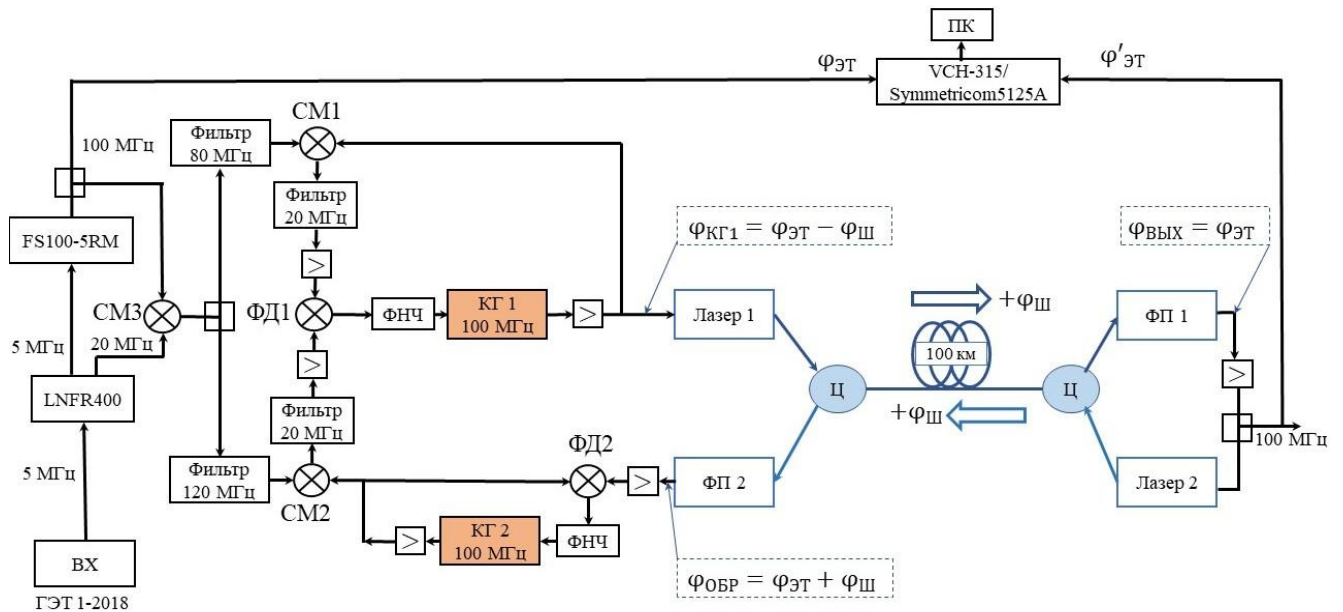


Рисунок 24. Схема системы передачи 100 МГц ЭСЧ по 100 км ВОЛС с системой асимметричной электронной компенсации

В этой схеме также применен следящий фильтр с полосой порядка ~ 300 Гц для подавления «быстрых» фазовых шумов сигнала 100 МГц, пробежавшего по линии «туда и обратно». Этот фильтр реализован на основе ФАПЧ дополнительного кварцевого генератора КГ2 на 100 МГц по сигналу, пробежавшему «туда и обратно». Кроме прочего, следящий фильтр на основе ФАПЧ снижает влияние паразитной модуляции амплитуды сигнала, сделавшего по линии путь «туда и обратно». Следует также отметить, что после введения в схему генератора КГ2 режим работы смесителей СМ1 и СМ2 стал практически одинаков, так как уровни шумов сигналов, поступающих на них от КГ1 и КГ2, стали близки. Это придало схеме дополнительную симметрию, что привело к ослаблению влияния температурного фактора на формирование смесителями СМ1 и СМ2 двух 20 МГц сигналов, разность фаз которых на ФД1 дает сигнал ошибки для системы компенсации.

Динамичная фазовая коррекция обеспечивается в схеме с помощью управляемого по частоте кварцевого генератора КГ1 на 100 МГц. Сигнал КГ1 с круговой частотой $\omega_{КГ}$ модулирует оптическое излучение лазерного диода, излучение которого поступает в линию. Частота и фаза сигнала на входе в линию равны: $\omega_{ВХ} = \omega_{КГ}$, $\varphi_{ВХ} = \varphi_{КГ}$.

На основе эталонного сигнала с частотой $\omega_{ЭГ} = 100$ МГц синтезируются два опорных радиочастотных сигнала с частотами $(1 + 2/10)\omega_{ЭГ}$ и $(1 - 2/10)\omega_{ЭГ}$. Каждый из этих двух опорных сигналов на смесителях смешивается - первый с сигналом КГ1, соответствующим $\omega_{ВХ}$, а второй с отфильтрованным сигналом КГ1, пробежавшим по линии «туда и обратно» $\omega_{ОБР}$. На выходе смесителей получаются два сигнала с частотами близкими к 20 МГц. Их сравнение на фазовом детекторе дает сигнал ошибки, который фильтруется в ФНЧ и управляет частотой кварцевого генератора КГ1.

Покажем, что при работающей ФАПЧ фаза сигнала на удаленном конце линии будет соответствовать фазе $\varphi_{ЭГ}$ эталонного сигнала, так как реализуется в среднем соотношение фаз такое, что $\varphi_{ВХ} = \varphi_{ЭГ} - \varphi_{Ш}$ и $\varphi_{ВЫХ} = \varphi_{ЭГ}$. Продетектированный фотоприемником на удаленном конце оптического кабеля сигнал $V_{ВЫХ}(t)$ после одного пробега пропорционален:

$$V_{ВЫХ}(t) \propto \sin(\omega_{КГ}t + \varphi_{КГ} + \varphi_{Ш}). \quad (28)$$

Обратно вернувшийся сигнал $V_{ОБР}(t)$, испытавший такое же фазовое возмущение на обратном пути, после детектирования фотоприемником ФП1 у начала канала будет иметь вид:

$$V_{ОБР}(t) \propto \sin(\omega_{КГ}t + \varphi_{КГ} + 2\varphi_{Ш}). \quad (29)$$

Один из сигналов частотой 20 МГц, который получается на выходе верхнего смесителя и подается на фазовый детектор, имеет вид:

$$V_1(t) \propto \sin[(\omega_{\text{КГ}} - 2\pi \cdot 80 \text{ МГц})t + \varphi_{\text{КГ}} - \frac{8}{10}\varphi_{\text{ЭГ}}]. \quad (30)$$

Второй сигнал частотой 20 МГц, который получается на выходе нижнего смесителя и также подается на фазовый детектор, имеет вид:

$$V_2(t) \propto \sin[(2\pi \cdot 120 \text{ МГц} - \omega_{\text{КГ}})t - \varphi_{\text{КГ}} - 2\varphi_{\text{Ш}} + \frac{12}{10}\varphi_{\text{ЭГ}}]. \quad (31)$$

При перемножении этих двух 20 МГц сигналов на фазовом детекторе их фазы вычитаются, и получается сигнал ошибки $V_{\text{ош}}(t)$ пропорциональный

$$V_{\text{ош}}(t) \propto 2\varphi_{\text{КГ}} + 2\varphi_{\text{Ш}} - \frac{20}{10}\varphi_{\text{ЭГ}}. \quad (32)$$

При работающей системе ФАПЧ этот сигнал ошибки обнуляется, и из этого следует, что выполняется соотношение фаз:

$$\varphi_{\text{КГ}} = \varphi_{\text{ЭГ}} - \varphi_{\text{Ш}}. \quad (33)$$

При пробеге сигнала по волоконно-оптическому каналу в одну сторону к фазе входного сигнала $\varphi_{\text{ВХ}} = \varphi_{\text{КГ}} = \varphi_{\text{ЭГ}} - \varphi_{\text{Ш}}$ добавляется шумовая добавка $\varphi_{\text{Ш}}$, порождаемая каналом, и на выходе канала получаем фазу $\varphi_{\text{ВЫХ}}$, которая будет соответствовать фазе $\varphi_{\text{ЭГ}}$ эталонного сигнала 100 МГц, то есть:

$$\varphi_{ВЫХ} = \varphi_{ВХ} + \varphi_{Ш} = \varphi_{ЭТ}. \quad (34)$$

Следовательно, вносимые линией шумовые возмущения фазы $\varphi_{Ш}$ передаваемого сигнала будут устранены электронной системой компенсации.

Ниже представлено описание узлов предложенной схемы.

2.6.1 Узлы системы передачи ЭСЧ по ВОЛС

На рисунке (Рисунок 25) представлены основные узлы системы передачи ЭСЧ по ВОЛС и их функциональные связи.

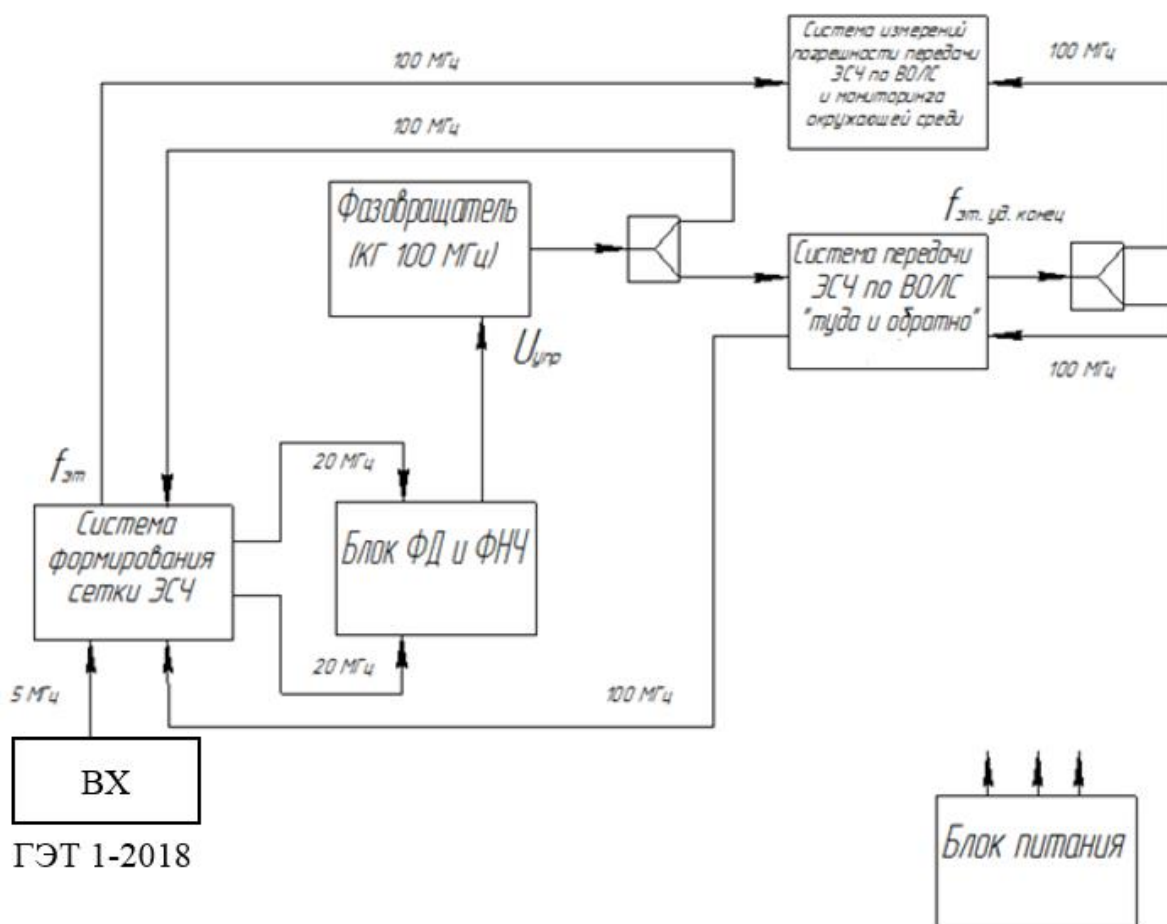


Рисунок 25. Функциональная схема системы передачи ЭСЧ по ВОЛС

Система передачи состоит из следующих основных узлов:

- водородного хранителя из состава ГЭТ 1-2018;
- системы формирования сетки ЭСЧ (ФСЭСЧ), которая обеспечивает формирование ряда эталонных сигналов, в том числе, 5 МГц, 20 МГц, 100 МГц с высокими спектральными характеристиками, а также синтезирует два основных опорных сигнала 120 МГц и 80 МГц, которые необходимы для выработки в блоке ФД и ФНЧ сигнала коррекции фазы КГ-100;
- фазовращателя на основе 100 МГц кварцевого генератора КГ-100;
- системы передачи ЭСЧ по ВОЛС «туда и обратно»;
- системы измерений погрешности передачи ЭСЧВ по ВОЛС и мониторинга окружающей среды;
- блока питания;
- блока ФД и ФНЧ, который сравнивает фазы отправляемого в ВОЛС радиочастотного сигнала и сигнала, пробежавшего по ВОЛС на дальний конец линии и обратно. При сравнении фаз вырабатывается сигнал ошибки, который в блоке ФД и ФНЧ фильтруется, а затем подается на вход управления 100 МГц кварцевого генератора, что обеспечивает коррекцию фазы сигнала, отправляемого в ВОЛС и, соответственно, компенсацию вносимых волоконной линией возмущений фазы переданного на удаленный конец линии эталонного сигнала.

Ниже приведено описание основных узлов.

2.6.2 Формирователь сетки ЭСЧ – система ФСЭСЧ

Для передачи 100 МГц сигнала по ВОЛС с электронной компенсацией возмущений, вносимых ВОЛС, необходимо синтезировать на основе

поступающего от ВХ ГЭТ 1-2018 сигнала 5 МГц ряд других более высокочастотных опорных сигналов.

В состав ФСЭСЧ входят (Рисунок 26):

- 1 - малошумящий генератор Spectra Dynamics LNFR-400 [57];
- 2 - умножитель частоты Spectra Dynamics FS100-RM-5 [58];
- 3- сплиттер - разделитель радиочастотного сигнала 100 МГц;
- 4, 9, 10 – радиочастотные смесители;
- 5, 6, 7, 8, 11,12- полосовые фильтры ПФ на 80, 120 и 20 МГц;
- 13,14 - радиочастотные усилители.

Общий вид формирователя ФСЭСЧ (Рисунок 27), схема ФСЭСЧ (Рисунок 26) и фото части формирователя ФСЭСЧ без генератора LNFR-400 и умножителя FS100-RM-5 (Рисунок 28).

ФСЭСЧ обеспечивает формирование ряда опорных эталонных сигналов с высокими спектральными характеристиками, из которых для работы необходимы сигналы 5 МГц, 20 МГц, 100 МГц, 80 МГц и 120 МГц. Синтез этих сигналов должен осуществляться так, чтобы термодинамические факторы окружающей среды в минимальной мере оказывали влияние на точность воспроизведения этого ряда опорных частот. Необходимо, чтобы термодинамические факторы не приводили к относительному «разбегу фаз» синтезируемых сигналов, так как это ухудшает точность компенсации возмущений, вносимых ВОЛС. Особенно высокие требования предъявляются к спектральным характеристикам и постоянству сдвига фаз двух основных синтезируемых опорных сигналов 120 МГц и 80 МГц. Вариации фаз этих двух опорных сигналов влияет на точность работы схемы электронной компенсации возмущений, вносимых линией. Отметим, что погрешность передачи ЭСЧ на конец ВОЛС не может быть меньшей, чем погрешность воспроизведения частот этих двух опорных сигналов.

