

УДК 621.373.8:621.372.8

ПЕРЕДАЧА ЭТАЛОННЫХ СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ ЛИНИЯМ**А.Н. Малимон***ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
amalimon@mail.ru*

В работе описываются методы передачи эталонных сигналов частоты и времени (ЭСЧВ) по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС). Дается общая характеристика способа передачи радиочастотных эталонных сигналов по волоконно-оптическим линиям связи, направлений исследований по проблеме и методам передачи ЭСЧВ по ВОЛС. Значительное место уделяется схемам передачи ЭСЧВ по ВОЛС с компенсацией и их конкретной реализации в экспериментах различных лабораторий. Один из разделов посвящен передаче ЭСЧВ в телекоммуникационной сети ВОЛС по методу Кихары, учитывая, что дуплексный метод передачи ЭСЧВ в телекоммуникационном канале, предложенный Кихарой, был стимулом последующих исследований по проблеме передачи ЭСЧВ по ВОЛС. Дается теоретическая оценка влияния вариаций температуры линии на точность передачи ЭСЧВ по ВОЛС.

The paper describes methods of transmitting reference signals of time and frequency through fiber optic lines. General characteristics of the methods of reference signals transmission in fiber-optic lines is given. The directions of scientific researches on the problem of transmission of reference signals are listed. Special attention is paid to transmission schemes with compensation to eliminate phase disturbances of reference signal which are introduced by the fiber. The various implementations of such compensation schemes in experiments performed in different laboratories are discussed. One section of the article is devoted to the transmission of reference signals in a telecommunication fiber network by the Kihara method, as proposed by M. Kihara. Kihara method of duplex transmission of reference signals in communication channels was a stimulus for further studies on the issue. The effect of temperature variations of the fiber on the accuracy of the transmission of reference signals is theoretically considered.

Ключевые слова: стандарты частоты, передача эталонных сигналов частоты и времени по волоконной линии, погрешность передачи эталонных сигналов

1. Введение

В последние два десятилетия появились новые квантовые стандарты частоты микроволнового и оптического диапазонов на охлажденных атомах и ионах. Точность воспроизведения единицы частоты новыми эталонами фонтанного типа на охлажденных атомах цезия лежит на уровне $\sim 5 \cdot 10^{-16}$, что более, чем на порядок выше по сравнению с эталонами на пучках атомов цезия [1,2]. Точность новых оптических стандартов на охлажденных атомах и ионах была улучшена более, чем на два порядка, до уровня $\sim 5 \cdot 10^{-17}$ [3]. И в эти же годы на основе фемтосекундных лазеров были созданы компактные переносчики эталонных частот из радиодиапазона в оптический, что обеспечило эффективный и точный канал сличений оптических и микроволновых стандартов.

Альманах современной метрологии, 2016, №8

Повышение точности эталонов определило актуальность задачи совершенствования и развития систем распространения на большие расстояния по различным каналам эталонных частот и сигналов времени. Стало необходимым обеспечение доставки эталонных сигналов времени и частоты (ЭСЧВ) внутри территориально рассредоточенной Государственной службы времени и частоты (ГСВЧ) на новом метрологическом уровне точности. Так, прогресс в области разработки новых стандартов микроволнового и оптического диапазонов, демонстрирующих более высокую стабильность и точность воспроизведения частоты, и необходимость совершенствования систем, использующих эталонные сигналы, таких, например, как наземный сегмент космического комплекса системы ГЛОНАСС, выдвинули новые требования к аппаратуре, обеспечивающей распространение времени и проведение частотно-временных сличений. Одно из таких требований - повышение точности сличений пространственно удаленных друг от друга микроволновых стандартов частоты.

Важную роль в метрологическом обеспечении объектов наземного сегмента системы ГЛОНАСС играет рабочий эталон частоты и времени, установленный на таком объекте. В качестве рабочего эталона частоты и времени на наземных объектах системы ГЛОНАСС используются активные водородные генераторы, которые имеют долговременную стабильность частоты $\sim 10^{-15}$ на интервалах усреднения от 1 000 с до нескольких суток [2]. Различными составными частями объекта наземного сегмента системы ГЛОНАСС, расположенным на его территории, необходимы опорные сигналы от рабочего эталона. Эти составные части могут быть расположены на удалении до нескольких километров от рабочего эталона. Возникает необходимость передачи по территории объекта опорных сигналов частоты и времени от рабочего эталона к конкретным удаленным его составным частям. Кроме того, необходимо с минимальной погрешностью передавать эталонные сигналы от первичного ГЭВЧ к рабочему эталону ЦС ГЛОНАСС, а эти эталоны удалены друг от друга на расстояние ~ 60 км. В интересах повышения стабильности и надёжности формирования шкалы времени системы ГЛОНАСС необходимо создавать новые высокоточные каналы передачи ЭСЧВ на расстоянии от одного до ста километров.

В настоящее время сличение пространственно удаленных друг от друга стандартов частоты возможно с помощью перевозимых квантовых часов, с помощью спутников глобальной навигационной системы и специальных спутниковых дуплексных каналов сличений. Но точность проведения таких сличений ограничена характеристиками перевозимых стандартов, приемо-передающей частью глобальной навигационной системы и спутниковых дуплексных каналов.

Перспективным альтернативным методом по распространению времени и

Альманах современной метрологии, 2016, №8

передаче эталонных частот является использование наземных каналов волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). В предыдущие десять лет метрологические центры мира и лаборатории по лазерной физике сосредоточили усилия на исследованиях по передаче эталонных частот по оптическому волокну. Важно отметить, что передачу эталонных сигналов по волоконно-оптическому кабелю и проведение сличений удаленных друг от друга стандартов частоты можно выполнить не только на основе специально прокладываемых для этих целей каналов ВОЛС, но также применяя существующие незадействованные телекоммуникационными компаниями, так называемые «темные» нити оптических кабелей.

В странах с развитой структурой телекоммуникационных сетей метрологическим лабораториям без значительных капитальных вложений удалось выполнить к настоящему времени ряд экспериментов по передаче эталонных частот, используя городские и межрегиональные сети ВОЛС. С помощью ВОЛС были проведены сличения между установленными в метрологических центрах стандартами частоты, которые были удалены друг от друга на десятки и сотни километров.

Отметим также, что до сих пор для передачи эталонных сигналов частоты и времени на расстояние от нескольких сотен метров до нескольких километров почти повсеместно использовались радиочастотные коаксиальные кабели с буферными усилителями, установленными на концах такой линии передачи. При создании новых современных систем доставки эталонных радиочастотных и временных сигналов по территории объектов на расстояние до нескольких километров все шире применяются волоконно-оптические линии с подключенными к их концам электрооптическими преобразователями, обеспечивающими перенос радиочастотных сигналов на уровень оптической несущей и обратно. В таких системах доставки ЭСЧВ эталонный сигнал модулирует по амплитуде излучение лазера, подключенного к волоконной линии, а на удаленном конце линии оно демодулируется фотоприемником и, таким образом, выделяется эталонный сигнал, который усиливается и поступает потребителю. Использование волоконно-оптических линий для передачи эталонных сигналов дает ряд преимуществ по сравнению с коаксиальными кабелями. Одно из них связано с тем, что длинная волоконная линия имеет в сотни раз меньший коэффициент погонного затухания, чем коаксиальный кабель такой же длины. Второе состоит в том, что волоконная линия, выполненная на основе стандартного оптического кабеля, имеет на порядок меньший коэффициент линейного температурного расширения по сравнению со стандартным коаксиальным кабелем. В результате по волоконным линиям можно передать эталонные сигналы частоты и времени без регенерации на значительно большие расстояния и с меньшей погрешностью, чем по коаксиальному кабелю.

