

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук  
Крутикова Владимира Николаевича на диссертацию  
Федоровой Дарьи Михайловны, выполненную на тему:

«Разработка волоконно-оптической системы передачи эталонных сигналов частоты с электронной компенсацией возмущений, вносимых волоконной линией, для сличений территориально удаленных эталонов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.15 – «Метрология и метрологическое обеспечение»

Диссертационная работа Федоровой Дарьи Михайловны посвящена решению научно-технических задач, связанных с разработкой и исследованием волоконно-оптической системы передачи эталонных сигналов частоты с электронной компенсацией возмущений, вносимых волоконной линией, с целью обеспечения сличений территориально удаленных эталонов единиц частоты.

**Актуальность темы.** Прогресс в разработке высокостабильных эталонов единиц времени и частоты, в том числе, водородных стандартов частоты, рубидиевых стандартов частоты на холодных атомах, цезиевых стандартов частоты фонтанного типа с нестабильностью частоты менее  $1 \cdot 10^{-15}$  на интервале времени измерения 1 сутки, влечет необходимость создания средств сличений эталонов с вносимой нестабильностью, как минимум, в три раза меньшей, чем нестабильность частоты сличаемых эталонов. Создание таких высокоточных средств сличений само по себе представляет непростую научно-техническую задачу. Ее решение осложняется тем, что при сличении эталонов различных метрологических лабораторий, расстояния между пунктами размещения эталонов могут достигать нескольких сотен километров. Существующие методы и средства сличений территориально удаленных эталонов единиц времени и частоты (например, метод с использованием перевозимых квантовых часов, метод сличений с использованием аппаратуры приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем, дуплексный метод передачи сигналов через геостационарный спутник) характеризуются недостаточной точностью (погрешность сравнения частот не менее  $1 \cdot 10^{-15}$ ). Весьма перспективным

путем повышения точности сравнений частот территориально удаленных эталонов является использование в качестве каналов сличений волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Такие линии имеют значительно меньшее удельное ослабление передаваемых сигналов и высокую помехозащищенность по сравнению с радиоканалами. Однако, при передаче эталонных сигналов частоты на расстояния десятки километров и более, влияние оптического волокна, как среды передачи сигнала, становится существенным, так как вносимые искажения сигнала (например, фазовые) снижают точность переданного сигнала. В частности, эталонный сигнал частоты можно передать по волокну на 100 км со средним квадратическим относительным двухвыборочным отклонением (СКДО)  $\sim 5 \cdot 10^{-14}$  на интервале времени измерения  $10^5$  с. В настоящее время этого уже не достаточно..

Поэтому, для достижения заданной точности сличений эталонов и передачи эталонных сигналов частоты на расстояния, превышающие 100 км с вносимой неопределенностью не более  $1 \cdot 10^{-16}$ , необходима разработка новых методов передачи эталонных сигналов частоты, учитывающих вносимые ВОЛС фазовые возмущения, и создание специализированных волоконно-оптических систем передачи эталонных сигналов частоты с функцией компенсации возмущений. Поскольку, решаемая в диссертации научно-техническая задача направлена на обеспечение дистанционных сличений эталонов, играющих важную роль в развитии навигационных и информационных технологий, она несомненно является актуальной. Полученные новые научные результаты имеют существенное значение для широкого круга потребителей, в первую очередь для навигационной системы ГЛОНАСС в части обеспечения единства время-частотных измерений, а также для совершенствования систем сличений территориально разнесенных эталонов и обеспечения информационных систем..

### **Краткая характеристика основного содержания диссертации.**

**Объектом исследования** диссертационной работы являются системы передачи радиочастотных эталонных сигналов по волоконно-оптическим линиям, которые могут обеспечить проведение высокоточных сличений территориально удаленных друг от друга эталонов.

**Цель работы:** совершенствование технических средств Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли Российской Федерации, в части дистанционных сличений эталонной аппаратуры ГСВЧ.

*Представленная диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.*

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, указаны цель и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, показаны практическая значимость, внедрение полученных результатов и определен личный вклад автора.

**В первой главе** проведен анализ способов решения задачи передачи эталонных сигналов для сличения эталонов с помощью методов, использующих спутниковые и наземные каналы связи. Отмечены физические факторы оптического волокна и окружающей среды, которые возмущают фазу передаваемого эталонного радиочастотного сигнала, тем самым, ухудшая его метрологические характеристики. Описана схема передачи эталонных сигналов частоты (ЭСЧ) в коротких линиях без устройств компенсации. Выполнен анализ метеорологических данных для Московского региона, где будет размещена разрабатываемая система передачи ЭСЧ по ВОЛС. Сделан вывод о том, что для сличения удаленных эталонов, расположенных в Московском регионе, необходимо создавать систему передачи эталонных радиочастотных сигналов с активной компенсацией возмущений, вносимых ВОЛС.