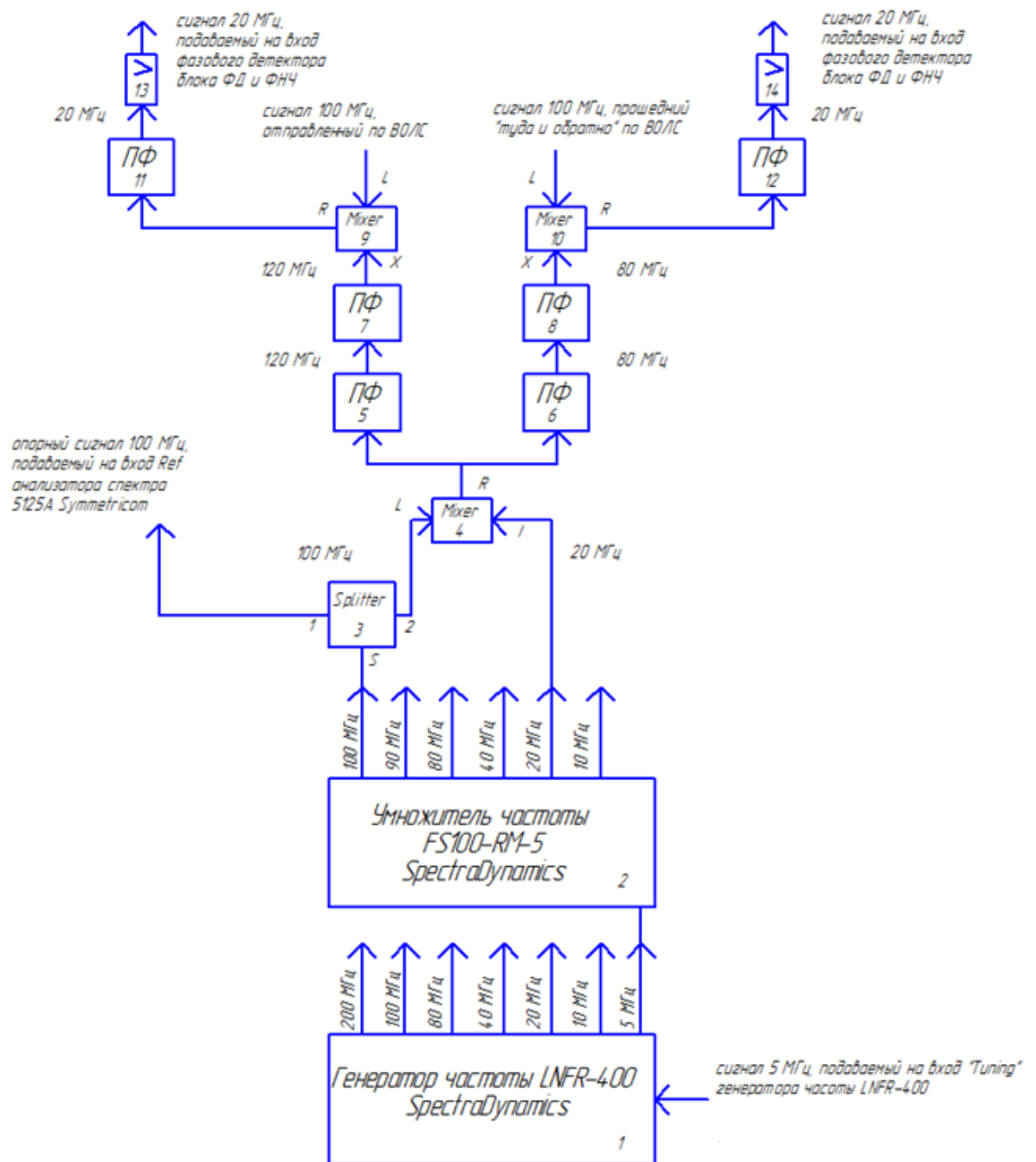


Рисунок 26. Схема ФСЭСЧ - формирователя сетки ЭСЧ



Рисунок 27. Общий вид формирователя ФСЭСЧ



Рисунок 28. Фото части формирователя ФСЭСЧ без генератора LNFR-400 и умножителя FS100-RM-5

В ФСЭСЧ использован сплиттер (разделитель ВЧ сигнала 100 МГц на два направления), который, являясь пассивным прибором, менее чувствителен к изменениям термодинамических факторов окружающей среды, чем активный буферный усилитель, имеющий несколько параллельных выходов. В то же время,

сплиттер обеспечивает достаточную развязку ~ 30 дБ между его выходами и входом, а также между его выходами.

В ФСЭСЧ частоты двух основных опорных сигналов, частоты которых должны быть симметрично расположены относительно передаваемой по ВОЛС эталонной частоты 100 МГц, были выбраны величиной 80 МГц и 120 МГц. В ФСЭСЧ при формировании основных опорных частот были применены полосовые фильтры на 120 МГц и 80 МГц. Следует отметить, что изменение термодинамических факторов среды в наибольшей степени влияет на фазы формируемых основных опорных сигналов именно через воздействие на фильтры, так как фаза сигнала на выходе фильтра в большей степени, чем у других элементов, зависит от изменения температуры. Поэтому необходимо использовать фильтры с малым температурным коэффициентом сдвига центральной частоты пропускания, а потому они не должны быть узкополосными, но в тоже время обеспечивали бы подавление нежелательных спектральных составляющих в синтезированном сигнале.

В ФСЭСЧ были использованы фильтры с полосой пропускания (на уровне -3 дБ) порядка 5 МГц. Исследования показали, что применение в ФСЭСЧ, например, двух фильтров на 20 МГц с полосой пропускания ~ 1 МГц приводило к увеличению на интервалах времени измерения больших часа нестабильности частоты двух 20 МГц сигналов, синтезируемых с помощью ФСЭСЧ. Такое увеличение нестабильности синтезируемых ФСЭСЧ сигналов на уровне $\sim 10^{-16}$ было результатом воздействия вариаций температуры окружающей среды в пределах $\pm 0,5^\circ\text{C}$ на фильтры с полосой пропускания ~ 1 МГц. Использование более широкополосных фильтров с полосой пропускания ~ 5 МГц улучшило долговременную нестабильность частоты синтезированных ФСЭСЧ сигналов в несколько раз.

2.6.3 Система передачи ЭСЧ по ВОЛС «туда и обратно»

Система двунаправленной передачи ЭСЧ по волоконной линии длиной до 100 км состоит из следующих основных устройств:

- оптических трансмиттеров и ресиверов;
- оптической волоконной линии;
- оптических изоляторов и циркуляторов;
- электронных усилителей и аттенюаторов.

Оптические трансмиттеры и ресиверы

При передаче по ВОЛС эталонных радиочастотных сигналов на концах волоконной линии устанавливаются электрооптические преобразователи - трансмиттеры и ресиверы, которые обеспечивают преобразование радиочастотного сигнала на уровень оптической несущей и обратно.

Следует отметить, что на точность передачи эталонных частот оказывает влияние не только волоконно-оптическая линия, но и трансмиттеры и ресиверы. Фактором, который непосредственно оказывает влияние на точность передачи, является зависимость задержки передаваемого сигнала в трансмиттере и ресивере от температуры в помещении, где они находятся. Изменение температуры в помещении приводят к вариациям фазы сигнала после прохождения им трансмиттера и ресивера, а, следовательно, будут наблюдаться отклонения частоты от эталонного значения у сигнала, получаемого на удаленном конце линии.

В системе передачи применены оптические трансмиттеры фирмы Linear Photonics, в которых используются полупроводниковые DFB-лазеры, имеющие достаточно узкую оптическую несущую – 100 МГц. Если необходимо передавать эталонный сигнал на расстояния более 30 км, то следует отдавать предпочтение трансмиттерам на длину волны 1,55 мкм, так как на этой длине волны волокно

имеет меньшее затухание. Для более коротких линий предпочтительней выбирать трансмиттеры на длину волны 1,31 мкм, так как на этой длине волны меньше коэффициент хроматической дисперсии, а большее затухание сигнала на такой длине волны является несущественным фактором в случае коротких линий.

Оптическая волоконная линия

В качестве волоконно-оптической линии применены катушки оптического волокна фирмы Optilab и M2Optics общей длиной более 100 км. Катушки выполнены из стандартного волокна SMF-28, которое практически повсеместно используется в магистральных оптических кабелях.

Оптические изоляторы и циркуляторы

В системе передачи использованы двухступенчатые оптические изоляторы и оптические циркуляторы фирмы General Photonics с шириной полосы ± 20 нм и обратными потерями 50 дБ.

Электронные усилители и аттенюаторы

Использованы электронные усилители и аттенюаторы фирмы Mini Circuits, которые необходимы для получения необходимых уровней передаваемого эталонного сигнала в соответствующих местах системы передачи ЭСЧ по ВОЛС туда и обратно. На фото (Рисунок 29) представлен внешний вид системы передачи ЭСЧ «туда и обратно» по волоконной линии длиной до 100 км

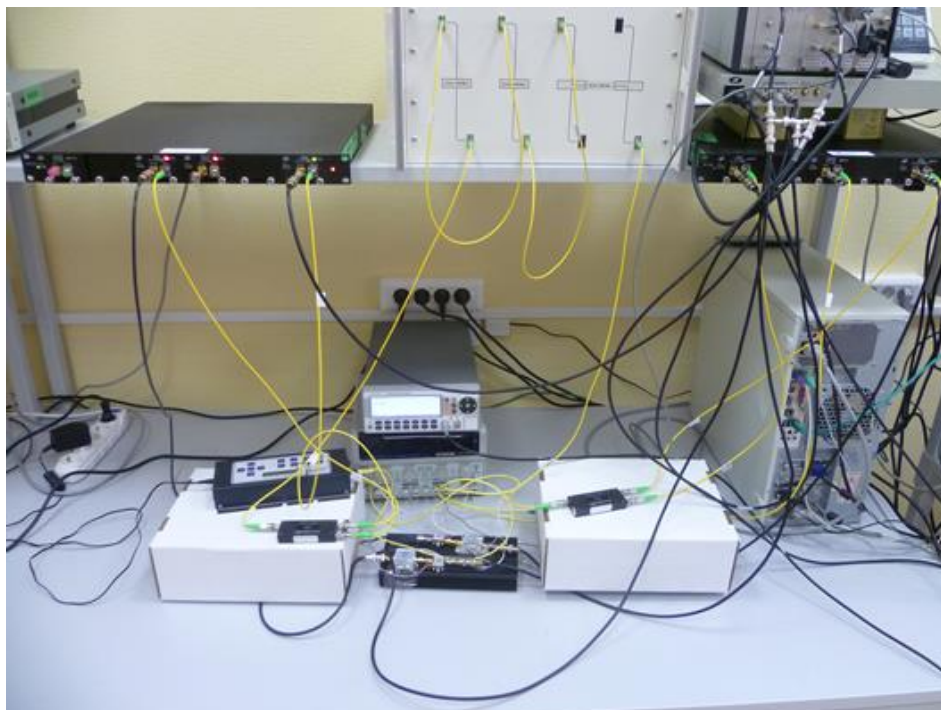


Рисунок 29. Внешний вид системы передачи ЭСЧ «туда и обратно»

2.6.4 Блок выработки сигнала ошибки – блок «ФД и ФНЧ»

Блок «ФД и ФНЧ» – это узел, в котором вырабатывается сигнал ошибки фазовым детектором (ФД) и с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ) осуществляется фильтрация и усиление сигнала ошибки. Вырабатываемый блоком сигнал ошибки управляет кварцевым генератором КГ-100, и тем самым корректируется фаза отправляемого в ВОЛС 100 МГц сигнала, в результате чего компенсируются вносимые линией возмущения фазы эталонного сигнала.

Схема используемого блока «ФД и ФНЧ» представлена на рисунке (Рисунок 30).

Входные сигналы, поступающие с коаксиальных розеток SMA, подаются на входы 1 и 2, а далее, через разделительные конденсаторы C1, C2 поступают на входы микросхемы фазового детектора DA1. Выходной сигнал фазового детектора

содержит низкочастотный сигнал разностной частоты (включая сигнал постоянного тока) и высокочастотный сигнал суммарной частоты входных сигналов.

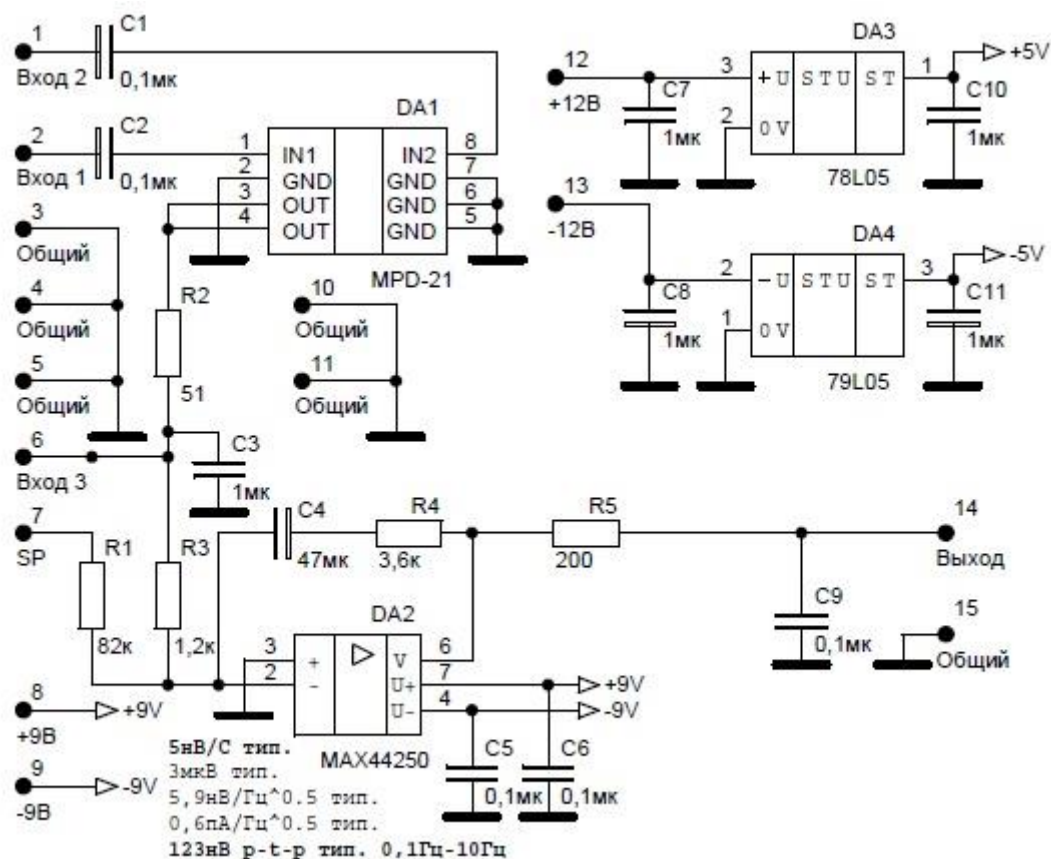


Рисунок 30. Электрическая схема блока ФД и ФНЧ

Фильтрующая цепь R2C3 подавляет высокочастотную часть сигнала. Низкочастотная часть сигнала усиливается и интегрируется операционным усилителем DA2 с помощью цепи R3R4C4, фильтруется на выходе цепью R5C9 и поступает на выход 14. Вход 3 позволяет проконтролировать отфильтрованный сигнал на выходе DA1 либо подать дополнительный внешний сигнал на вход интегратора. Резистор R1 при его подключении тумблером к напряжениям (+5В) или (-5В) через входы 8, 9 позволяет ускорить в ручном режиме работу интегратора

при первоначальном выходе на рабочий режим. Линейные стабилизаторы напряжения DA3, DA4 обеспечивают стабильность питания совместно с конденсаторами C5-C8, C10, C11. Входы 3-5, 10, 11, 15 подключаются к общему проводу питания и сигналов, а также к экранирующему корпусу, несущему входные и выходные коаксиальные разъемы SMA (Рисунок 31).

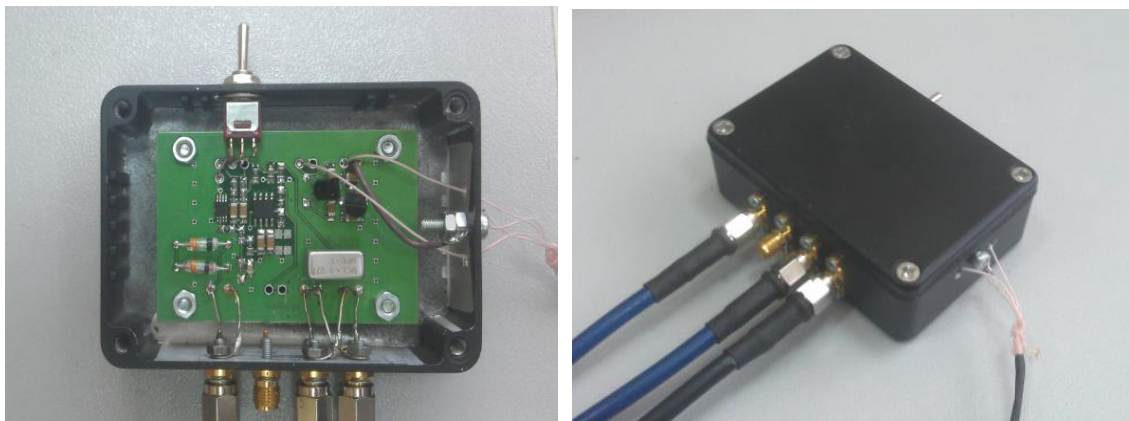


Рисунок 31. Фотография блока ФД и ФНЧ

2.6.5 Фазовращатель на основе 100 МГц кварцевого генератора

В узле коррекции фазы применен термостатированный высокочастотный малошумящий управляемый кварцевый генератор ГК136 - ТС на 100 МГц (КГ-100) производства фирмы «Морион». В таблице (Таблица 5) представлены основные характеристики этого кварцевого генератора КГ 100, которые заявляет в спецификации производитель. Сдвиг фазы сигнала, генерируемого кварцевым генератором, реализуется путем изменения его частоты при подаче на него управляющего напряжения.