За рубежом ведутся исследования и разработки, направленные на создание систем передачи по ВОЛС аналоговых сигналов радиодиапазона [4], а также специализированной аппаратуры, которая обеспечивает передачу по волоконно-оптическим линиям опорных эталонных радиочастотных сигналов. Для высокоточной передачи эталонных сигналов на расстояния в десятки и сотни километров эту аппаратуру необходимо дополнять устройствами, компенсирующими вносимые линией возмущения фазы передаваемого эталонного сигнала. Но следует отметить, что при передаче эталонных сигналов по волоконно-оптическим линиям длиной до нескольких километров необходимый для многих применений уровень точности можно получить без использования сложных дополнительных устройств компенсации.

2. Методы передачи ЭСЧВ по ВОЛС и результаты исследований

2.1. Общая характеристика способа передачи ЭСЧВ по ВОЛС

Для передачи эталонной частоты по каналу ВОЛС можно использовать в качестве переносчика информации о частоте непосредственно непрерывное оптическое излучение, частота которого определяется оптическим стандартом.

Возможна также передача информации о частоте по каналу ВОЛС путем модуляции оптического сигнала радиочастотным эталонным сигналом. В этом случае частота модулирующего радиосигнала синтезируется на основе микроволнового эталона или стандарта, а оптическое излучение служит просто несущей для передачи эталонного радиочастотного сигнала в канале ВОЛС.

Первый способ прямой передачи эталонной оптической частоты больше подходит для сличений оптических стандартов. А второй способ, когда передается эталонная радиочастота посредством модуляции оптической несущей, более адекватен сличениям микроволновых стандартов.

Первый способ требует использования фазовой модуляции передаваемого по каналу оптического сигнала и предъявляет высокие требования к спектральным характеристикам оптической несущей. Необходимость применения фазовой модуляции при передаче высокостабильного сигнала оптической частоты необходимо для обеспечения функционирования устройств компенсации шумов канала ВОЛС.

Второй метод использует амплитудную модуляцию оптического сигнала эталонным радиочастотным сигналом и не предъявляет очень высоких требований к спектральным характеристикам оптической несущей. Таким образом, при передаче эталонных частот по каналам ВОЛС используется ампли-

тудная и фазовая модуляция, так же как при передаче с помощью электромагнитного излучения обычной информации.

Предметом настоящих исследований является передача эталонных радиочастот по ВОЛС. Как отмечено выше, передача радиочастотного эталонного сигнала в оптическом волокне реализуется путем амплитудной модуляции оптической несущей таким эталонным сигналом. Передаваемый эталонный сигнал обычно частотой 5... 2000 МГц синтезируется на основе выходного сигнала микроволнового стандарта частоты. Этот эталонный сигнал, например, частотой 100 МГц модулирует ток полупроводникового лазера с длиной волны 1,55 мкм. Выбор такой длины волны обусловлен тем, что затухание лазерного излучения с длиной волны 1,55 мкм при распространении его в канале ВОЛС минимально. Длина волны 1,55 мкм получила название основного окна прозрачности оптического волокна. Модулированное по амплитуде излучение лазера распространяется по каналу ВОЛС и на удаленном его конце детектируется. На удаленном конце фотоприемник превращает амплитудно-модулированное оптическое излучение лазера в радиочастотный сигнал с частотой 100 МГц, который синхронизован по фазе с микроволновым стандартом, который установлен у начала ВОЛС. Но канал ВОЛС вносит случайные и температурно-обусловленные возмущения фазы передаваемого эталонного сигнала, что оказывает влияние на его частоту. После детектирования у эталонного сигнала на выходе из ВОЛС повышается уровень его фазовых шумов, а потому ухудшается нестабильность частоты эталонного сигнала, получаемого на удаленном конце канала.

2.1.1. Направления исследований по проблеме и методы передачи ЭСЧВ по ВОЛС



Рис. 1. Направления исследований по проблеме передачи ЭСЧВ по ВОЛС

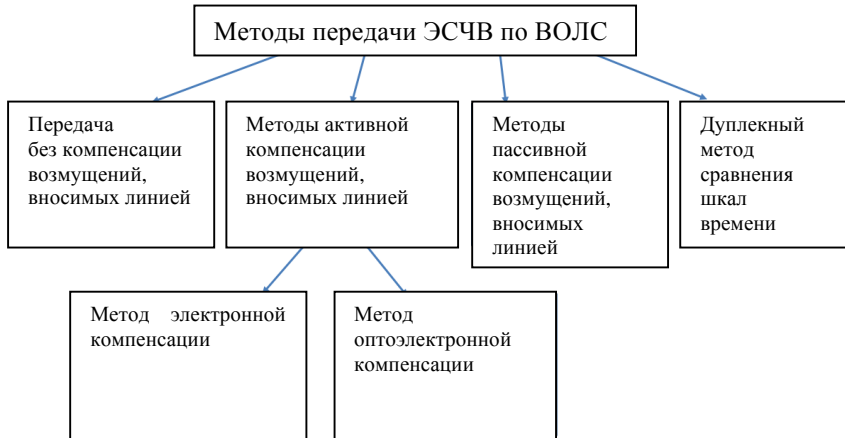


Рис. 2. Методы передачи ЭСЧВ по ВОЛС

2.1.2. О специфике задачи передачи ЭСЧВ по сравнению с задачей передачи обычной телекоммуникационной информации

Принципы передачи эталонных частот по каналу аналогичны тем, которые используются при трансляции информации в телекоммуникационных сетях. Отметим, что основное направление телекоммуникационных исследований по быстрой передаче больших объемов информации глубоко проработано. Но цели, которых пытаются достичь при передаче сигналов эталонных частот, и цели телекоммуникационной задачи различны.

В телекоммуникационной задаче требуется максимально быстро передать большой объем информации в виде последовательности импульсов. На удаленном конце канала должна быть получена последовательность, соответствующая введённой в канал. Отметим, что в телекоммуникации у получателя информации нет прямой необходимости в знании точного временного положения импульсов на временном базисе опорного генератора, установленного у входа в канал.

При передаче информации по длинному телекоммуникационному каналу увеличивается джиттер (дрожание фронта импульсов), что повышает неопределенность положения импульсов передаваемой последовательности и может привести к потере информации. Для устранения таких потерь на промежуточном узле телекоммуникационного канала информация может быть подана в ячейки памяти (линию задержки), а затем считывается и ретранслируется в новом временном базисе этого узла. Такая методика обновления временного базиса и избавления от джиттера, приобретенного в канале, позволяет без потерь передать информацию на глобальные расстояния и повсеместно используется в телекоммуникации.