**Во второй главе** представлены методы компенсации вносимых каналом ВОЛС возмущений фазы передаваемого эталонного сигнала. Приведено обоснование выбора решения задачи сличения с использованием ВОЛС частот водородных хранителей трех эталонов, расположенных в Московском регионе на расстоянии до 200 км, с неопределенностью измерений, вносимой системой передачи, не более  $1 \cdot 10^{-16}$ . Дано описание разработанной системы передачи ЭСЧ по ВОЛС с асимметричной электронной компенсацией. Представлены уравнения, поясняющие принцип работы схемы с электронной компенсацией. В соответствии с ГОСТ 8.381-2009 разработана модель для расчёта вклада системы передачи по ВОЛС в

суммарную неопределенность измерений при передаче единицы частоты. Представлены результаты измерений, проведенных при испытаниях системы передачи ЭСЧ по 100 км ВОЛС. Сделан вывод, что точность компенсации можно улучшить в несколько раз, если заставить температуру на концах ВОЛС в местах размещения узлов и электронной аппаратуры, входящей в систему передачи ЭСЧ.

**В третьей главе** описаны эксперименты по передаче ЭСЧ при поддержании постоянства температуры в местах размещения аппаратуры, входящей в систему передачи. Представлены результаты проведенных испытаний системы передачи ЭСЧ по ВОЛС длиной 100 км с электронной аппаратурой, подключаемой к концам ВОЛС, помещенной в камеру постоянных климатических условий. Результаты испытаний подтвердили, что неопределенность измерений, вносимая системой передачи эталонного сигнала по 100 км линии, не превышает  $4 \cdot 10^{-17}$  на интервале времени измерений  $10^5$  с.

**Четвертая глава** посвящена системе передачи ЭСЧ по ВОЛС с асимметричной электронной системой компенсации по линиям длиной более 100 км с использованием оптического двунаправленного усилителя. Представлен проект системы одновременного сличения по оптическому кабелю трех эталонов времени и частоты, расположенных в Московском регионе. Описана система передачи ЭСЧ по ВОЛС для использования волоконной линии длиной до 400 км.

**В заключении** диссертационной работы изложены основные результаты выполненной работы.

#### **Научная новизна диссертационного исследования:**

1. Впервые разработана система передачи ЭСЧ по ВОЛС с асимметричной электронной компенсацией, обеспечиваемой двумя петлями фазовой автоподстройки частоты для осуществления как фильтрации шумов сигнала, прошедшего по линии туда и обратно, так и компенсационной коррекции фазы передаваемого эталонного сигнала.

2. Впервые реализована и исследована система передачи ЭСЧ по ВОЛС, построенная по схеме асимметричной компенсации, обеспечивающая передачу сигнала частотой 100 МГц на расстояние 200 км с вносимой неопределенностью не более  $1 \cdot 10^{-16}$ .

3. Впервые разработана и экспериментально исследована система передачи ЭСЧ по ВОЛС на 400 км с асимметричной электронной компенсацией, использующая минимальное количество оптических усилителей, позволяющая повысить точность передачи ЭСЧ до значений вносимой неопределенности не более  $3 \cdot 10^{-16}$ .

**Теоретическая значимость.** Теоретическая значимость проведенных исследований состоит в выявлении основных факторов, влияющих на точностные характеристики передачи ЭСЧ по ВОЛС, анализе их вклада в суммарную неопределенность результатов сравнений частот эталонов, и разработке метода, позволяющего повысить точность передачи ЭСЧ за счет компенсации вносимых ВОЛС фазовых возмущений передаваемых сигналов.

**Практическая значимость.** Работа имеет ярко выраженную практическую направленность. Её практическая значимость состоит в разработке системы, обеспечивающей передачу ЭСЧ по ВОЛС и сличения удаленных эталонов с вносимой стандартной неопределенностью не более  $1 \cdot 10^{-16}$ . Использование разработанной системы позволит проводить взаимные сличения современных и перспективных эталонов единиц частоты, в т.ч. территориально удаленных на большие расстояния.

**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 фазовой автоподстройке частоты. Вклад автора состоит в разработке и исследованиях системы передачи ЭСЧ по ВОЛС длиной до 200 км по схеме асимметричной электронной компенсации, в разработке и исследованиях системы передачи ЭСЧ по ВОЛС длиной до 400 км, реализующей асимметричную электронную компенсацию с использованием двух оптических двунаправленных усилителей.

**Достоверность результатов работы.** Результаты исследований подтверждаются достоверными экспериментальными методиками, реализованными 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.** Результаты диссертационного исследования содержатся в 9 публикациях, среди них 4 публикации входят в список реферируемых журналов, рекомендованных ВАК.

**Замечания, возникшие в процессе изучения предоставленных материалов:**

1. Из материалов автореферата не ясно, возможно и целесообразно ли использовать разработанный метод компенсации фазовых возмущений для сличения эталонов, воспроизводящих сигналы эталонных частот 5 и 10 МГц, а также для передачи ЭСЧ 5 и 10 МГц к потребителям.

2. Из текста автореферата не ясно, учитывался ли эффект вынужденного рассеяния Мандельштама - Бриллюэна при оценке максимальной мощности излучения, подаваемого в ВОЛС.

3. В работе не приведен диапазон температур, в которых может находиться аппаратура на концах ВОЛС, а указаны только требования к точности ее поддержания.

4. Присутствуют редакционные замечания, например, на стр. 21 автореферата и стр. 51 диссертации.

### **Заключение.**

Отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки работы. Полученные автором результаты изложены логично и последовательно. Диссертация Федоровой Д.М. представляет собой законченную научно-квалификационную работу.

Основные результаты диссертации опубликованы в реферируемых изданиях, докладывались на научно-практических (в т.ч. международных) конференциях.

Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание. Материалы работы свидетельствуют о высоком научно-техническом уровне проведенных исследований, достоверность разработанных диссертантом