Таблица 5. Характеристики кварцевого генератора ГК136 – ТС-100М [59]

Частота выходного сигнала	100 МГц
Напряжение питания	12В±10%
Размер корпуса	51х51х19 мм
Термостатированный корпус	да
Потребляемый ток в установившемся режиме при +25°C	<150 мА
Потребляемый ток во время включения при +25°C	<500 мА
Управляющее напряжение	0...8 В
Выходной сигнал	синусоидальный
Напряжение выходного сигнала	>400 мВ
Сопротивление нагрузки	50 Ом±10%
Ослабление гармоник	>25 дБ
Типовой уровень фазовых шумов при отстройке:	
10 Гц	-85 дБ/Гц
100 Гц	-115 дБ/Гц
1000 Гц	-140 дБ/Гц
10000 Гц	-160 дБ/Гц

Кварцевый генератор был установлен на печатной плате, которая смонтирована в литом алюминиевом корпусе, имеющем SMA разъемы для выходного сигнала и для подачи напряжения управляющего частотой генератора. Ввод питания выполнен на проходном фильтрующем конденсаторе. Внешний вид блока коррекции фазы эталонного сигнала (КГ-100) на основе перестраиваемого кварцевого генератора представлен рисунке (Рисунок 32).

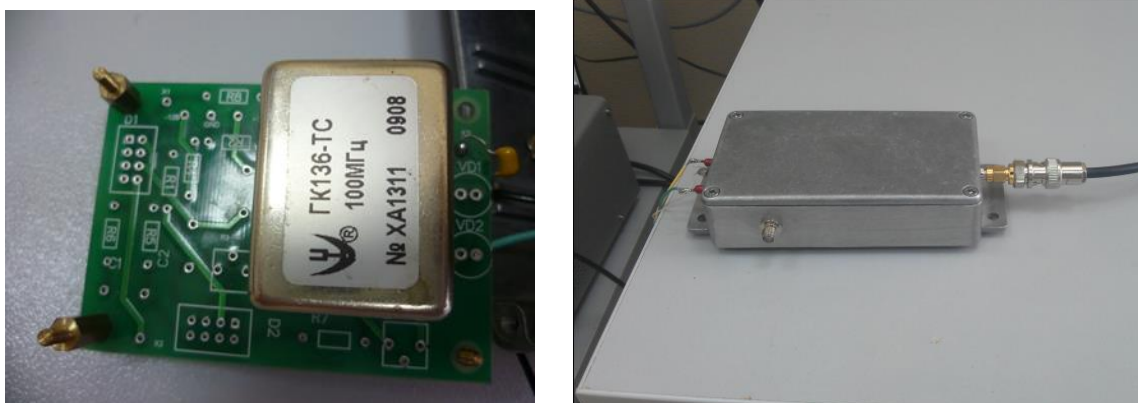


Рисунок 32. Фото узла коррекции фазы эталонного сигнала 100 МГц на основе перестраиваемого кварцевого генератора КГ-100

Литой алюминиевом корпус блока снижает влияние изменений температуры окружающей среды на находящийся внутри термостатированный КГ-100. После изготовления блока КГ-100 были проведены его испытания, которые показали, что уровень фазовых шумов конкретного установленного в блоке экземпляра кварцевого генератора лежит ниже уровня, указанного в таблице (Таблица 5) в диапазоне отстроек от 10 до 10^4 Гц.

2.6.6 Система измерений погрешности передачи ЭСЧ по ВОЛС и мониторинга окружающей среды

Для частотных сличений сигнала, получаемого на удаленном конце линии, с эталонным используется измеритель нестабильности 5125А фирмы Symmetricom или частотный компаратор VCN-315. Для измерений спектральных характеристик сигналов применяется Symmetricom 5125А в режиме измерения фазовых шумов. Для контроля и регистрации изменений температуры окружающей среды использован измеритель влажности и температуры ИВТМ-7/2-С [60]. Данные измерений накапливались в компьютере (Рисунок 33).



Рисунок 33. Фото системы измерений погрешности передачи ЭСЧ по ВОЛС и мониторинга окружающей среды

2.7 Испытания системы передачи ЭСЧ по ВОЛС

2.7.1 Схема измерений для оценки вклада системы передачи в неопределенность сличений эталонов

Для расчёта вклада системы передачи по ВОЛС в суммарную неопределенность измерений, при передаче размера единицы частоты разработана модель согласно ГОСТ 8.381-2009 [61]. Суммарная стандартная неопределенность воспроизведения единицы частоты $u_{C\ 92}$ вторичного эталона сличаемого с первичным:

$$u_{c\text{э}2} = \sqrt{u_{c\text{э}1}^2 + u_{A\text{э}2}^2 + u_{c\text{сп}}^2},$$

где $u_{c\text{э}1}$ – стандартная суммарная неопределенность первичного эталона, $u_{A\text{э}2}$ – стандартная неопределенность по типу А вторичного эталона, $u_{c\text{сп}}$ – суммарная стандартная неопределенность системы передачи по ВОЛС размера единицы частоты:

$$u_{c\text{сп}} = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2},$$

где u_A – стандартная неопределенность типа А (случайная), статистически определяемая в процессе измерений частоты переданного сигнала компаратором, u_{B1} – 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.

Экспериментальные исследования по определению вклада системы передачи по ВОЛС в суммарную неопределенность измерений при передаче размера единицы частоты проводились в лабораторных условиях по схеме (Рисунок 34).

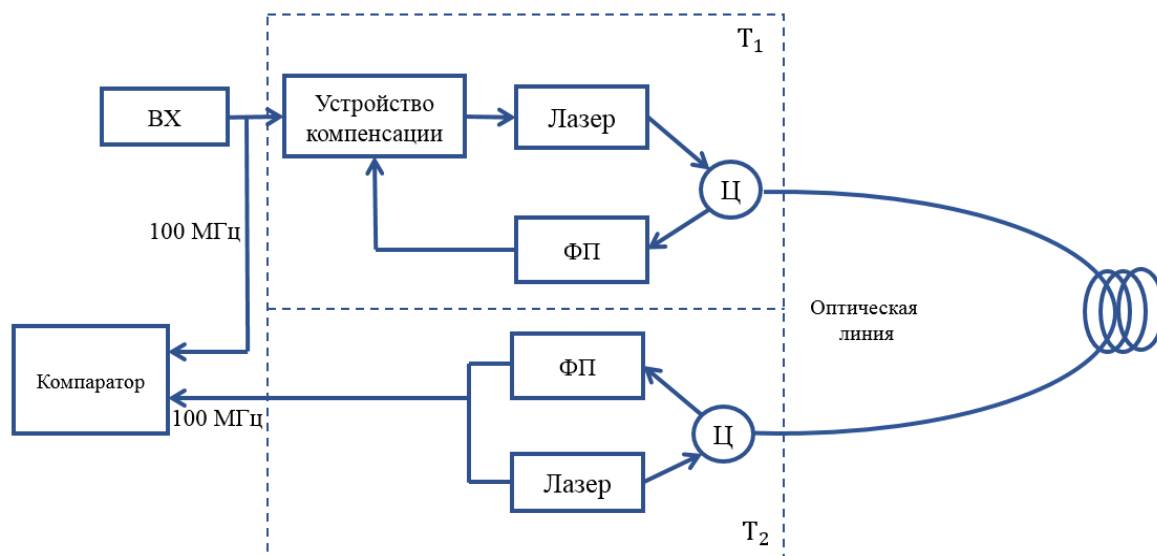


Рисунок 34. Схема измерений СКДО сигнала, принимаемого на конце волоконно-оптической линии, относительно эталонного сигнала ВХ, который подается на вход системы передачи

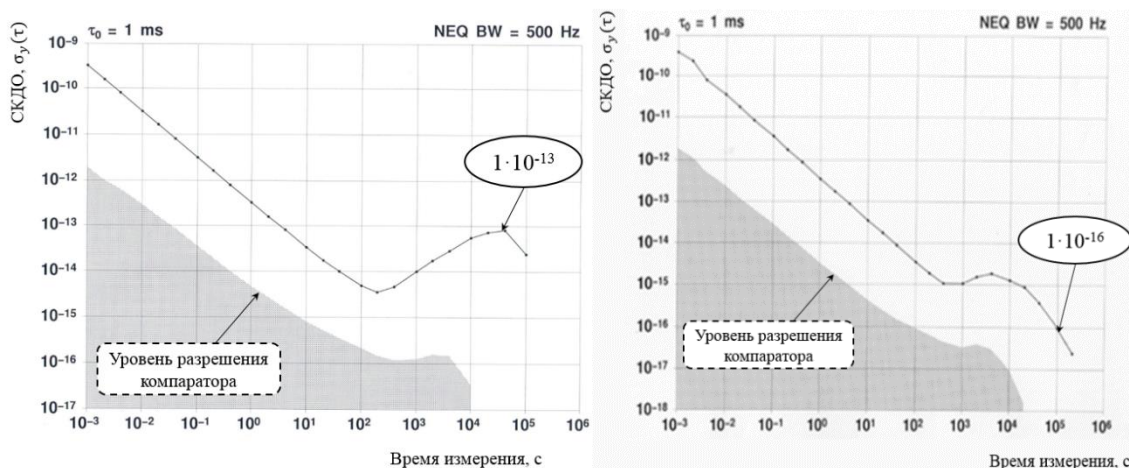
Так как начало и конец линии находились в одном помещении, то измерения по такой схеме позволяют исключить влияние дрейфа частоты ВХ и более точно определить суммарную стандартную неопределенность системы передачи по ВОЛС размера единицы частоты $u_{C\text{ сп}}$.

2.7.2 Результаты испытаний системы передачи ЭСЧ по ВОЛС длиной 100 км с асимметричной электронной компенсацией

Измерения, проведенные в процессе испытаний, показали (Рисунок 35), что при выключенной электронной компенсации система передачи ЭСЧ по 100 км ВОЛС вносит дополнительную неопределенность в результат измерения частоты $\sim 1 \cdot 10^{-13}$.

Измерения, проведенные в процессе испытаний, показали (Рисунок 35), что с включенной электронной компенсацией система передачи ЭСЧ по 100 км ВОЛС

вносит дополнительную неопределенность в результат измерения частоты, которая не превышает $1 \cdot 10^{-16}$ [50].



Система компенсации выключена

Система компенсации включена

Рисунок 35. СКДО сигнала, принимаемого на конце 100 км волоконно-оптической линии, относительно эталонного сигнала ВХ, который подавался на вход системы передачи

Испытания позволили сделать вывод о том, что точность компенсации может быть улучшена и вклад системы передачи по 100 км ВОЛС в неопределенность результата измерений частоты будет уменьшен в несколько раз, если будет стабилизирована температура на концах ВОЛС в местах размещения узлов и электронной аппаратуры, входящей в систему передачи ЭСЧ.

2.8 Выводы

Из главы 2 можно сделать вывод о том, что 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 $1 \cdot 10^{-16}$. Для уменьшения вклада системы передачи по ВОЛС в неопределенность результата измерений частоты при сличениях территориально удаленных стандартов необходимо стабилизировать температуру в местах размещения электронной аппаратуры, входящей в систему передачи ЭСЧ.

Глава 3. Передача ЭСЧ по ВОЛС при поддержании температуры в местах размещения аппаратуры, входящей в систему передачи

3.1 Оценка требований к постоянству температуры в месте размещения электронной аппаратуры системы передачи ЭСЧ по ВОЛС

С помощью измерителя влажности и температуры ИВТМ-7/2-С был проведен непрерывный круглосуточный мониторинг температуры в разные дни в месте размещения системы передачи. При этом система кондиционирования в помещении лаборатории непрерывно функционировала.

Результаты такого мониторинга в течение 12 суток в сентябре-октябре 2016 года (Рисунок 36).

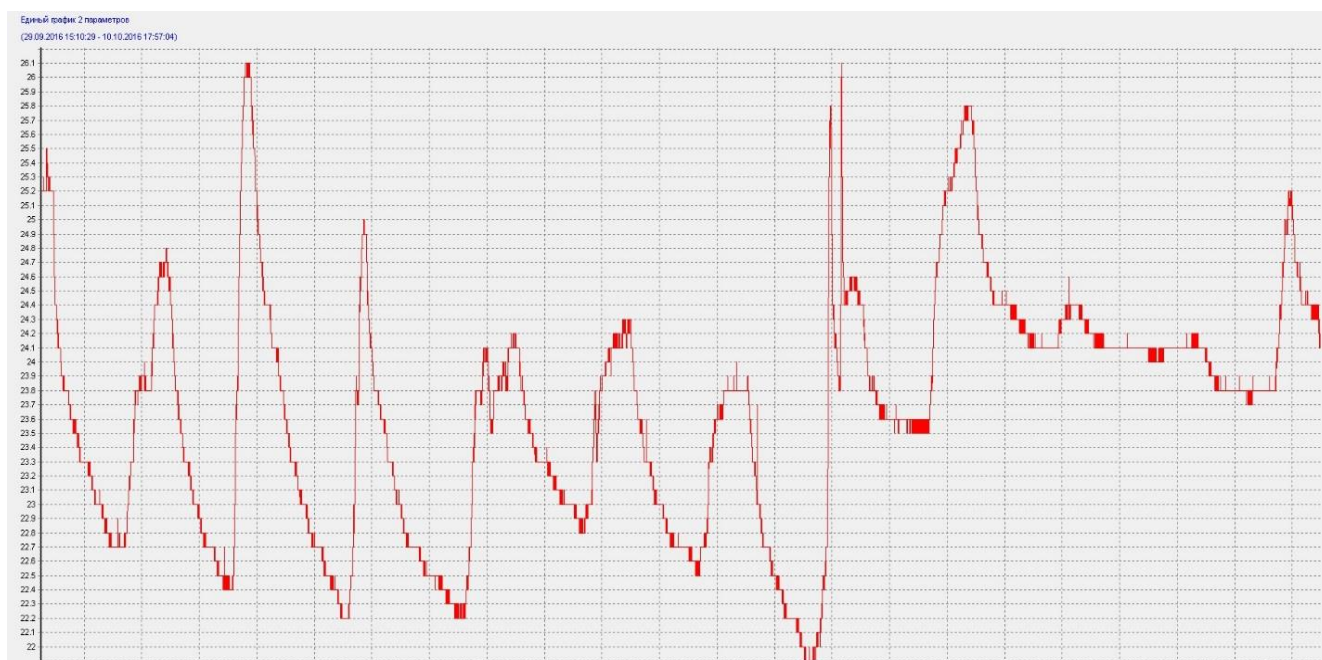


Рисунок 36. Результаты измерений температуры с 29.09.2016 по 10.10.2016 года в месте размещения узлов системы передачи ЭСЧ по ВОЛС

Анализ результатов испытаний (Рисунок 36) говорит, во-первых, о том, что система кондиционирования работает основную часть времени в циклическом режиме и температура в лаборатории колеблется в пределах одного градуса из-за периодического включения-выключения кондиционера. Во-вторых, система кондиционирования периодически, один раз в сутки в течении трех-четырех часов не справляется с поддержанием температуры в пределах одного градуса. Температура в лаборатории в течение этих трех-четырех часов на рассвете дня изменяется в пределах двух-четырех градусов. Это говорит о том, что существующий в лаборатории кондиционер не обладает достаточной мощностью для того, чтобы поддерживать температуру в лаборатории постоянной при быстрых изменениях наружной температуры воздуха вне здания. На графике (Рисунок 35) с включенной системой компенсации виден характерный подъем, неустойчивости частоты (СКДО) на интервалах времени измерения от $3 \cdot 10^2$ с до $2 \cdot 10^5$ с, который является результатом влияния циклической работы системы кондиционирования.