Следовательно, при решении телекоммуникационной задачи целью является передача большого объема информации и допускается переход к новому временному базису промежуточного ретранслятора. Положение транслируемых импульсов на временной шкале передающей стороны не существенно для получателя информации. Для получателя телекоммуникационной информации важна определенность знания о наличии или отсутствии импульса в цепи информационной последовательности, но несущественно точное положение импульса на шкале времени транслятора информации и точное знание о его временной задержке в ВОЛС. Ему важно быстро без искажений получить большое информационное содержание, но не точное время и эталонный временной базис. Следует отметить, что для работы телекоммуникационных сетей необходима тактовая сетевая синхронизация (ТСС), но работа систем ТСС нацелена не на передачу времени или частоты, а на обеспечение передачи без потерь и сбоев больших объемов информации.

Несколько другие цели стоят при передаче по каналу сигнала эталонной частоты. На выходе из канала необходимо воспроизвести бесконечно повторяющийся периодический сигнал, соответствующий эталонному. В телекоммуникационном смысле этот периодический сигнал несет минимальное информационное наполнение равное одному биту, который подтверждает наличие или отсутствие эталонного сигнала на выходе канала. Основная цель при передаче эталонного сигнала - точно без возмущений с постоянной задержкой на временной шкале воспроизвести в конце канала регулярный периодический сигнал, который максимально точно соответствует временному базису, генерируемому эталоном, который установлен в начале канала.

При передаче эталонной частоты для принимающей стороны важна точная частота и необходимо постоянство временной задержки эталонного сигнала, но нет потребности в каком-либо ином информационном наполнении канала. При передаче эталонного времени возникает необходимость обмениваться информацией о ходе часов на двух концах линии связи и о изменяющейся величине задержки сигнала, несущего момент времени в волоконном канале. Поэтому при передаче сигналов эталонного времени требуется дополнительное информационное наполнение канала, так как для принимающей стороны важно не только знание о частоте сигнала, но и о времени передающей стороны и о задержке сигнала в канале. Отметим, что для определения частоты необходимо знать только скорость изменения фазы сигнала, а определение момента времени требует помимо этого знания полной фазы сигнала. Из этого следует различие структурных схем систем передачи эталонного времени по каналу связи от схем передачи частоты.

Отметим, что при передаче эталонной частоты большой объем паразитной информации генерирует собственно сам канал, шумы которого варьируют период и время распространения сигнала, что возмущает фазу эталон-

ного сигнала, получаемого на выходе из канала. В итоге канал вносит неопределенность в положение импульсов временного базиса на выходе из канала. Для уменьшения этой неопределенности необходимо выделить информацию о вызванных каналом возмущениях (шумовых вариациях фазы эталонного сигнала на выходе из канала) и использовать ее для компенсации влияния канала на точность воспроизведения временной последовательности. При передаче эталонных частот необходимо транслировать небольшой объем информации, но при этом выделять и подавлять паразитную информацию, представляющую собой шумовое воздействие канала на передаваемый эталонный сигнал.

Следовательно, при передаче эталонных частот по каналу ВОЛС ставятся цели, отличающиеся от целей обычной телекоммуникационной задачи. При передаче эталонных частот в первую очередь необходимо выделить паразитную информацию о шумах канала, а не передавать большой объем вводимой извне в канал содержательной телекоммуникационной информации. При передаче эталонных частот решается задача устранения влияния генерируемого каналом шума, возмущающего фазу эталонного сигнала. И основной смысл передачи эталонных частот заключается не в переносе по каналу большого объема информации, а в воспроизведении временного базиса эталона на удаленном конце канала. Указанное различие целей, в свою очередь, определяет выбор технических решений, которые применяются при разработке систем передачи ЭСЧВ по каналам ВОЛС.

2.1.3. Физические закономерности, определяющие деградацию эталонного сигнала по мере его распространения в ВОЛС

Главная цель при доставке эталонного радиочастотного сигнала, который передается путем амплитудной модуляции оптической несущей, – получить на удаленном конце волоконно-оптической линии выходной эталонный сигнал с незначительным повышением относительного уровня его фазовых шумов. При достижении этой цели сигнал на удаленном конце будет соответствовать эталонному и максимально точно воспроизводить частоту, а следовательно, и ход эталонных часов.

Фаза сигнала на выходе из линии будет воспроизводить фазу эталонного сигнала с некоторой задержкой, обусловленной временем распространения оптического излучения по длине линии. Необходимо, чтобы эта временная задержка была постоянной. Медленные изменения задержки приводят к вариациям фазы эталонного сигнала на конце линии, и эти вариации можно рассматривать как низкочастотный фазовый шум, вносимый линией. Отметим, что фаза передаваемого сигнала на выходе из линии будет подвержена не только низкочастотным вариациям – вандеру, но и быстрым возмущениям – дополнительному джиттеру, порождаемому линией и устройствами

Альманах современной метрологии, 2016, №8

двойного электрооптического преобразования эталонного сигнала на концах линии, а также другими блоками в цепи системы передачи. Эти медленные и быстрые возмущения фазы переданного сигнала можно рассматривать как фазовый шум, порождаемый волоконно–оптическим каналом.

К основным физическим закономерностям и факторам, влияющим на распространение модулированного по амплитуде оптического излучения по каналу ВОЛС и приводящим к его деградации – ослаблению, изменению формы и вариациям фазы переданного на удаленный конец линии эталонного сигнала - можно отнести:

- 1) изменение оптической длины канала ВОЛС из–за изменения температуры;
- 2) затухание оптической несущей по мере ее распространения;
- 3) хроматическую дисперсию;
- 4) стимулированное рассеяние Манделъштама–Бриллюэна в волокне;
- 5) релеевское рассеяние в волокне;
- 6) поляризационно-модовую дисперсию (PMD);
- 7) паразитную модуляцию оптической несущей при воздействии акустических колебаний и механических вибраций.

Из этого ряда физических факторов, которые оказывают влияние на погрешность передачи эталонного сигнала на удаленный конец ВОЛС, для линий длиной меньше, чем 10 км, наиболее существенным является первый – изменение оптической длины линии из-за непостоянства температуры окружающей среды. Все другие факторы вступают в игру и начинают оказывать все возрастающее влияние на передаваемый сигнал в более протяженных волоконных линиях – длиной в десятки и сотни километров.

2.1.4. Передача ЭСЧВ по ВОЛС без компенсации возмущений, вносимых линией

Для передачи сигнала эталонной радиочастоты и импульсного сигнала эталонного времени используется оптическая лазерная несущая, которая промодулирована такими сигналами у входа в волоконно–оптическую линию и распространяется на ее удаленный конец. На рисунке 3 приведена упрощенная схема однонаправленной передачи с помощью оптической несущей сигналов эталонной частоты или времени по оптоволоконной линии.