При передаче ЭСЧ по ВОЛС температура многокилометровой линии может изменяться в широких пределах. В проведенных экспериментах температура изменялась в течение суток на 4°C , что существенно превышает суточный ход температуры менее 1°C в местах прокладки подземных оптических кабелей [51]. Отметим, что при изменениях температуры окружающей среды фаза передаваемого сигнала возмущается волоконной линией и другими электронными и оптическими устройствами, которые умножают, фильтруют, преобразовывают первичный эталонный сигнал частотой 5 МГц. Возмущение фазы в каждом из этих устройств можно оценить по их температурному коэффициенту задержки сигнала, который, например, у умножителей частоты может достигать $30 \text{ пс}/^{\circ}\text{C}$ (Таблица 6). Чтобы повысить точность компенсации возмущений, вносимых ВОЛС,

необходимо все электронные и оптические устройства, расположенные в начале и в конце линии, устанавливать в помещениях или в камерах с постоянными климатическими условиями.

Таблица 6. Типичные коэффициенты температурной вариации задержки

Электронное устройство или кабель	Температур. коэфф. задержки	Вариация задержки сигнала на выходе 1 км линии при изменении темпе-ры на 1°C	Вариация задержки сигнала на выходе устр-ва при изменении темпе-ры на 1°C
Оптический трансмиттер вместе с согласующим усилителем	1 - 20 пс/°C		1-20 пс
Оптический ресивер с радиочастотным усилителем	1-20 пс/°C		1-20 пс
Умножитель частоты	10-30 пс/°C		10-30 пс
Коаксиальный стандартный кабель	500пс/°C·км	500 пс	
Коаксиальный фазостабильный кабель	30пс/°C·км	30 пс	
Оптический кабель стандартный с волокном SMF-28	38пс/°C·км	38 пс	
Оптический кабель диаметром 3 мм широко используемый для патч-кордov с волокном SMF-28	130пс/°C·км	130 пс	

Проведена оценка суммарного температурного коэффициента задержки в разных узлах системы передачи ЭСЧ по ВОЛС $\alpha_{\text{ТКЗ}} \approx 50$ пс/ °C (Рисунок 37).

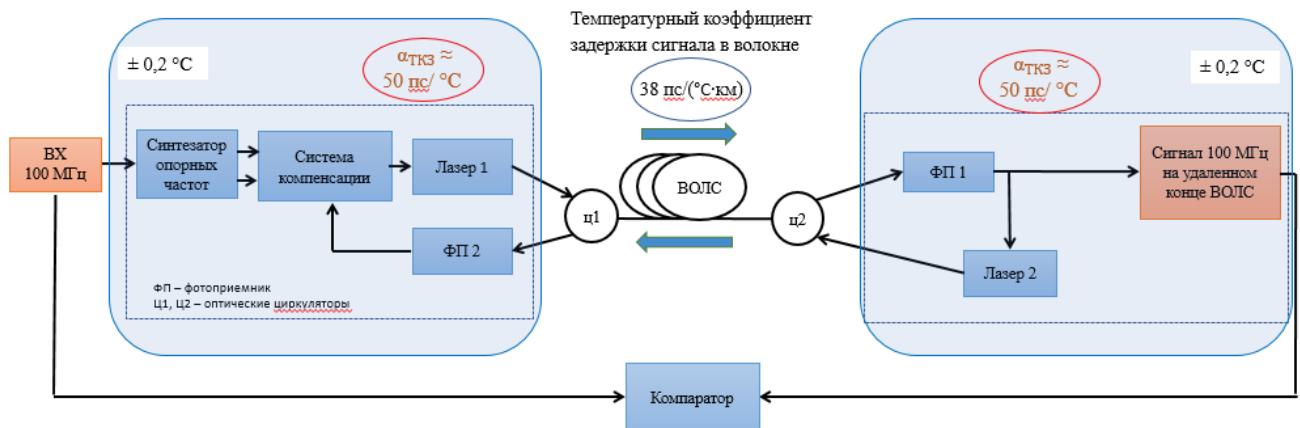


Рисунок 37. Схема измерений при передаче эталонного радиочастотного сигнала с электронной компенсацией, когда аппаратура на концах линии помещена в термокамеру

Для того, чтобы уменьшить значение суммарного температурного коэффициента задержки в разных узлах системы передачи ЭСЧ по ВОЛС $\alpha_{ТКЗ} \approx 50$ пс/°C необходимо использование камеры постоянных климатических условий, в которых поддерживается температура в пределах $(22,0 \pm 0,2)$ °C.

Отметим, что стабильные температурные условия круглогодично поддерживаются и в помещениях, где находятся ВХ и другая аппаратура первичного эталона ГЭТ 1–2018.

Можно сделать следующий общий вывод. Нецелесообразно доставлять эталонный сигнал частоты к электронному устройству, находящемуся в помещении, где не поддерживается постоянство температуры в пределах одного–двух градусов. Первые же каскады электронного устройства, принимающего сигнал в помещении с изменяющейся в широких пределах температурой, могут вносить погрешность. Эта погрешность, вносимая принимающими сигнал электронными устройствами, установленными на удаленном конце линии, может быть значительно больше той, которую вносит собственно оптический кабель длиной ~ 1 км, протянутый под землей. Даже при поддержании температуры

окружающей среды в пределах 1 градуса в помещениях, где размещены электронные устройства, участвующие в передаче ЭСЧ, они могут дать суммарный температурный коэффициент временной задержки сигнала больший, чем температурный коэффициент 38 пс/К времени задержки однокилометровой волоконной линии.

3.2 Технические характеристики термошкафа постоянных климатических условий

Термошкафы, предназначенные для размещения электронной аппаратуры, в которых длительное время непрерывно с высокой точностью поддерживается постоянство температуры, изготавливают две фирмы в мире Parameter Generation & Control и Binder (Рисунок 38) [62].



Рисунок 38. Внешний вид термошкафа KBF 720 фирмы Binder (Германия)

Основные характеристики KBF 720:

Внешние размеры (ШхГхВ):	1250x890x1925мм
Внутренние размеры:	973x576x1250 мм
Рабочий объем:	700 л
Вес:	309 кг
Диапазон температур в камере:	10... 70 °С
Вариация температуры при 25 °С при 60 % влажн.	$\pm 0,2$ °С
Флуктуация температуры:	$\pm 0,1$ °С

3.3 Результаты эксперимента по передаче ЭСЧ по ВОЛС при помещении аппаратуры на концах линии в климатическую камеру

Был проведен эксперимент, в котором блоки, расположенные на концах линии были помещены в климатическую камеру, а катушки волокна были в лаборатории, но вне термокамеры.

Отметим, что суточные вариации температуры оптического волокна в подземном бронированном оптическом кабеле составляют $\sim 0,5^\circ\text{C}$, а скорость изменения его температуры не превышает $0,02^\circ\text{C}$ в час. При выполнении эксперимента температура в лаборатории и, соответственно, волоконной линии, выполненной в виде катушек оптического волокна, изменялась в более широких пределах $\sim 4^\circ\text{C}$, а скорость изменения температуры иногда достигала 2°C в час. Температура в месте размещения электронной аппаратуры, внутри камеры постоянных климатических условий, поддерживалась в пределах $22 \pm 0,2^\circ\text{C}$.

На рисунке (Рисунок 39) представлен общий вид системы передачи ЭСЧ по ВОЛС, помещенной в камеру постоянных климатических условий Binder KBF-720. Лабораторные блоки катушек из стандартного оптического волокна SMF-28 общей длиной 200 км и оптический усилитель, которые входят в систему передачи ЭСЧ по ВОЛС «туда и обратно», находятся сверху вне климатической камеры. Под

ними внутри камеры размещены оптические трансмиттеры и ресиверы, к которым через оптические циркуляторы подключены концы стандартного оптического волокна. Ниже в камере располагаются измеритель нестабильности и фазовых шумов 5125A Symmetricom и источник питания. На двух нижних полках камеры находится блок ФСЭСЧ, используемый для выработки опорных сигналов 80 и 120 МГц, в состав которого входят полосовые фильтры, радиочастотный умножитель и генератор LNFR-400.



Рисунок 39. Общий вид системы передачи, помещенной в камеру постоянных климатических условий

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 10^3 с до 10^5 с на порядок величины, что является существенным улучшением результатов [63] (Рисунок 40).

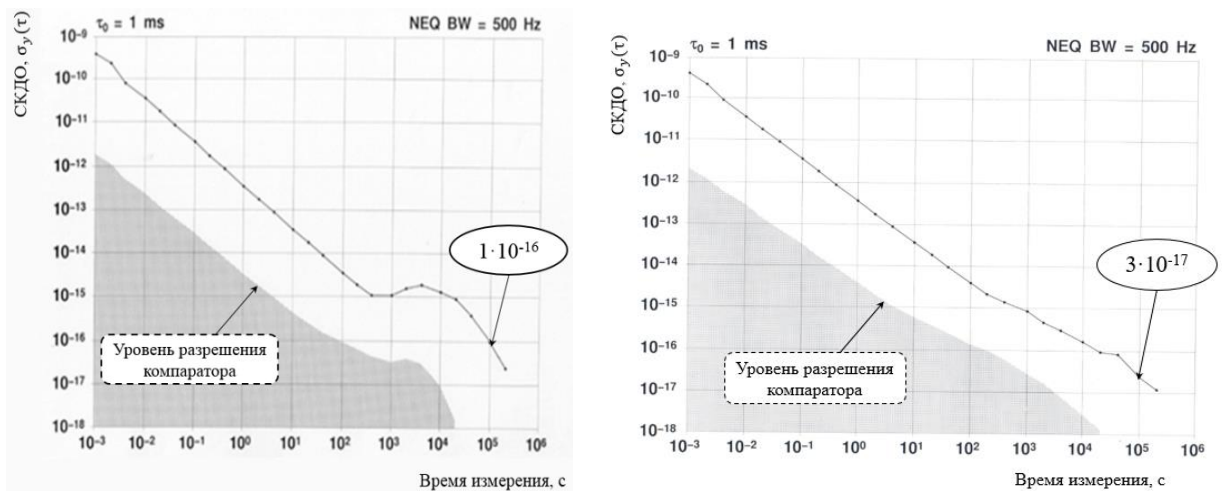


Рисунок 40. СКДО сигнала, принимаемого на конце 100 км волоконно-оптической линии, относительно эталонного сигнала ВХ, который подавался на вход системы передачи

3.4 Выводы

Из главы 3 можно сделать вывод о том, что 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 $4 \cdot 10^{-17}$.

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

При передаче ЭСЧ по ВОЛС на расстояние более 100 км оптическая несущая в такой длинной ВОЛС существенно ослабляется. Поэтому трудно получить необходимый уровень оптического сигнала при длине линии более 100 км. Для обеспечения работы в более длинных линиях необходимо использовать промежуточные оптические EDFA - (Erbium Doped Fiber Amplifier) — усилители на волокне, легированном ионами эрбия, которые имеют низкий уровень собственных шумов. Так как в системе применяется двунаправленная передача ЭСЧВ по ВОЛС, то необходимо использовать двунаправленные оптические EDFA усилители.

4.1 Система передачи ЭСЧ по ВОЛС с асимметричной электронной системой компенсации линии длиной 200 км

Разработанная в главе 3 система передачи ЭСЧ по ВОЛС с асимметричной электронной компенсацией после проведения расчетов для линии 200 км была дополнена катушками оптического волокна, двунаправленным оптическим усилителем и перестраиваемыми оптическими аттенюаторами. При расчете и настройке такой системы должны учитываться ослабление сигнала в оптической линии, коэффициент усиления EDFA усилителя и возможные паразитные отражения оптических сигналов в линии.

4.1.1 Оптические усилители

В оптическом усилителе за счет энергии лазера накачки происходит усиление всех поступающих на его вход оптических сигналов, длины волн которых лежат в рабочем диапазоне усилителя (1530-1565 нм) (Рисунок 41). В EDFA усилителе оптические сигналы усиливаются без преобразования в электрические и обратно, что позволяет создавать сети передачи высокой протяженности при значительной экономии электронных компонентов или вообще без них.

DFB-лазеры, применяемые в системе передачи, имеют несколько недостатков. Они чувствительны к отраженному в линии сигналу, попадающему обратно в активную область усиления лазера из-за очень узкой ширины линии генерации (и соответственно большой длины когерентности). Если в линии возникают параллельные частично отражающие поверхности в пределах длины когерентности лазера, это приводит к возникновению отраженного сигнала, когерентного с излучением лазера. Попадая в резонатор лазера, такой сигнал интерферирует с полезным сигналом и нарушает стабильность генерации лазера. Причем интенсивность отраженного сигнала может иметь максимум при определенных температурах, что делает стохастическим и трудноулаживаемым появление этого эффекта. Как уже упоминалось выше, увеличение мощности оптической несущей, подаваемой на вход волоконной линии, вызывает генерацию ВРМБ. Поэтому для передачи ЭСЧ по ВОЛС на расстояние более 100 км необходимо использование двунаправленных оптических усилителей, а не увеличение мощности, подаваемой на вход оптической линии [41].

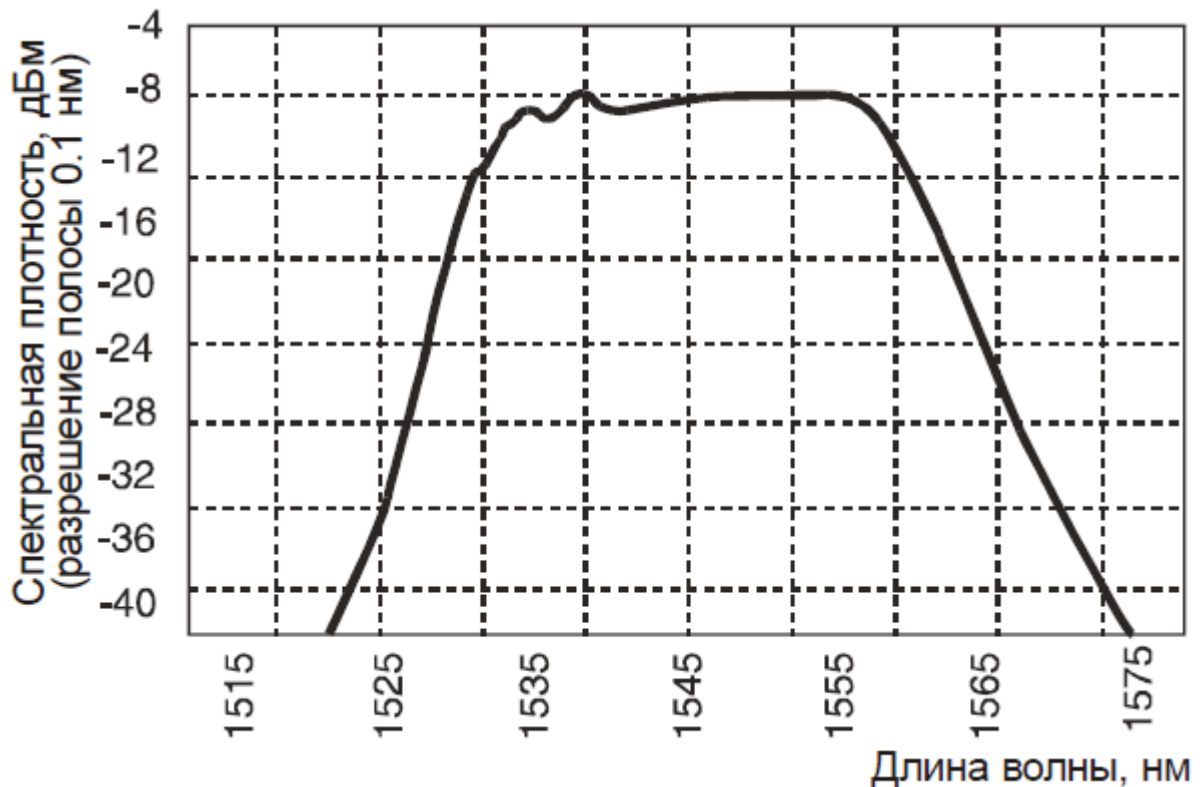


Рисунок 41. Зависимость коэффициента усиления EDFA от длины волны [41]

Обычные электронные повторители, чтобы восстановить уровень сигнала на протяженной линии связи, считывают оптический сигнал с волокна, преобразуя его в электрические импульсы, и усиливают их, а затем преобразуют усиленный сигнал снова в оптическую форму и передают дальше по линии связи. В отличие от них, усилители

EDFA полностью "прозрачны" – не зависят от используемых протоколов, форматов, скорости передачи и (в пределах, указанных выше ограничений) длины волны оптического сигнала в пределах, указанной выше полосы.

Наряду с этим, при использовании усилителей EDFA требуется тщательно учитывать их неоднородное спектральное усиление и шум, вносимый ими за счет усиленной спонтанной эмиссии (УСЭ) - (Amplified Spontaneous Emission – ASE).

4.1.2 Лазер накачки оптического усилителя

Важнейший компонент усилителя EDFA – лазер накачки (Рисунок 42). Он является источником энергии, за счет которой усиливается оптический сигнал. Энергия лазера накачки распределяется в усилителе EDFA между всеми оптическими каналами с длинами волн λ_c вблизи 1550 нм. Чем больше число каналов, тем большая требуется мощность накачки. В усилителях EDFA, рассчитанных на большое количество каналов, часто используется несколько лазеров накачки.

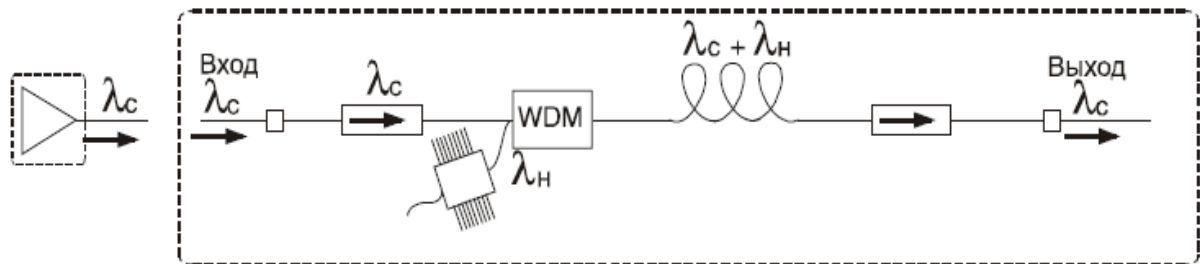


Рисунок 42. Схема накачки EDFA усилителей [41]

Для накачки усилителей EDFA подходят лазеры с длинами волн λ_n излучения 980 нм и 1480 нм. Излучение обеих длин волн соответствует уровням энергии возбужденных ионов и хорошо поглощается волокном, легированным эрбием. Однако при выборе того или иного типа лазеров накачки приходится идти на компромисс. С одной стороны, усилители EDFA с лазерами 980 нм обладают более низким коэффициентом шума, чем усилители с лазерами 1480 нм, что лучше для многоканальных систем и предусилителей систем DWDM. С другой стороны, использование лазеров 1480 нм позволяет создать более мощные усилители за меньшую цену. Что важнее – высокая мощность усилителя или низкий уровень его шума. В некоторых усилителях EDFA используется накачка на двух длинах волн,

что позволяет совместить преимущества обоих способов. В системах передачи ЭСЧВ важен низкий шум усилителя, а потому предпочтительно использовать усилители EDFA с лазерами накачки на 980 нм.

Если лазерный передатчик выдает в волокно с типичным затуханием 0,2 дБ/км в области длины волны 1550 нм сигнал мощностью +16 дБм, то после прохождения 80 км мощность этого сигнала упадет до уровня 0 дБм (1 мВт) (не учитываются другие источники потерь, таких как стыки и т. д.). Если же лазер выдает сигнал мощностью 0 дБм, то при прохождении тех же 80 км он понизится до уровня –16 дБм. На первых этапах развития волоконно-оптической связи лазеры имели относительно низкую мощность, и сигнал необходимо было восстанавливать электронными методами при прохождении расстояний много меньших, чем 80 км. Электронный повторитель получал оптический сигнал, преобразовывал его в электрический, усиливал и снова преобразовывал в оптический. Хотя эта технология не имела спектральных ограничений и позволяла с равным успехом восстанавливать сигналы как на 1310 нм, так и на 1550 нм, она была достаточно сложной.

В начале 1980-х годов Пэйн (Payne) и Ламинг (Laming) из Саутгэмптонского университета (University of Southampton) в Великобритании предложили усиливать оптические сигналы без оптоэлектронного преобразования с помощью волокна, легированного эрбием. С этого момента началась эпоха полностью оптических повторителей. У предложенной технологии было одно небольшое ограничение: она позволяла усиливать сигналы только в узком спектральном диапазоне с центром на длине волны 1550 нм [41].

4.1.3 Коэффициент усиления оптического усилителя

В EDFA с одноступенчатой накачкой максимальная мощность выходного сигнала, достигаемая в режиме насыщения (область С, Рисунок 43), составляет около +16 дБм. Его коэффициент шума в области сигнала низкой мощности (область А, Рисунок 44) равен 5-6 дБ. В EDFA с двумя лазерами накачки (980 нм и 1480 нм) достигается более высокая мощность выходного сигнала – до +26 дБм. Чтобы снизить уровень шумов почти до уровня квантовых флуктуаций (что необходимо для многих предусилителей), применяют многокаскадную конструкцию: сразу за первым каскадом усиления помещается оптический изолятор, который препятствует распространению в обратном направлении УСЭ второго каскада.

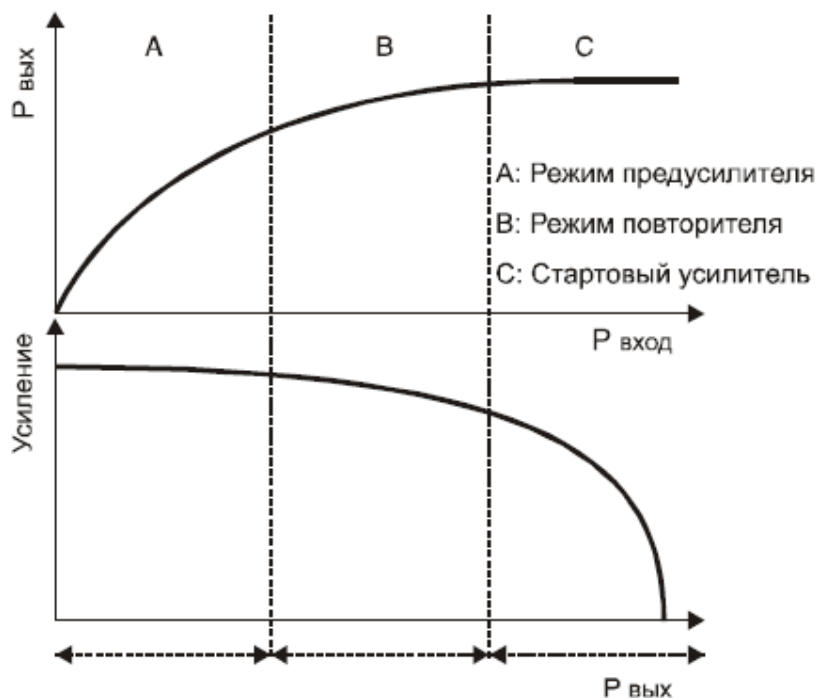


Рисунок 43. Зависимость коэффициента усиления от мощности входного сигнала и различные режимы работы EDFA [41]

Усилители EDFA могут использоваться по-разному в зависимости от выбранной области коэффициента усиления (Рисунок 43).

- В режиме насыщения (область С) – как усилитель мощности (бустер) сразу после лазера передатчика. Бустер повышает мощность сигнала и позволяет максимально увеличить расстояние до первого повторителя.

- В режиме промежуточных значений усиления и шума (область В) – как повторитель. Повторитель усиливает сигнал, насколько это возможно, внося при этом как можно меньше шума.

- В режиме наименьшего шума (область А) – как предусилитель перед приемником. Предусилитель повышает мощность слабого сигнала в конце линии связи. Предусилитель практически всегда используется вместе с узкополосным фильтром.

Коэффициент усиления – одна из самых важных измеряемых характеристик оптического усилителя. Коэффициент усиления зависит от множества параметров, которые по отдельности или вместе могут влиять на эффективность усилителя. Коэффициент усиления зависит от длины волны сигнала, состояния поляризации на входе и мощности сигнала.

Коэффициент усиления G (измеряется в дБ) определяется как отношение средней выходной P_{out} и входной P_{in} мощности, за вычетом вклада усиленного спонтанного излучения ASE (Amplified Spontaneous Emission) самого усилителя.

$$G = 10 \lg \left[\frac{P_{out}(\lambda_c) - P_{ASE}(\lambda_c)}{P_{in}(\lambda_c)} \right], \quad (35)$$

где $P_{out}(\lambda_c)$ – средняя выходная мощность на длине волны канала (λ_c) в мВт; $P_{ASE}(\lambda_c)$ – мощность усиленного спонтанного усиления в мВт и $P_{in}(\lambda_c)$ – средняя входная мощность в мВт [41].

Усилители EDFA открывают возможность передачи модулированного оптического сигнала на очень большие расстояния без необходимости восстановления и регенерации передаваемой информации. Однако, накопление шумов за счет проявления шум-фактора в нескольких последовательно расположенных в линии связи усилителях EDFA может привести к невозможному разрушению оптического сигнала.

Точный учет шум-фактора усилителей необходим для определения предельного числа каскадов усиления, а, следовательно, и максимальной длины линии.

4.1.4 Усиленное спонтанное излучение в оптическом усилителе

Основным источником шумов оптического усилителя является усиленная спонтанная эмиссия.

Легированное ионами эрбия кварцевое волокно с оптической накачкой является усиливающей средой. В такой среде имеются три энергетических уровня (Рисунок 44). За счет поглощения световой энергии генератора накачки ионы эрбия переходят с основного уровня N_1 на возбужденный уровень N_3 , а затем постепенно безызлучательно переходят на метастабильный энергетический уровень N_2 . Переход с этого уровня в основное состояние ($N_2 \rightarrow N_1$) с излучением фотонов на длине волны 1550 нм может быть как спонтанным, так и вынужденным.

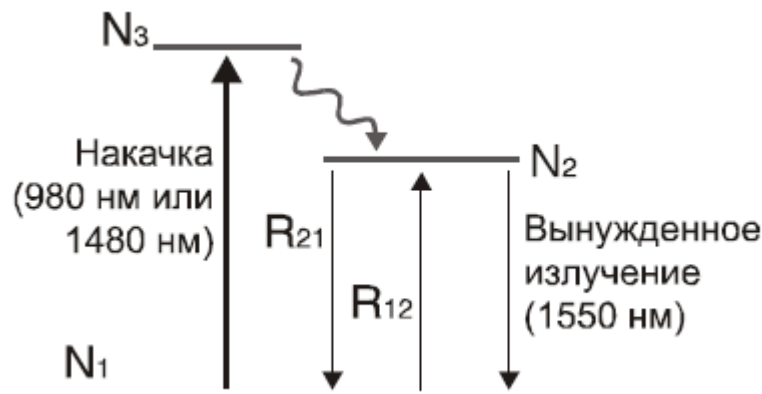


Рисунок 44. Трехуровневая система типичного усилителя EDFA

Метастабильный уровень имеет относительно большое время жизни (около 10 мс). Следовательно, ионы эрбия могут оставаться в таком возбужденном состоянии продолжительное время, что приводит к возникновению инверсной заселенности. При возникновении инверсии происходит также спонтанное излучение отдельных атомов или ионов. В усиливающей среде усилителя EDFA имеется определенная вероятность того, что фотоны излучения будут захвачены в соседних участках легированного волокна и вызовут излучение с возбужденного (инверсно заселенного) уровня. Этот процесс приводит к последовательному нарастанию (усилению) спонтанного излучения УСЭ. Излучение УСЭ распространяется в обоих направлениях вдоль волокна.

Измерив уровень шума $N_{in}(\lambda)$ во входном сигнале и уровень полного шума $N_{out}(\lambda)$ в сигнале на выходе усилителя, можно найти мощность излучения УСЭ из следующего уравнения: $N_{out}(\lambda) = N_{in}(\lambda) \cdot G + P_{УСЭ}$.

При спаде или насыщении коэффициента усиления вклад излучения УСЭ невелик. Коэффициент усиления определяется просто как отношение мощностей на выходе и входе без учета усиленного спонтанного излучения [41].

4.1.5 Двухнаправленный оптический EDFA усилитель, примененный при создании системы передачи ЭСЧ по ВОЛС для линии длиной более 100 км

Особенностью двухнаправленного оптического EDFA усилителя является то, что он усиливает сигналы, которые распространяются по волоконной линии как в одну сторону, так и в обратную. Он имеет два основных оптических разъема, с помощью которых он включается примерно посередине длинной многокилометровой оптической линии. Упрощенная схема двухнаправленного оптического EDFA усилителя фирмы QTECH представлена на рисунке (

Рисунок 45), его внешний вид на рисунке (Рисунок 46), а его технические характеристики приведены в таблице (Таблица 7) .

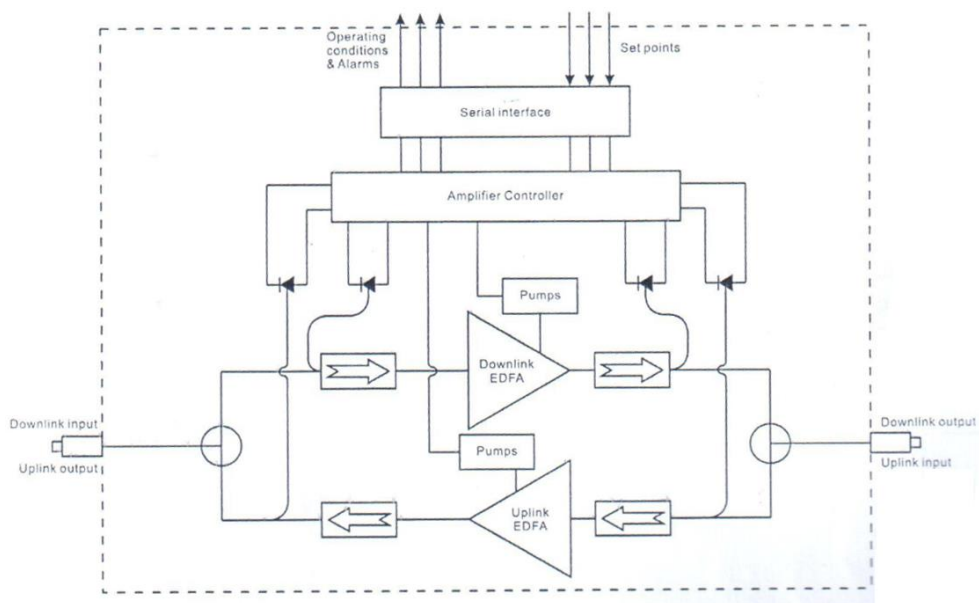


Рисунок 45. Схема двухнаправленного оптического усилителя



Рисунок 46. Внешний вид двунаправленного оптического EDFA усилителя QWM-7210SFA-CC-F10

Таблица 7. Технические характеристики QWM-7210SFA-CC-F10 [64]

Параметры	Значение			Комментарии
	Мин.	Тип.	Макс	
Оптика				
Диапазон рабочих длин волн (λ) (Прием или передача) (nm)	1528.0		1564.0	C: C-Band
Входная мощность (Прием или передача) (dBm)	-20		+10	LA
Выходная мощность (dBm)			24	Прием или передача
Неравномерность усиления (Прием или передача) (dB)	Один канал			SCH
		1.5	2.0	F10, $\leq\pm 1.0$
Коэффициент шума (dB)	3.8	4.0	6.3	Максимальная мощность максимальное усиление
Поляризационные потери (PDL) (dB)			0.3	
Поляризационное усиление (dB)			0.5	
Поляризационная дисперсия (ps)			0.3	
Изоляция Tx/Rx (dB)	30			
Утечка мощности лазера накачки (dBm)			-30	
Обратные потери (dB)	55			APC

Управление и габариты				
SNMP интерфейс	RJ45			
Последовательный интерфейс	RS232			
Питание (V)	90		265	220VAC
	30		72	-48VDC
	23		25	+24VDC
Энергопотребление(W)			50	
Рабочая температура (°C)	0		65	
Температура хранения (°C)	-40		80	
Относительная влажность (%)	5		95	

4.1.6 Оптические перестраиваемые аттенюаторы

Основное назначение аттенюаторов – подстроить мощность в канале таким образом, чтобы сигнал, поступающий на первый усилитель EDFA, имел равномерный спектр. Следовательно, равномерность спектра поглощения в пределах ширины канала является важным параметром аттенюатора. Среди других параметров, играющих важную роль в тех или иных приложениях, такие, как:

- стабильность;
- надежность;
- потери на отражение;
- потери, зависящие от поляризации;
- поляризационная модовая дисперсия;
- точность;
- повторяемость;
- вносимые потери.