В схемах передачи без компенсации, подобной представленной на рисунке 3, эталонный радиочастотный сигнал 5 МГц (10, 100 или 1000 МГц) или импульсный сигнал эталонного времени с периодом следования 1 с (1 мс, 1 мкс), пройдя буферный усилитель, модулирует по амплитуде лазерное излучение оптического трансмиттера перед подачей его в линию. Переданный на удаленный конец линии сигнал демодулируется фотоприемником ФП оптического ресивера, усиливается буферным усилителем, установленным на

Альманах современной метрологии, 2016, №8

конце линии, и поступает потребителю. Использование волоконно-оптических линий для передачи эталонных радиочастотных сигналов, как было отмечено во введении, дает ряд преимуществ по сравнению с коаксиальными кабелями.

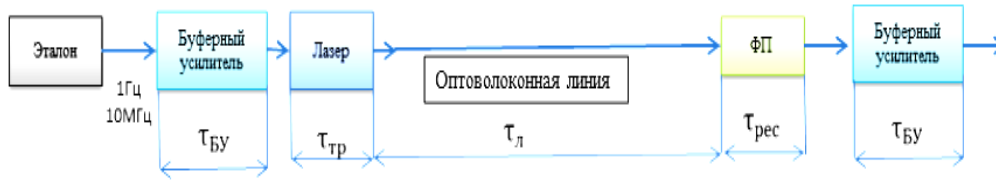


Рис. 3. Упрощенная схема однонаправленной передачи сигналов эталонной частоты или времени по оптоволоконной линии без компенсации возмущений, вносимых линиями. ФП – фотоприемник

При использовании схемы, представленной на рисунке 3, для передачи сигналов эталонного времени необходимо измерить все задержки передаваемого сигнала – в буферных усилителях $\tau_{бу}$, в электрооптических преобразователях $\tau_{тр}$, $\tau_{рес}$ и задержку сигнала $\tau_{л}$ в самой оптической линии, а также в используемых на концах линии коаксиальных кабелях. Неопределенность измерения таких задержек, а также вариации задержки в волоконно-оптической линии из-за суточного и сезонного изменения температуры, ограничивают точность передачи сигнала эталонного времени. Суточное и сезонное изменение температуры размещенного на глубине 1 метр подземного оптического кабеля составляет соответственно $\sim 0,5^\circ\text{C}$ и $\sim 20^\circ\text{C}$.

На интервале от одних суток до 20 суток вариация задержки эталонного сигнала из-за изменения температуры при длине подземного передающего оптического кабеля ~ 1 км будет в пределах от 40 до 100 пс. Но на более длительном интервале наблюдения – от месяца до года скажется сезонное изменение температуры подземного оптического кабеля, и размах вариации задержки эталонного сигнала в линии длиной ~ 1 км за полгода может достигнуть ~ 1 нс. Погрешность передачи радиочастотного эталонного сигнала в коротких подземных оптических кабелях длиной ~ 1 км будет на уровне $\sim 10^{-15}$ на суточном интервале усреднения, и в наибольшей степени она зависит от скорости изменения температуры среды, в которой находится оптический кабель. В случае использования оптических кабелей, размещенных не под землей, а на открытом воздухе, погрешность передачи ЭСЧВ увеличится в несколько раз из-за большего влияния температурного фактора, определяемого амплитудой изменения температуры окружающей среды.

2.1.5. Экспериментальные результаты по передаче эталонных частот по ВОЛС без использования устройств компенсации

При проведении поисковых исследований по проблеме экспериментально оценивалось влияние ВОЛС на передаваемый сигнал эталонной частоты 100 МГц. Был собран макет экспериментальной установки по схеме, соответствующей представленной на рисунке 4.

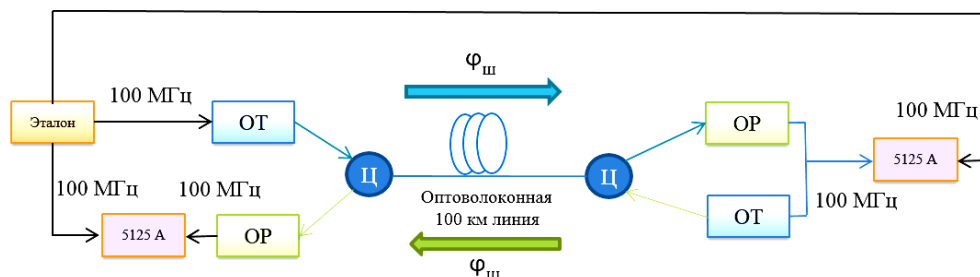


Рис. 4. Схема экспериментальной установки при двусторонней передаче ЭСЧ 100 МГц по оптоволоконной линии без компенсации возмущений, вносимых линией. ОТ и ОР – оптические трансмиттеры и ресиверы, Ц – оптические циркуляторы

Для измерений нестабильности частоты (СКДО) эталонного сигнала частотой 100 МГц, переданного по ВОЛС на 100 км в одну сторону («туда») и на 200 км «туда и обратно», на вход прибора Symmetricon 5125A, включенного в режиме измерения СКДО, подавались соответствующие обозначенные на рисунке 4 сигналы. Оптоволоконная линия – это катушка оптического волокна длиной 100 км.

На рисунках 5 и 6 представлены измеренные кривые СКДО сигналов, пробежавших по волоконной линии длиной 100 км «туда» [5], а также на 200 км «туда и обратно» относительно эталонного сигнала $f_{\text{ЭТ}} = 100$ МГц, подаваемого на вход системы.

Результаты измерений показали, что без использования устройств компенсации шумов линии нестабильность частоты (СКДО) сигнала на выходе линии после его пробега по линии в одну сторону на ~ 100 км составила $\sim 1,5 \cdot 10^{-13}$, а после пробега «туда и обратно» на ~ 200 км составила $3 \cdot 10^{-13}$ на интервале усреднения 1 с. Измерения дали ожидаемый результат - нестабильность частоты сигнала, пробежавшего 200 км («туда и обратно» по линии) примерно в два раза хуже, чем у сигнала, пробежавшего 100 км в одну сторону. На интервалах усреднения больших 100 секунд СКДО переданного сигнала увеличивается, что вызвано возмущениями, которые вносит волоконно-оптическая линия.