Для регулировки уровней входных сигналов на оптический двунаправленный EDFA усилитель были использованы два оптических перестраиваемых аттенюатора Grand Way FHA2S01 с характеристиками, представленными в таблице (Таблица 8) [65].

Таблица 8. Технические характеристики перестраиваемого оптического аттенюатора

Значение	Параметр
Диапазон ослабления, дБ	0 – 80
Вносимые потери, дБ	<3
Длины волн, нм	850, 1300, 1310, 1490, 1550
Калибровочные длины волн, нм	1310/ 1550
Тип волокна	SM 9/125нм
Линейность, нм	≤0,3
Точность	0.2 дБ для 0~30дБ 1.0 дБ для 30~60дБ 2.0 дБ для 60~80дБ
Возвратные (обратные) потери, дБ	>50 (PC)
Максимальная входная мощность, дБм	+24
Источник питания	2pcs*AA 1.2V Ni-MH батарея
Рабочая температура, °C	-10 до +50
Температура хранения, °C	-20 до +60
Относительная влажность воздуха, %	0~95 (без конденсата)
Коннектор	Сменный FC/PC, SC/PC, FC/APC, SC/APC
Габариты (Д x Ш x В), мм	160 x 76 x 45

4.1.7 Схема системы передачи 100 МГц ЭСЧ по 200 км ВОЛС с асимметричной электронной компенсацией

Схема передачи 100 МГц ЭСЧ по 200 км ВОЛС с двунаправленным оптическим усилителем ОУ представлена на рисунке (Рисунок 47). Катушки волокна общей длиной 200 км, а также оптический усилитель находились вне термошкафа и были подвержены в процессе испытаний воздействию суточных температурных изменений в лаборатории в пределах нескольких градусов. Вариации температуры электронной аппаратуры, размещенной внутри термошкафа, были на порядок меньше - в пределах $\pm 0,2$ °С.

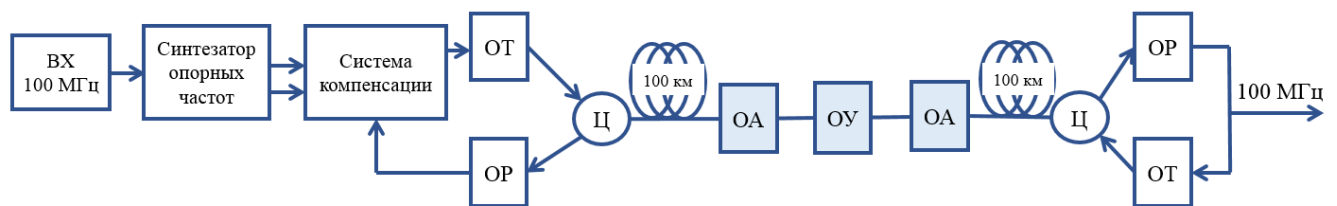


Рисунок 47. Схема передачи 100 МГц ЭСЧ по 200 км ВОЛС с асимметричной электронной компенсацией и двунаправленным оптическим усилителем ОУ

Результаты измерений СКДО сигнала, принимаемого на конце 200 км волоконно-оптической линии, относительно эталонного сигнала ВХ представлены на рисунке (Рисунок 48).

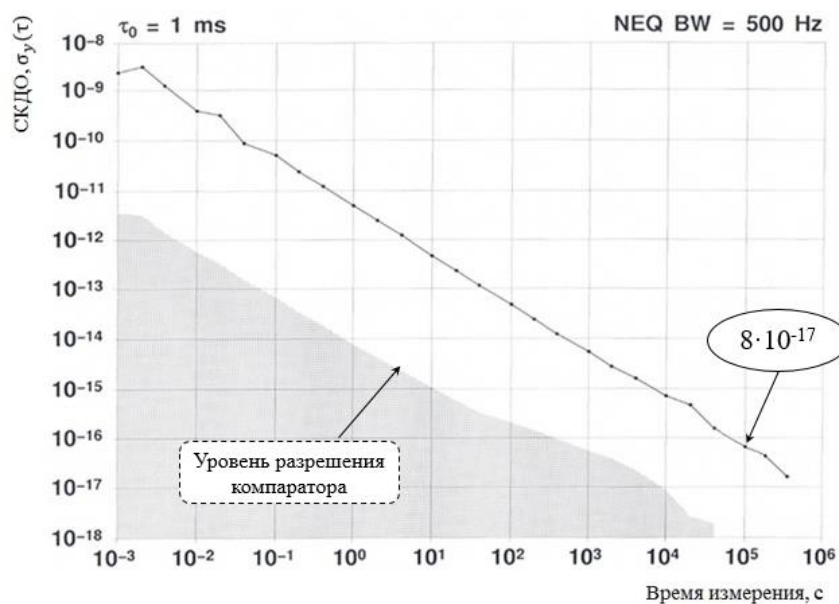


Рисунок 48. СКДО сигнала, принимаемого на конце 200 км волоконно-оптической линии, относительно эталонного сигнала ВХ, который подавался на вход системы передачи с термостатированием аппаратуры на концах линии

Результаты испытаний позволяют сделать вывод, что система передачи ЭСЧ с асимметричной электронной компенсацией при использовании одного промежуточного двунаправленного оптического усилителя обеспечивает передачу по волоконной линии длиной 200 км эталонного сигнала 100 МГц водородного хранителя первичного эталона ГЭТ 1-2018 с неопределенностью измерений, вносимой системой передачи ЭСЧ по ВОЛС, не превышающей $9 \cdot 10^{-17}$.

4.2 Проект системы одновременного сличения по оптическому кабелю трех эталонов времени и частоты, расположенных в Московском регионе

4.2.1 Созданные в мире волоконно-оптические системы для сравнения территориально удаленных стандартов частоты оптического и микроволнового диапазонов

На последнем совещании Консультативного комитета по времени и частоте Международного бюро по мерам и весам, которое проходило 8 и 9 июня 2017 года в Севре, прошло заседание рабочей группы (группы SGOF) по изучению вопроса передачи ЭСЧВ по волоконным линиям [66]. Эта группа сфокусирована на вопросе разработок и достижений в области передачи ЭСЧВ и сличении атомных часов с использованием волоконных линий.

Председателем этой группы Давидом Калонико (D. Calonico) был сделан доклад, в котором был представлен мгновенный снимок состояния дел в этой области как в целом мире, так и в Европе (Рисунок 49) [66]. Страны, в которых осуществляются текущие в настоящее время проекты, связанные с передачей ЭСЧВ по ВОЛС, и страны, в которых такие проекты по созданию волоконных линий для передачи ЭСЧВ осуществлены к настоящему времени.



Рисунок 49. Места на карте мира, где ведутся исследования и созданы системы передачи ЭСЧВ на основе волоконно-оптических линий [66]

На карте звездочками помечены места, где в настоящее время ведутся текущие проекты в этой области. В том числе помечены звездочкой исследования ведущиеся в России в Московском регионе. Четырьмя кружками помечены места, где осуществлены к настоящему времени проекты по созданию волоконных линий передачи ЭСЧВ. Цифра в кружке указывает число отдельных волоконных линий реализованных для передачи ЭСЧВ в конкретном регионе или стране.

На рисунке (Рисунок 50) представлены осуществленные и планируемые волоконно-оптические линии на карте Европы для осуществления сравнения частот стандартов оптического и микроволнового диапазона [66].



Рисунок 50. Волоконно-оптические линии на карте Европы, созданные и планируемые для передачи и сравнения частот оптических и микроволновых стандартов [66]

Для этих линий было разработано соответствующее оборудование в лабораториях европейских метрологических центров, которое размещалось на концах линий и в промежуточных узлах связи. При передаче на расстояние более нескольких сотен километров примерно через каждые 40 - 70 км в промежуточных узлах линии связи необходимо устанавливать двунаправленные оптические усилители и оптические фильтры, а при передаче оптических частот, кроме того, через 200 - 300 км необходимо устанавливать синхронизируемый по принимаемому сигналу высокостабильный лазер для регенерации передаваемого оптического сигнала [26].

4.2.2 Какие эталоны можно непосредственно сравнить по ВОЛС

Для трех эталонов Московского региона ГЭВЧ, ЦС ГЛОНАСС (основной) и вторичного ГЭ возможна реализация передачи ЭСЧВ по ВОЛС между ними и осуществления прямых сравнений их частот и ШВ между собой.

К настоящему времени никто в мире не реализовал систему сравнения частот высокоточных микроволновых стандартов по ВОЛС длиной более 500 км. Отметим, что на большее расстояние от 500 до 1400 км передавалось по ВОЛС только излучение высокостабильных лазеров, оптические частоты которых были синхронизированы по оптическим стандартам частоты. Излучение этих лазеров переносило информацию только о значении частоты оптических стандартов, а передача сигналов времени при этом не осуществлялась.

На данном этапе развития экспериментальной техники сейчас нецелесообразно предпринимать попытки создания систем передачи на оптической несущей эталонных радиочастот и сигналов времени по ВОЛС, а также пытаться создавать системы сравнения шкал времени эталонов по ВОЛС на расстояние, существенно превышающее 500 км. Это связано с тем, что для передачи на расстояние большее, чем 500 км технические решения для систем высокоточной передачи ЭСЧ и сравнения ШВ по ВОЛС, например, на расстояние ~ 5000 км будут чрезмерно сложными и ненадежными. Такая система сравнения ЭСЧ и ШВ потребуют около ста установленных в промежуточных узлах связи термостатированных оптических усилителей и высокостабильных оптических лазеров, а также около десяти промежуточных водородных хранителей, которые должны быть установлены в промежуточных узлах связи, как минимум на каждом 500 км участке ВОЛС. Очевидно, что такая система передачи будет не только чрезмерно неэкономична, но, главное, она не будет обладать надежностью.

Наиболее приемлемый и перспективный путь использования ВОЛС для сравнения ГЭВЧ, ЦС ГЛОНАСС (основной ЦС-Н) и ГЭ, размещенных в Московском регионе, с эталонами ЦС-Н, размещенными в Сибири и на Дальнем Востоке, это пытаться использовать вторичные эталоны ГСВЧ России, находящиеся в Иркутском и Хабаровском филиалах ФГУП «ВНИИФТРИ». Отметим, что группы водородных хранителей вторичных эталонов поддерживают национальную шкалу времени, используя для этого спутниковые каналы сравнений шкалы ГЭВЧ со шкалами вторичных эталонов, находящихся в филиалах. Поэтому при необходимости сравнения по ВОЛС частоты эталона ЦС-Н, находящегося в районе Комсомольска на Амуре, целесообразно использовать для этого вторичный эталон, который находится в Хабаровске. Между хабаровским вторичным эталоном и дальневосточным ЦС-Н, размещенным в районе Комсомольска на Амуре, возможна реализация системы передачи ЭСЧ и сравнения шкал времени по ВОЛС, так как длина оптического кабеля между ними будет составлять ~ 400 км.

4.2.3 Предлагаемый вариант прокладки магистрального оптического кабеля в Московском регионе для передачи ЭСЧ между эталонами

Основное назначение и область применения разрабатываемой аппаратуры системы передачи ЭСЧ по ВОЛС – это сравнение ЭСЧ трех эталонов в Московском регионе.

Длина каналов ВОЛС, связывающих эти территориально удаленные друг от друга эталоны, не превышает 100 км для линий соединяющей ГЭВЧ и ГЭ, ГЭВЧ и ЦС ГЛОНАСС (основной ЦС-Н). А для линии, связывающей ГЭ и ЦС ГЛОНАСС (основной ЦС-Н), – не превышает 200 км с учетом непрямолинейности прокладки кабелей.

Для создания систем передачи ЭСЧ по ВОЛС эталонов, территориально расположенных в Московском регионе на расстоянии от 100 до 200 км друг от друга, необходимы:

1) Оптоволоконные магистральные кабели, протянутые в подземных телекоммуникационных каналах, которые соединят пункты, где расположены эталоны. Первичный ГЭВЧ расположен в Менделеево, два рабочих эталона - ГЭ и ЦС ГЛОНАСС (основной ЦС-Н) базируются в точках, соответственно, вблизи Краснознаменска и Щелково. Магистральные кабели должны соединить эти точки и образовать три ВОЛС, которые соединят по оптическому каналу связи: Краснознаменск и Менделеево, Щелково и Менделеево, Краснознаменск и Щелково. Общую длину необходимых в Московском регионе магистральных кабелей при оптимальном маршруте их прокладки можно оценить величиной ~ 250 км и, соответственно, длину подземных телекоммуникационных бетонных каналов ~ 250 км.

2) Несколько промежуточных магистральных кроссовых помещений – узлов связи, которые обычно располагаются через 40 – 70 км по трассе прокладки магистрального кабеля. При оптимальном географическом решении прокладки кабельных трасс промежуточных узлов связи должно быть от одного до трех. Также должно быть три кроссовых помещения в зданиях, где размещены сравниваемые эталоны.

3) Сетевое электропитание в кроссовых помещениях. Электропитание обязательно в тех промежуточных узлах связи, в которых будут размещены двунаправленные оптические усилители EDFA. Узлы связи, в которых будут размещены оптические усилители, должны также иметь системы кондиционирования, поддерживающие температуру в пределах градуса.

Представлен возможный вариант прокладки в Московском регионе магистрального кабеля, соединяющего на карте точки, в которых установлены три эталона (Рисунок 51). В представленном варианте кабель должен быть в основном располагаться вдоль бетонной кольцевой дороги вокруг Москвы.

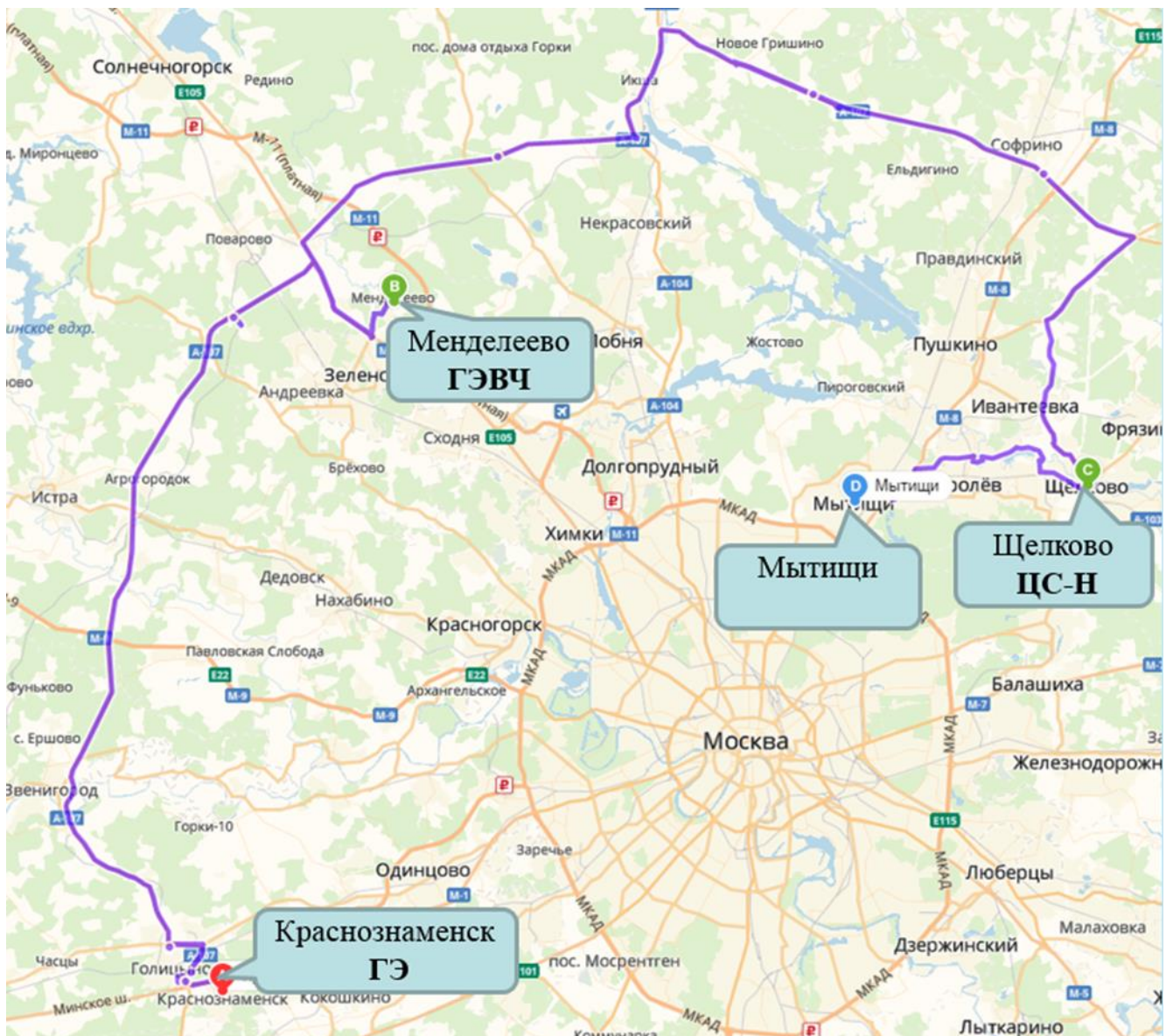


Рисунок 51. Место расположения эталонов вторичного ГЭ, ГЭВЧ и ЦС-Н в Московском регионе и возможный вариант прокладки магистрального оптического кабеля, необходимого для сравнения между собой трех эталонов: ГЭ с ЦС-Н, ГЭ с ГЭВЧ и ЦС-Н с ГЭВЧ [67]

Предлагаемая схема системы передачи ЭСЧ и одновременного сравнения по оптическому магистральному кабелю частот трех эталонов, расположенных в Московском регионе (Рисунок 52).