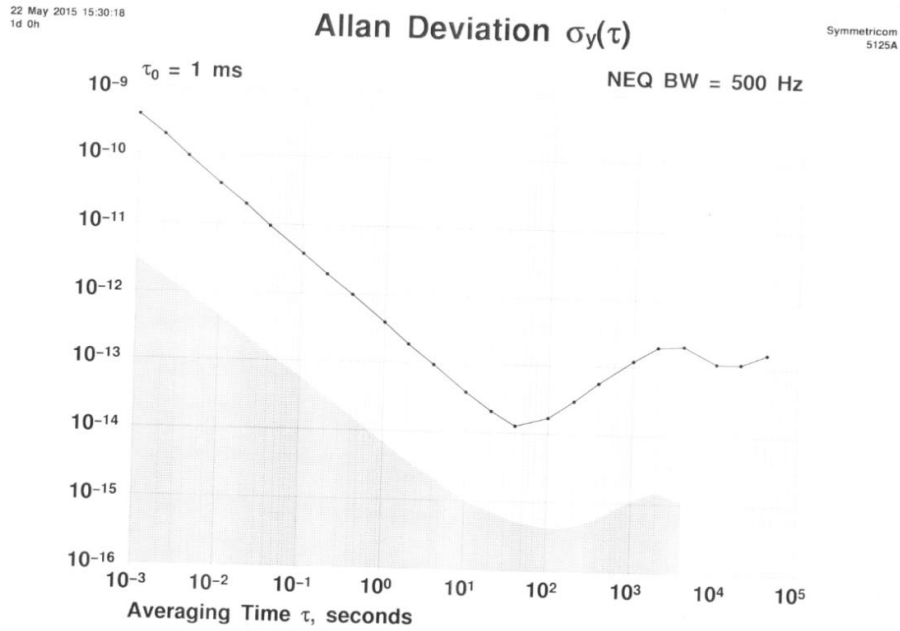


Рис. 5. Нестабильность частоты (СКДО) сигнала 100 МГц, переданного на удаленный конец 100 км волоконной линии («туда») [5]

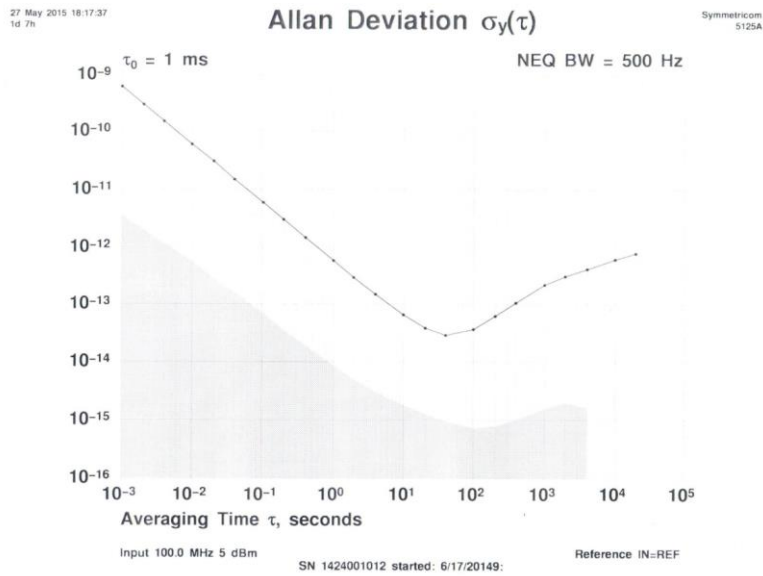


Рис. 6. Нестабильность частоты (СКДО) сигнала 100 МГц после его 200 км пробега «туда и обратно» по 100 км волоконной линии

И нестабильность частоты (СКДО) сигнала на выходе линии после его пробега по линии в одну сторону на ~ 100 км составила $\sim 4 \cdot 10^{-13}$, а после пробега «туда и обратно» на ~ 200 км составила $1 \cdot 10^{-12}$ на интервале усреднения $2 \cdot 10^4$ с.

На рисунке 7 представлены измеренные значения средней частоты сигнала на выходе 3-х км катушки оптического волокна в течение двух с половиной суток при передаче 100 МГц.

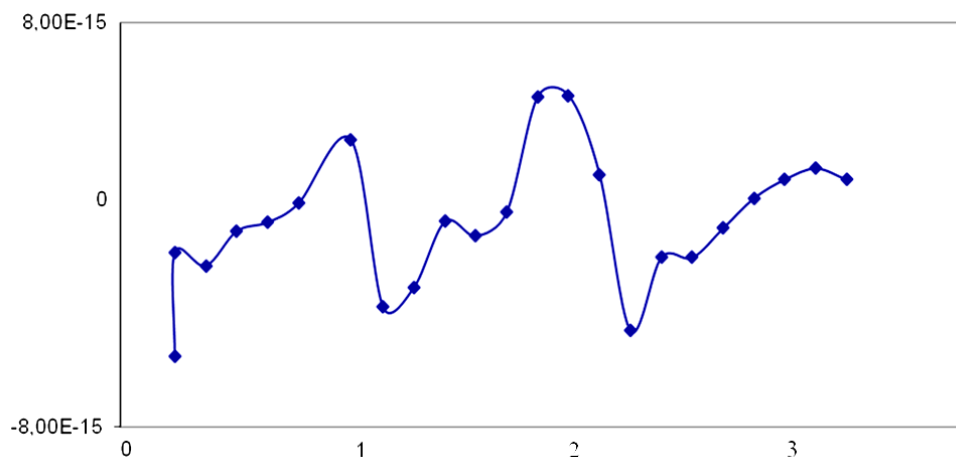


Рис. 7. Изменения частоты на выходе 3-х км ВОЛС на протяжении трех суток, связанные с суточным ходом температуры в лаборатории

Из-за суточных изменений температуры на рисунке 7 наблюдаются периодические с периодом порядка суток отклонения с размахом $\pm 4 \cdot 10^{-15}$ среднего значения частоты на выходе линии.

Вариации фазы передаваемого эталонного сигнала увеличиваются как из-за увеличения амплитуды температурных изменений, так и по мере удлинения линии. Влиянием температурных вариаций окружающей среды можно пренебречь при передаче сигнала по короткому оптическому кабелю, но в оптическом кабеле длиной ~ 3 км суточные изменения температуры приводят к ощутимому на уровне нескольких единиц пятнадцатого знака возрастанию нестабильности частоты на выходе канала.

Экспериментальное исследование влияния волоконно-оптического канала на передаваемый эталонный сигнал – это первый необходимый этап работ, направленных на создание систем передачи эталонных частот по каналам ВОЛС. Такой этап исследований и измерений проходили все лаборатории, которые занимались проблемой передачи эталонных частот по оптоволокну.

Можно сопоставить представленные на рисунке 5 результаты с измерениями других лабораторий [6], которые показаны на рисунке 8.

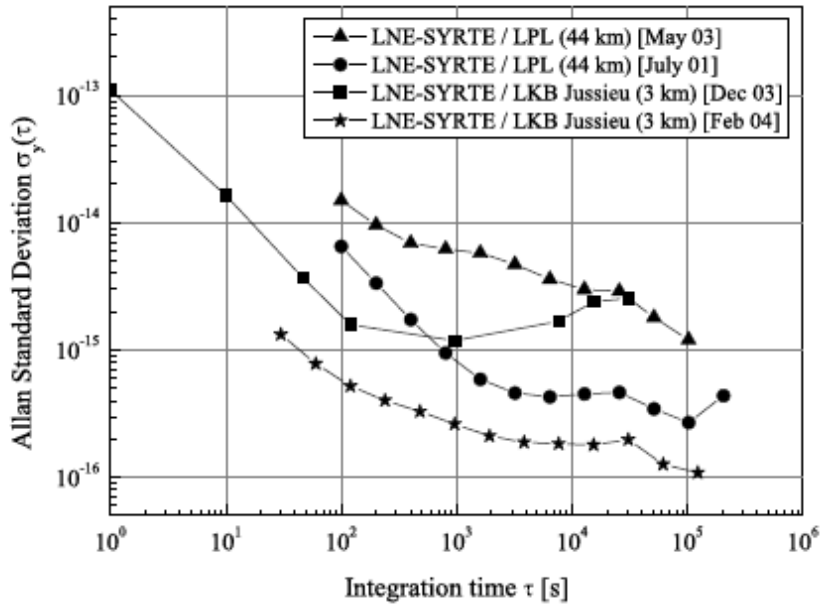


Рис 8. Результаты измерений нестабильности частоты эталонного сигнала на выходе подземного оптического кабеля длиной 3 км и 44 км, выполненные в совместных экспериментах Парижской обсерватории и Лаборатории лазерной физики [6]

Результаты измерений, представленные на рисунке 8, характеризуют величину вносимых волоконно-оптическим каналом дополнительных случайных девиаций частоты передаваемого эталонного сигнала 100 МГц при передаче без использования устройств компенсации вносимых линией возмущений. Ход кривых нестабильности эталонного сигнала имеет характерный небольшой локальный подъем на интервалах усреднения порядка полусуток. Ниже в разделе 2.4.2 будет дано теоретическое объяснение такого подъема нестабильности частоты сигнала на выходе волоконной линии на интервале усреднения в половину суток.

2.1.6. О необходимости использования систем компенсации возмущений, вносимых ВОЛС при передаче по линии эталонных сигналов

На рисунке 9 приведена относительная нестабильность частоты водородного стандарта (H-maser) и эталона на основе цезиевого фонтана (FO2) [1,6] и двух других стандартов.

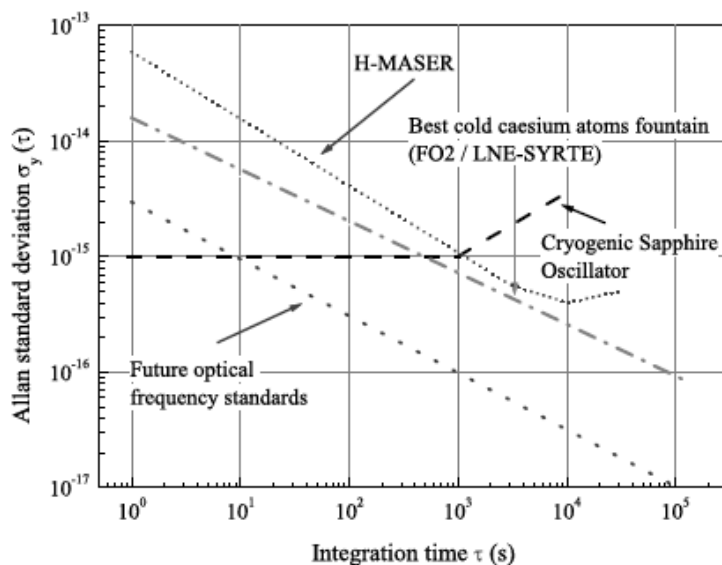


Рис. 9. Нестабильность частоты (девиация Аллана) некоторых стандартов частоты [1,6]

Если сравнить рисунок 9 с результатами измерений, представленными на рисунках 5 и 8, которые характеризуют уровень дополнительных возмущений, добавляемых волоконной линией к нестабильности частоты передаваемого по линии эталонного сигнала, то очевидно, что на временах усреднения больших 1 секунды метрологические характеристики по нестабильности частоты эталонных сигналов лучших стандартов частоты после передачи их даже по ВОЛС длиной 3 км будут ухудшены. И на выходе линии точностные характеристики получаемых сигналов будут определяться не стандартами, а возмущениями (шумами), вносимыми системой передачи по ВОЛС. Следовательно, без принятия специальных мер по компенсации вносимых каналом возмущений фазы передаваемого эталонного сигнала, то есть без фильтрации шумов линии, нельзя передать по ВОЛС длиной более нескольких сотен метров эталонные сигналы лучших стандартов частоты без существенной потери на конце линии их высокой точности и стабильности.

2.1.7. Принцип активной компенсации вносимых каналом ВОЛС возмущений фазы передаваемого эталонного сигнала

На конце оптоволоконной линии детектируемый сигнал не может быть прямо сличен с эталонным сигналом, который присутствует только на входе в линию. Коррекция фазовых возмущений сигнала, накапливаемых при его распространении по ВОЛС, должна осуществляться при вводе сигнала в линию. Принцип активной компенсации фазовых возмущений, вносимых ка-

налом ВОЛС, понятен из упрощенной схемы, представленной на рис. 10. В основе принципа компенсации лежит:

- а) двунаправленное (туда и обратно) распространение эталонного сигнала в одном и том же оптическом канале связи;
- б) предположение, что при прямом и обратном пробеге сигнал подвергается одинаковым возмущениям.

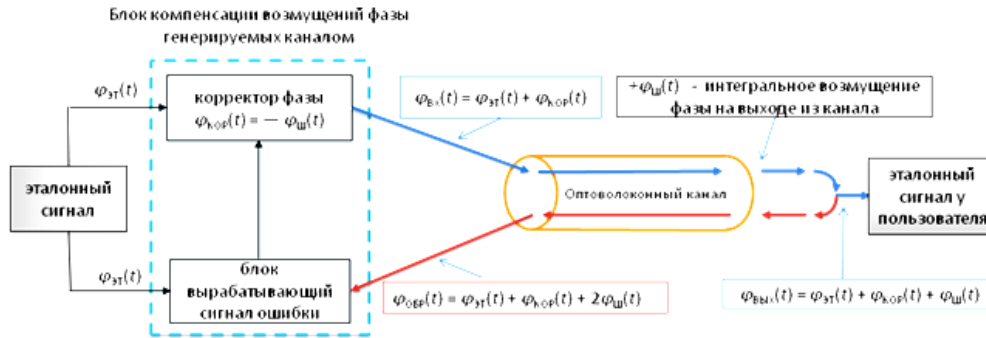


Рис. 10. Схема, поясняющая принцип компенсации вносимых волоконно-оптической линией возмущений фазы передаваемого радиочастотного эталонного сигнала

Коррекция фазы передаваемого эталонного сигнала на величину $\varphi_{кор}$ для компенсации вносимого линией интегрального возмущения фазы эталонного сигнала может быть выполнена двояко: либо путем сдвига фазы модулирующего радиочастотного сигнала эталонной частоты фазовращателем, либо путем изменения времени распространения оптического сигнала в канале с помощью управляемой оптической линии задержки. На рисунке 10 приведена схема коррекции, когда сдвигается фаза радиочастотного эталонного сигнала. На выходе канала сигнал $A_{вых}(t)$, подвергшийся деградации, в том числе и из-за воздействия на канал вариаций состояния окружающей среды, детектируется, и он будет равен:

$$A_{вых}(t) = A_0 \sin(\omega_{эт}t + \varphi_{эт} + \varphi_{кор} + \varphi_{ш}), \quad (1)$$

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

Радиочастотный сигнал, полученный в конце канала, после детектирования, промодулированного по амплитуде оптического излучения, разделяется

на два. Одна часть доставляется пользователю, а вторая – применяется для того, чтобы сформировать обратный оптический сигнал и передать его к началу канала. Обратный оптический сигнал детектируется у входа в канал, и это дает радиочастотный сигнал, несущий информацию о вносимых каналом фазовых возмущениях. При сравнении фаз двух сигналов – эталонного и обратного у входа в канал получается сигнал ошибки $\varphi_{\text{КОР}}(t)$, который управляет устройством фазовой коррекции подаваемого в канал эталонного сигнала. Если будет выполняться условие:

$$\varphi_{\text{КОР}}(t) = -\varphi_{\text{Ш}}(t), \quad (2)$$

то шумовые возмущения фазы будут устранены в каждый момент времени t , и фаза радиочастотного сигнала (1), полученного после детектирования оптического амплитудно-модулированного излучения на удаленном конце канала, будет соответствовать эталонному сигналу.