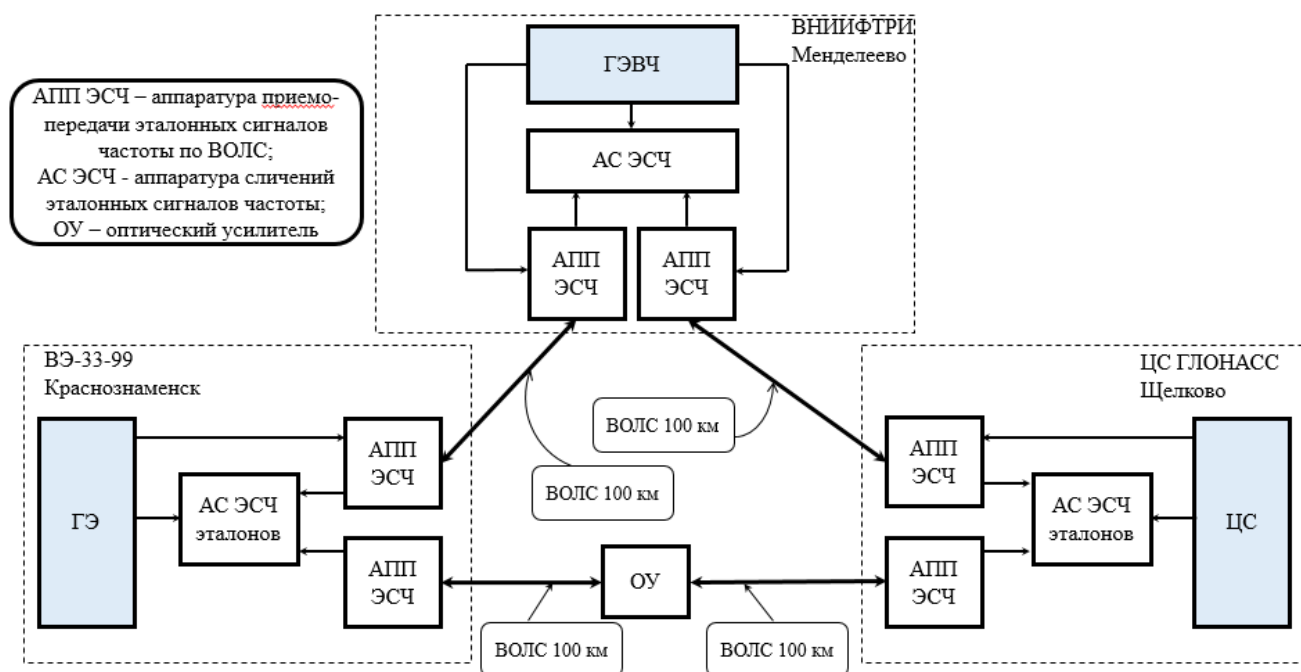


Рисунок 52. Упрощенная схема системы одновременного сравнения по оптическому магистральному кабелю ЭСЧ трех расположенных в Московском регионе эталонов

4.2.4 Другие требования к электронным и оптоэлектронным компонентам необходимым для системы передачи ЭСЧ по ВОЛС

Все устройства, передающие ЭСЧ, должны быть построены из термостабильных и термокомпенсированных электронных компонентов. Аппаратура должна выполнять свои функции так, чтобы радиочастотный сигнал, несущий информацию о эталонной частоте, в наименьшей степени зависел от

изменения термодинамических факторов окружающей среды и от изменения уровней сигналов. Отметим, что только у сконструированных для метрологических целей устройств (усилителей, умножителей) приводятся данные об их коэффициенте температурной задержки.

При создании систем передачи ЭСЧ по ВОЛС используются оптические компоненты - лазеры, изоляторы, циркуляторы, EDFA усилители, которые применяются и в телекоммуникационной аппаратуре. Но следует отметить, что требования к компонентам в телекоммуникации в целом существенно ниже, чем предъявляемые к аппаратуре системы передачи ЭСЧ по ВОЛС.

При передаче ЭСЧ используется встречная передача в одном волокне оптических сигналов, которые необходимо эффективно разделять. Это предъявляет высокие требования к качеству волоконных линий, оптических разъемов, циркуляторов, изоляторов. Высокие требования предъявляются и к качеству лазеров. Чаще всего для передачи ЭСЧ по ВОЛС применяются полупроводниковые DFB лазеры. У лазеров должен быть низкий относительный уровень шумов (RIN) и более стабильное значение длины волны оптического излучения, чем у лазеров стандартных модулей-трансммиттеров, используемых в телекоммуникации.

В телекоммуникации не требуется высокая точность поддержания длины волны излучения лазера, так как ширина стандартного телекоммуникационного оптического канала составляет 100 ГГц. Даже у термостабилизированных DFB лазеров с встроенной в них платой Пельтье при изменении температуры внешнего корпуса модуля частота лазера может измениться на несколько ГГц. Но для передачи ЭСЧ требование постоянства длины волны лазера при изменении окружающей температуры существенно. Так, например, изменение частоты 1,55 мкм лазера на величину 6 ГГц (что составляет 6% от ширины телекоммуникационного канала) приводит к изменению задержки сигнала в 100 км

волоконной линии на 100 пс из-за хроматической дисперсии волокна. Поэтому при передаче ЭСЧ на большое расстояние особое внимание нужно обращать на характеристики лазера, применяемого в оптическом трансмиттере.

4.3 Схема системы передачи 100 МГц ЭСЧ по 400 км ВОЛС с асимметричной электронной компенсацией

Для создания системы передачи ЭСЧ по ВОЛС, которую можно применить для сличений хабаровского вторичного эталона с дальневосточным ЦС-Н, размещенным в районе Комсомольска на Амуре, необходимо увеличить длину ВОЛС до 400 км и применить дополнительные оптические усилители.

Решение задачи передачи ЭСЧ по ВОЛС на 400 км можно реализовать, увеличив длину ВОЛС и добавив пропорционально число оптических усилителей, но это привело бы к уменьшению полосы фильтрации фазовых шумов, вносимых линией. Поэтому было выбрано другое решение для передачи ЭСЧ на 400 км. Достоинства представленной схемы системы передачи ЭСЧ на 400 км (Рисунок 53) заключаются в том, что в ней используется, два последовательных каскада системы, разработанной для передачи ЭСЧ на 200 км (Рисунок 47). Это позволяет не уменьшать полосу фильтрации фазовых шумов, вносимых линией.

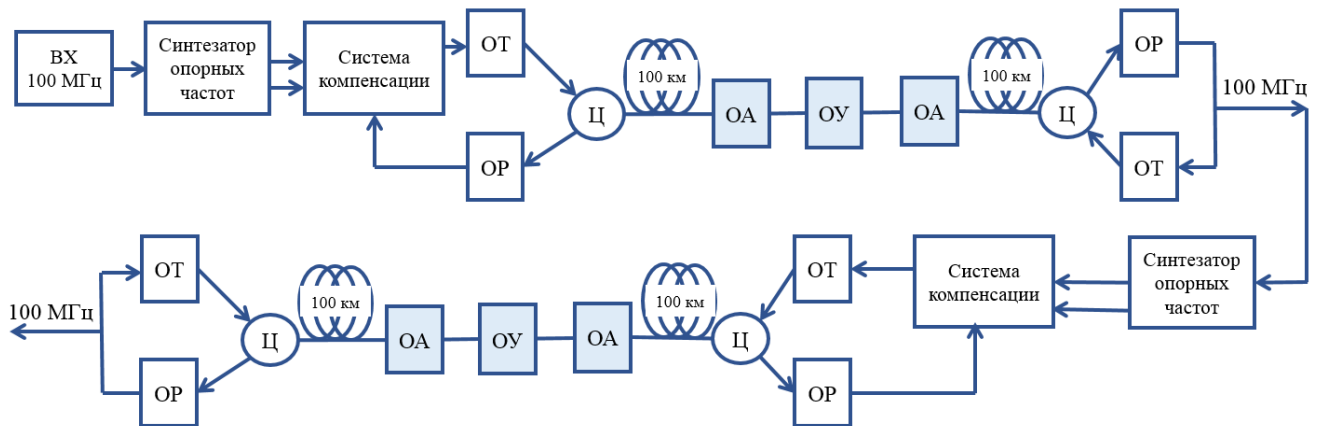


Рисунок 53. Схема передачи 100 МГц ЭСЧ по 400 км ВОЛС с двумя последовательно включенными системами асимметричной электронной компенсации

Ниже представлены результаты оценки суммарной стандартной неопределенности системы передачи по ВОЛС размера единицы частоты для линий длиной от $L = 100$ до 400 км:

$$u_{\text{с сп}} = \sqrt{(u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2)} = 4 \cdot 10^{-17} \dots 2,5 \cdot 10^{-16},$$

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

$u_{B1} \leq 2 \cdot 10^{-17}$ неопределенность по типу В, связанная с систематической погрешностью компаратора при $\Delta T = 0,2$ °С;

$u_{B2} \leq 2 \cdot 10^{-17}$ неопределенность по типу В, определяемая учетом температурных характеристик аппаратуры на концах линии при $\Delta T = 0,2$ °С.

На рисунке (Рисунок 54) представлено СКДО 100 МГц сигнала, принимаемого на конце волоконно-оптических линий длиной до 400 км, при передаче ЭСЧ с включенной системой асимметричной электронной компенсации.

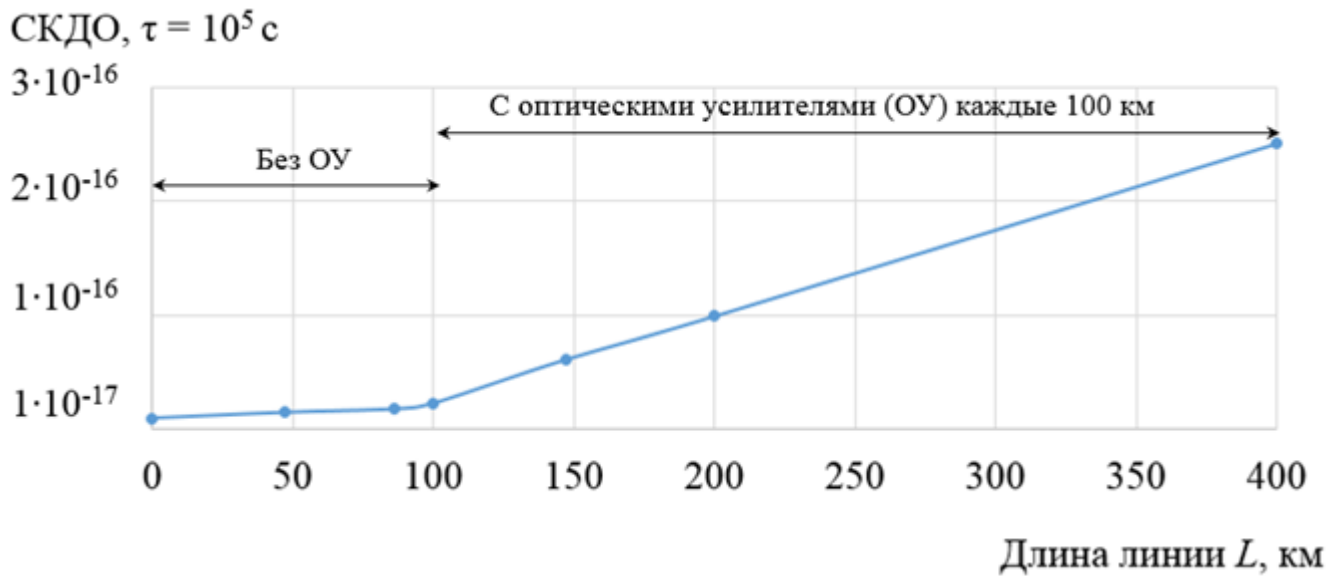


Рисунок 54. СКДО 100 МГц сигнала, принимаемого на конце волоконно линии, относительно сигнала водородного хранителя, который подается на вход системы передачи

4.4 Выводы

Из главы 4 можно сделать вывод о том, что система асимметричной электронной компенсации при использовании одного промежуточного двунаправленного оптического усилителя обеспечивает передачу по волоконной линии длиной 200 км сигнала 100 МГц водородного хранителя первичного эталона ГЭТ 1-2018 с неопределенностью измерений, вносимой системой передачи ЭСЧ по ВОЛС, не превышающей $9 \cdot 10^{-17}$, а для ВОЛС длиной 400 км с неопределенностью $2,5 \cdot 10^{-16}$.

Заключение

В диссертационной работе поставлена и решена актуальная научно-техническая задача разработки и исследований систем передачи эталонных радиочастотных сигналов на оптической несущей по волоконным линиям длиной до 200 км с активной электронной компенсацией. При этом 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:

Подтверждена возможность передачи по ВОЛС ЭСЧ водородного хранителя ГЭТ 1-2018 на расстояние до 200 км с использованием только одного промежуточного двунаправленного EDFA усилителя.

Оценена неопределенность, вносимая системой передачи ЭСЧ по ВОЛС, построенной на основе активной электронной компенсации для волоконных линий различной длины в пределах 400 км.