С помощью устройств компенсации, работающих по представленной схеме, факторы, приводящие к деградации передаваемого по каналу ВОЛС эталонного сигнала и к возмущению его фазы, могут быть скомпенсированы (отфильтрованы). В результате акустические, механические и температурные воздействия окружающей среды на распределенную в пространстве оптоволоконную систему будут существенно ослаблены. Это подтверждают выполненные в различных лабораториях мира эксперименты. Их результаты позволяют сделать вывод о том, что устройства компенсации фазовых шумов, вносимых оптическим каналом, могут обеспечить передачу эталонных частот наилучших микроволновых стандартов на расстояние в десятки и сотни километров без ухудшения нестабильности частоты эталонного сигнала на выходе линии при интервалах усреднения от 1 до 10^5 секунд.

2.2. Схемы передачи ЭСЧВ по ВОЛС с компенсацией и их конкретная реализация в экспериментах различных лабораторий

2.2.1. Методы компенсации вносимых каналом ВОЛС возмущений фазы передаваемого эталонного сигнала

Ниже на рисунке 11 представлены методы компенсации возмущений, вносимых линией при передаче ЭСЧВ по ВОЛС.

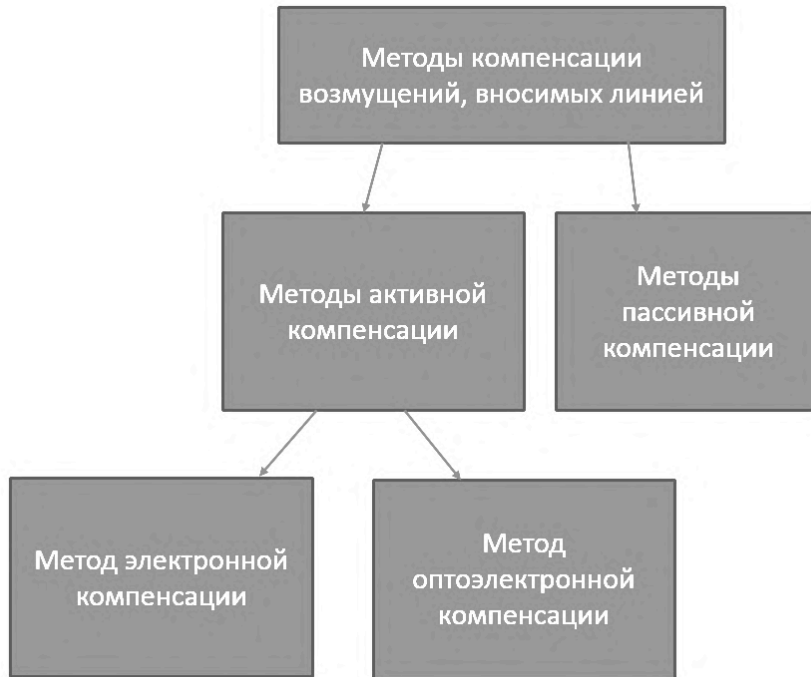


Рис. 11. Методы компенсации возмущений, вносимых линией при передаче ЭСЧВ по ВОЛС

2.2.2. Метод активной электронной компенсации. Ассиметричная и симметричная схемы, реализующие метод электронной компенсации при передаче ЭСЧ по ВОЛС

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 трансмиттером у входа в линию.

Реализация схемы компенсации с радиочастотным фазовращателем представлена ниже в упрощенном виде на рисунке 12.

Следует отметить, что после пробега эталонного сигнала по линии «туда и обратно» уровень возмущений его фазы равен $+2\varphi_{\text{ш}}$. Но коррекцию фазы эталонного сигнала перед подачей в линию необходимо производить фазовращателем на половинную величину $\varphi_{\text{кор}}$ равную $-\varphi_{\text{ш}}$.

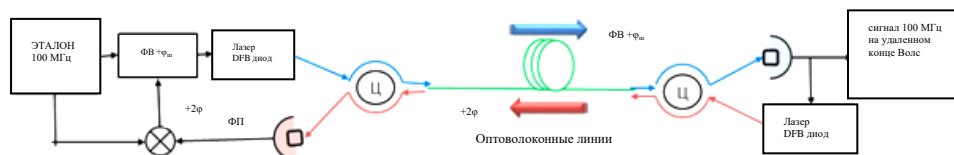


Рис. 12. Упрощенная схема передачи эталонной частоты с электронной асимметричной компенсацией возмущений, вносимых волоконной линией. Ц - оптический циркулятор, ФП - фотоприемник, ФВ - фазовращатель

Фазовращатель может быть реализован на основе радиочастотной линии задержки или на основе специальной схемы ФАПЧ управляемого кварцевого генератора, устанавливаемого у входа в линию (см. следующие два раздела).

Схема, представленная на рисунке 12, в различных ее модификациях реализовывалась и исследовалась в ряде лабораторий [1-4]. Мы также проводили исследования такой схемы с электронной компенсацией, чтобы определить ее возможности по точности передачи ЭСЧ и ее оптимальные схемотехнические решения. В этой схеме система компенсации корректирует только фазу сигнала, отправляемого в линию, а фаза обратного сигнала, пробежавшего по линии «туда и обратно», не корректируется. Поэтому ее можно назвать асимметричной схемой электронной компенсации возмущений фазы эталонного сигнала, вносимых линией. Ниже на рисунке 13 будет рассмотрена симметричная схема, реализующая электронную компенсацию.

Фазовращатель может быть реализован на основе управляемой линии задержки, так как на выходе линии задержки фаза сигнала изменяется пропорционально времени задержки. 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 компенсации 100 км линии необходимо, чтобы шаг перестройки был ниже 10 пс, а диапазон перестройки был ~ 100 нс.

Если имеются две комплементарные линии задержки, обладающие достаточным диапазоном перестройки и вносящие малый дополнительный джиттер передаваемого сигнала, то электронную схему компенсации следует создавать по схеме электронной симметричной компенсации, представленной на рисунке 13.