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 сокращений

5125A	Анализатор спектра/измеритель нестабильности частоты фирмы «Symmetricom»
ВОЛС	Волоконно-оптическая линия связи
ВРМБ	Вынужденное рассеяние Мандельштама-Брюллиена
ГК136 - ТС - 100М	Малошумящий управляемый кварцевый генератор фирмы «Морион»
ГЛОНАСС	Глобальная навигационная спутниковая система
ГМЦ ГСВЧ	Главный метрологический центр Государственной службы времени и частоты
ГНСС	глобальных навигационных спутниковых систем
ГЭВЧ	Государственный эталон времени и частоты
ГЭТ 1-2018	Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени
КГ1, КГ2	Кварцевый генератор 1 и 2
КНС	Космическая навигационная система
НСП	Неисключённая систематическая погрешность
ОВ	Оптическое волокно
ОЛЗ	Оптическая линия задержки
ПМД	Поляризационно-модовая дисперсия
РЧ сигнал	Радиочастотный сигнал
СВЧ	Сверхвысокочастотное излучение
СКДО	Среднее квадратическое двухвыборочное отклонение результата измерений частоты
СКО	Среднее квадратичное отклонение
СМ1, СМ2	Смеситель 1 и 2
УСЭ	Усиленная спонтанная эмиссия

ФАПЧ	Фазовая автоподстройка частоты
ФД1	Фазовый детектор
ФНЧ	Фильтр нижних частот
ФП1, ФП2	Фотоприемник 1 и 2
ФСЭСЧ	Система формирования сетки ЭСЧ
Ц	Циркулятор оптический
ЭЛЗ	Электронная линия задержки
ЭСЧ	Эталонный сигнал частоты
ЭСЧВ	Эталонный сигнал частоты и времени
APC	Angled Physical Contact – соединитель оптического волокна, торец наконечника имеет наклон в 8 или 9 градусов от перпендикуляра
ASE	Amplified Spontaneous Emission – усиленная спонтанная эмиссия
CCTF	Consultative Committee for Time and Frequency - Консультативный Комитет по времени и частоте
DFB – лазер	Distributed feedback laser - полупроводниковый лазер
DGD	Differential group delay - разность групповых запаздываний
DWDM	Dense wavelength division multiplexing - плотное мультиплексирование с разделением по длине волны
EDFA	Erbium doped fiber amplifier - волоконно-оптический усилитель на оптическом волокне, легированном ионами эрбия
EFTF	European Frequency and Time Forum - Европейский форум по времени и частоте
GNSS	Global Navigation Satellite System – глобальная спутниковая система навигации
GPS	Global Positioning System - система глобального позиционирования
JPL NASA	Jet Propulsion Laboratory - Лаборатория реактивного движения NASA
L1	Частота 1575.42 МГц

L2	Частота 1227.60 МГц
LNE - SYRTE	Laboratoire national de métrologie et d'essais - Système de Références Temps-Espace - Парижская обсерватория
LNFR - 400	Low noise frequency reference - генератор опорной частоты с ультранизким уровнем шумов
LPL	Laser Physics Laboratory - Лаборатория по лазерной физике Франции
MPLP-2018	Modern problems of laser physics – международный симпозиум по лазерной физике
PDL-100A	Перестраиваемая линия задержки
PMD	Polarization mode dispersion - Поляризационно - модовая дисперсия (ПМД)
PPP	Precise point positioning – GPS спутниковый метод точного позиционирования
QWM-7210SFA-CC-F10	Двунаправленный оптический EDFA усилитель
RS232	Последовательный интерфейс
SMA	Sub-miniature version A - разъём для подключения коаксиального кабеля
SMF-28	Single-mode fibers - Стандартное оптическое волокно
TWSTFT	Two Way Satellite Time and Frequency Transfer – двунаправленный (дуплексный) метод передачи сигналов времени и частоты через геостационарный спутник
T2L2	Спутниковый метод сличений часов, использующий станции лазерной дальнометрии
VCH - 315	Частотный компаратор фирмы «Время-Ч»

Библиография

1. Паспорт Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018. Менделеево: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2018.
2. Донченко С.И., Блинов И.Ю., Гончаров А.С., Норец И.Б. Современное состояние и перспективы развития эталонной базы Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли // Измерительная техника. 2015. № 1. С. 3-8.
3. Блинов И.Ю., Гончаров А.С., Пальчиков В.Г., Смирнов Ю.Ф. Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли и ее деятельность по обеспечению потребителей эталонными сигналами частоты и времени и информацией о точном времени // Вестник метролога. 2016. № 4. С. 7-11.
4. ГОСТ Р 8.967-2019 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Введ. 2020-01-01. Средства передачи единиц времени и частоты и национальной шкалы времени UTC(SU) от государственного первичного эталона Российской Федерации с использованием глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС.
5. BIPM. 20th meeting of the CCTF // TIME AND FREQUENCY TRANSFER METHODS. Севр, Франция. 2015. Vol. 42. P. 17.
6. Lopez O., Amy-Klein A., Lours M., Chardonnet C., Santarelli G. High-resolution microwave frequency dissemination on an 86-km urban optical link // <https://arxiv.org/abs/0907.3500>. 2009.

7. Calhoun M., Sydnor R., Diener W. A stabilized 100-Megahertz and 1-Gigahertz // Interplanetary Network Progress Report. Feb 2002. Vol. 15. No. 42.
8. Sliwczyński L., Krehlik P., Czubla A., Buczek L., Lipiński M. Dissemination of time and RF frequency via a stabilized fibre optic link over a distance of 420km // IOP PUBLISHING Metrologia. Feb 2013. Vol. 50. No. 2. P. 133.
9. Смирнов Ю.Ф., Норец И.Б., Наумов А.В. Реализация метода TWSTFT в ГМЦ ГСВЧ // Тезисы докладов 4-ой Всероссийской конференции "Фундаментальное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2011)". С.-Петербург. 2011. С. 232.
10. Смирнов Ю.Ф., Капитонов А.Л., Лузгин Д.В., Наумов А.В. Результаты исследований комплекса дуплексных сравнений шкал времени // Материалы 6-го международного симпозиума "Метрология времени и пространства". Менделеево. 2012. С. 88.
11. Zhang V., Parker T.E., Bumgarner R., Hirschauer J., McKinley A., Mitchell S., Powers E., Skinner J., Matsakis D. Recent Calibrations of UTC(NIST) - UTC(USNO) // Proceedings of the 44th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. 2012. pp. 35-42.
12. Zhang V., Parker T.E., Bumgarner R., Hirschauer J., McKinley A., Mitchell S., Powers E., Skinner J., Matsakis D. Recent calibrations of UTC (NIST) - UTC (USNO) // Proceedings of the 44th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. 2012. pp. 35-42.
13. Allan D.W., Weiss M.A. Accurate time and frequency transfer during common-view of GPS satellite // 34th Annual Frequency Control Symposium. May 1980. pp. 334-346.

14. Lewandowski W., Azoubib J., Klepczynski W. GPS: primary tool for time transfer // Proc. IEEE 87. 1999. pp. 163-172.
15. Petit G., Jiang Z. Joint with the 21st European Frequency and Time Forum // Precise point positioning for TAI computation. 2007. pp. 395-398.
16. Petit G., Jiang Z. GPS all in view time transfer for TAI computation // Metrologia. 2008. Vol. 45. pp. 35-45.
17. Jiang Z., Niessner A. 40th Ann. Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. // Calibrating GPS with TWSTFT for accurate time transfer. 2008.
18. Piester D., Rost M., Fujieda M., Feldmann T., Bauch A. Remote atomic clock synchronization via satellites and optical fibers // Advances in Radio Science, Vol. 9, 2011. pp. 1-7.
19. Thomas C., Wolf P., Uhrich P., Shafer W., Nau H., Veillet C. NASA Conference Publication 33022: 6th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) // anticipated uncertainty budgets of praretime and T2L2 techniques as applied to ExTRAS. 1994. pp. 127-140.
20. Kihara M., Imaoka A. in Proc. 9th EFTF // SDH-based time and frequency transfer system. Besancon, France. 1995. pp. 317-322.
21. Hisadome K., Kihara M. Gigabit Ethernet-Based Time Transfer System // Electrical Engineering in Japan. 2007. Vol. 160. No. 3.
22. Calhoun M., Wang R., Kirk A., Diener W., Dick J., Tjoelker R.L. Stabilized reference frequency distribution for radio science with the cassini spacecraft and the deep space network // 32 nd Annual PTTI Meeting 2000. 2000.

23. Huang S., Calhoun M., Tjoelker R. Optical Links and RF Distribution for Antenna Arrays // Proceedings of the 2006 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition. 2006.
24. Daussy C., Lopez O., Amy-Klein A., Goncharov A., Guinet M., Chardonnet C., Narbonneau F., Lours M., Chamon D., Bize S., et al. Long-distance frequency dissemination with a resolution of 10^{-17} // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 203904. No. 94.
25. Lopez O., Haboucha A., Kéfélian F., Jiang H., Chanteau B., Roncin V., Chardonnet C., Amy-Klein A., Santarelli G. Cascaded multiplexed optical link on a telecommunication network for frequency dissemination // OPTICS EXPRESS. Aug 2010. Vol. 18. No. 16.
26. Lopez O., Kanj A., Pottie P.E., Rovera D., Achkar J., Chardonnet C., Amy-Klein A., Santarelli G. Simultaneous remote transfer of accurate timing and optical frequency over a public fiber network // Springer Journal of Applied Physics B. 2013. Vol. 110. No. 3.
27. Lopez O., Haboucha A., Chanteau B., Chardonnet C., Amy-Klein A., Santarelli G. Ultra-stable long distance optical frequency distribution using the Internet fiber network. 2012. arXiv.org.
28. Ebenhag S.C., Jaldenhag K., Jarlemark P., Hedekvist P., Emardson R., Lothberg P. 39th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting // Time Transfer Using an Asynchronous Computer Network: Results from a 500 km Baseline Experiment. 2007. P. 43.
29. Smotlacha V., Kuna A., Mache W. in Proceedings of the PTTI // Time Transfer In Optical Network. 2010.

30. Иванов А.А., Моховиков Н.В., Каган С.Н., Малимон А.Н., Пестерев С.В., Пальчиков В.Г., Галышев А.А. Сличения территориально удаленных эталонов времени и частоты с применением волоконно-оптических линий связи // Труды ИПА РАН. 2012. С. 131-135.
31. Константинович О.Г., Вериге А.М., Новожилов Е.О., Рыжков А.В., Слюняев А.Н. Способ построения системы единого времени с использованием двунаправленных цифровых каналов электросвязи, РФ 2409901, 2011.
32. Галышев А.А., Каган С.Н., Малимон А.Н., Пальчиков В.Г., Шибеева Д.М. Передача эталонных радиочастот по волоконной линии с оптоэлектронной компенсацией вносимых линией возмущений // Материалы 6-ого международного симпозиума «Метрология времени и пространства. 17-19 сентября 2012. С. 88.
33. Малимон А.Н., Галышев А.А. Результаты исследований оптоэлектронной системы компенсации возмущений фазы передаваемого по волоконно-оптической линии эталонного сигнала //. Метрология В XXI веке - Доклады научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов. 28 марта 2013. С. 70.
34. Шибеева Д.М., Балаев Р.И., Малимон А.Н. О передаче эталонных частот по оптоволоконной линии с электронной системой компенсации возмущений фазы передаваемого эталонного сигнала. Метрология В XXI веке // Доклады научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов. 28 марта 2013. С. 75.
35. Hanssen J.L., Crane S.G., Ekstrom C.R. One-way two-color fiber link for frequency transfer // IEEE International. 2012.

36. Hedekvist P.O., Ebenhag S.C. Time and Frequency Transfer in Optical Fibers // Recent Progress in Optical Fiber Research. pp. 371-386.
37. Wang B., Gao C., Chen W.L., Miao J., Zhu X., Bai Y., Feng Y.Y., Li T.C., Wang L.J. Precise and continuous time and frequency synchronisation at the 5×10^{-19} accuracy level [Электронный ресурс] // Scientific reports 2012;2:556: [сайт]. [2012]. URL: www.nature.com/scientificreports
38. Piester D., Fujieda M., Rost M., Bauch A. Time transfer through optical fibers (TTTOF): first results of calibrated clock comparisons // Proc. 41st Annual Precise Time Interval (PTTI). 2009.
39. Коханенко А.П., Маслова Ю.В. Волоконно-оптические линии связи. Физические основы работы оптических волокон. Томск: Издательский дом Томского Государственного университета, 2013. 64 с.
40. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи. Москва: ЛЕСАРпт, 2003. 288 с.
41. Жирар А. Руководство по технологии и тестированию систем WDM. Москва: EXFO, 2001. 264 с.
42. Воронин В.Г., Наний О.Е. Основы нелинейной волоконной оптики. Москва: Университетская книга, 2011. 128 с.
43. Хабарова К.Ю., Калганова Е.С., Колачевский Н.Н. Передача точных сигналов частоты и времени в оптическом диапазоне // Успехи физических наук. февраль 2018. Т. 188. № 2. С. 221-230.
44. Риле Ф. Стандарты частоты принципы и приложения / Пер. с англ. Москва: Физматлит, 2009. 512 с.

45. Sliwczynski L., Krehlik P., Lipinski M. Optical fibers in time and frequency transfer // Measurement Science and Technology. 2010. Vol. 075302. No. 21.
46. Корнеева И.А. Современные климатические изменения нижней тропосферы и деятельного слоя почвы в московском регионе, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, диссертация канд. географ. наук: 25.00.30 2015. - 247 с.
47. Житомирский И.С. Температурный скин-слой земной коры и вечная мерзлота // http://is-zhitomirsky.narod.ru/R_Temperature_Skin_Layer.htm.
48. Santarelli G., Bize S., Narbonneau F., Lours M., Clairon A., Lopez O., Daussy C., Amy-Klein A., Chardonnet C. High Resolution Frequency Standard Dissemination via Optical Fibre // arXiv:physics/0603125 [physics.optics], Vol. 90, No. 6, Mar 2006. P. 060402.
49. Lopez O., Amy-Klein A., Daussy C., Chardonnet C., Narbonneau F., Lours M., Santarelli G. 86-km optical link with a resolution of 2×10^{-18} for RF frequency transfer // in The European Physical Journal D. 2008. Vol. 48. pp. 35-41.
50. Федорова Д.М., Балаев Р.И., Курчанов А.Ф., Троян В.И., Малимон А.Н. Передача эталонных частот по волоконно-оптической линии с электронной компенсацией возмущений // Измерительная техника. 2015. № 9. С. 34-37.
51. Балаев Р.И., Шибеева Д.М., Малимон А.Н., Курчанов А.Ф. Характеристики фазостабильных коаксиальных и оптических кабелей, используемых для передачи информации об эталонном времени и частоте // Альманах современной метрологии. 2015. № 2. С. 165-179.
52. Amemiya M., Imae M., Fujii Y., Suzuyama T., Ohshima S. Simple time and frequency dissemination method using optical fiber network // IEEE

TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT. may 2008. Vol. 57. No. 5.

53. Малимон А.Н. Передача эталонных сигналов времени и частоты по волоконно-оптическим линиям // Альманах современной технологии. 2016. № 8. С. 198-268.
54. Балаев Р.И. Передача эталонных частот по 200 км ВОЛС с электронной компенсацией вносимых линией возмущений // Метрология в XXI веке. Материалы V научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов. 2018. Менделеево. С. 3.
55. PDL-100A [Электронный ресурс] // <https://www.colbyinstruments.com>: [сайт]. [2009-2020].
56. Krehlik P., Sliwczynski L., Buczek L., Lipinski M. Fiber-optic joint time and frequency transfer with active stabilization of propagation delay // IEEE Transaction and Measurement. Oct 2012. Vol. 61. No. 10. pp. 2845-2851.
57. <http://spectradynamics.ru/products/generatory-opornoy-chastoty/lnfr-400> [Электронный ресурс] [2000-2020].
58. <http://spectradynamics.ru/products/sintezatory-chastot/fs100-rm> [Электронный ресурс] [2000-2020].
59. chromeextension://oemmndcbldboiebfnladdacbdm/adm/http://morion.com.ru/catalog_pdf/61,%20%D0%93%D0%9A136-%D0%A2%D0%A1.pdf [Электронный ресурс] [2012-2020].
60. <https://www.eksis.ru/catalog/statsionarnye-termogigrometry-ivtm-7/product150.php> [Электронный ресурс] // Термогигрометр ИВТМ-7/2-С-4Р-2А: [сайт]. [2003-2020].

61. ГОСТ 8.381-2009 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Эталоны. Способы выражения точности. Введ. 2012-01-01.
62. <https://www.binder-world.com/ru/produkty/klimaticheskie-kamery-postoannyh-uslovij/seria-kbf/kbf-720> [Электронный ресурс] [2015-2020].
63. Балаев Р.И., Малимон А.Н., Федорова Д.М., Курчанов А.Ф., Троян В.И. Оценка точности передачи эталонного сигнала водородного генератора по волоконно-оптической линии связи с электронной компенсацией возмущений // Измерительная техника. 2017. № 8. С. 38-42.
64. Технические характеристики двунаправленного оптического EDFA усилителя QTECH. [Электронный ресурс] URL: <http://www.qtech.ru/catalog/DWDM/258/chars.htm>
65. Grandway FHA2S01 - оптический аттенюатор [Электронный ресурс] // <https://tools.ru/tovar/69475/>: [сайт]. [2011-2020].
66. Calonico D. 21 CCTF. Study group on optical fiber links for UTC the CCTF WG ATFT // https://www.bipm.org/cc/CCTF/Allowed/21/CCTF_17-46_SGOF.pdf. 2017.
67. <https://yandex.ru/maps> [Электронный ресурс] [2019].
68. Беляев А.А., Демидов Н.А., Медведев С.Ю., Пастухов А.В., Сахаров Б.А., Блинов И.Ю. Аппаратура водородных хранителей эталонов единиц времени и частоты // Вестник метролога. 2015. № 2. С. 14-23.
69. Балаев Р.И., Федорова Д.М., Малимон А.Н., Курчанов А.Ф., Бакулинская В.В. Методы передачи эталонных сигналов частоты и времени по волоконно-оптическим линиям с компенсацией возмущений, вносимых линией // Мир измерений. 2018. № 1.