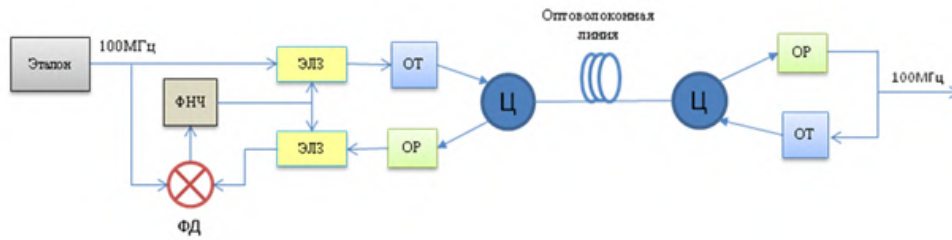


Рис. 13. Упрощенная схема передачи эталонного сигнала 100 МГц с электронной симметричной компенсацией возмущений, вносимых волоконной линией. ЭЛЗ – две комплементарные управляемые электронные линии задержки, ФД – фазовый детектор, ФНЧ – фильтр нижних частот, ОТ и ОР – оптический трансмиттер и ресивер

В этой схеме корректируется как фаза сигнала, отправляемого в линию, так и фаза обратного сигнала, пробежавшего по линии «туда и обратно». Такая схема будет эффективно работать, если корректирующие фазу две ЭЛЗ будут иметь идентичные характеристики в диапазоне перестройки задержек, то есть при подаче на них одинакового управляющего сигнала с выхода ФНЧ они должны обеспечивать равные величины задержки сигнала.

Сложность реализации схемы на рисунке 13 заключается в том, что управляемые комплементарные электронные линии задержки с идентичными характеристиками с большим диапазоном перестройки до 100 нс сейчас не производятся. Можно пытаться использовать пары управляемых механических линий задержки тромбонного типа. Но они медленно перестраиваются, имеют небольшой диапазон перестройки задержки и достаточно быстро изнашиваются в месте механического контакта ламелей в «коаксиальном тромбоне». Для получения больших задержек такая линия дополняется подключаемыми последовательно отрезками коаксиального кабеля. Следует отметить, что во время подключения дополнительных отрезков происходит полное размыкание линии передачи сигнала, что неприемлемо для случая передачи ЭСЧ. На рисунке 14 представлен внешний вид перестраиваемой линии задержки тромбонного типа фирмы Colby Instruments.

Успехов в реализации схемы электронной компенсации, представленной на рисунке 13, добились исследователи из Польши [5,6]. Для достижения своих целей они инициировали создание малой серии специальных микросхем с двумя комплементарными линиями задержки на 100 нс каждая, которые управлялись аналоговым сигналом. Следует отметить, что схема компенсации, представленная на рисунке 13, имеет недостаток. Управляемые электронные линии задержки порождают дополнительный джиттер передаваемого сигнала. И для получения удовлетворительной кратковременной стабильности сигнала необходимо разрабатывать и включать в систему пе-

редачи специальные электронные устройства, снижающие джиттер переданного на удаленный конец линии эталонного сигнала.

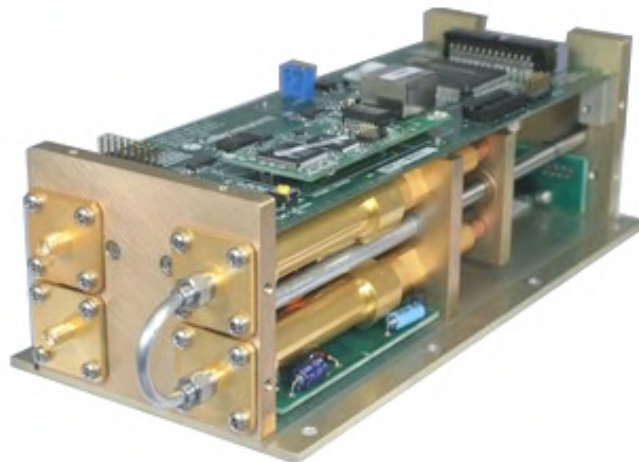


Рис. 14. Внешний вид перестраиваемой линии задержки PDL-100A тромбонного типа

2.2.2.1. Ассиметричная схема электронной компенсации при передаче ЭСЧ по ВОЛС, использующая управляемый кварцевый генератор в качестве фазовращателя

Примером электронной компенсационной схемы, использующей и развивающей идею, представленную на рисунке 12, может служить схема на рисунке 15, предложенная сотрудниками JPL (NASA) [13]. В качестве фазовращателя в ней применяется система ФАПЧ вспомогательного кварцевого генератора VCXO, установленного на передающей стороне.

В этой схеме 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 $\omega_{\text{ВХ}} = \omega_{\text{КГ}}$, $\varphi_{\text{КГ}} = \varphi_{\text{КГ}}$. 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 $\omega_{\text{ВХ}}$, а второй с сигналом $\omega_{\text{ОБР}}$, пробежавшим по линии туда и обратно. На выходе смесителей получают два сигнала с частотами $(1/10)\omega_{\text{ЭТ}}$. Их сравнение на фазовом детекторе дает сигнал ошибки, который фильтруется в ФНЧ и управляет частотой кварцевого генератора. При замк-

нутой 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 $\varphi_{ВЫХ} = \varphi_{ЭТ}$.

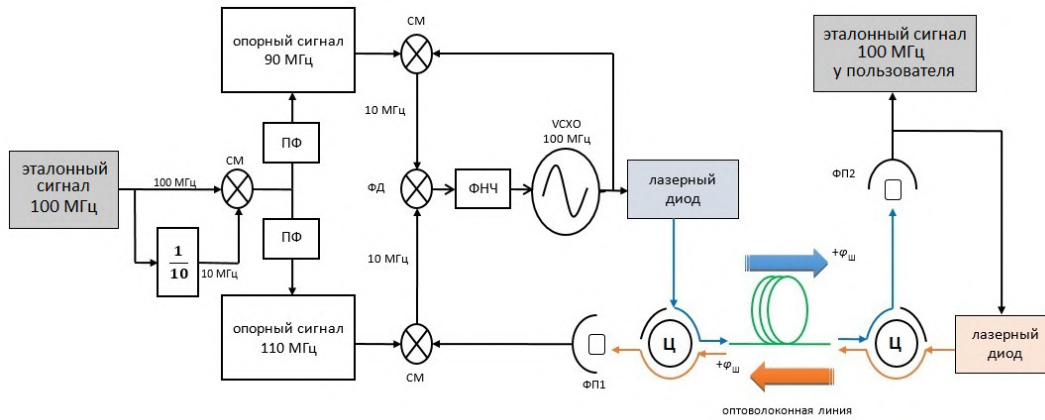


Рис. 15. Упрощённая схема передачи сигнала эталонной частоты по ВОЛС с электронной компенсацией возмущений фазы эталонного сигнала, вносимых линией - схема JPL (NASA)

Поясним подробнее, как достигаются эти соотношения фаз в данной схеме, представленной на рисунке 15.

Продетектированный фотоприемником ФП2 на удаленном конце оптического кабеля сигнал после одного пробега пропорционален:

$$V_{ВЫХ}(t) \propto \sin(\omega_{КГ}t + \varphi_{КГ} + \varphi_{Ш}). \quad (3)$$

Обратно вернувшийся оптический сигнал, испытавший такое же фазовое возмущение на обратном пути, после детектирования фотоприемником ФП1 у начала канала будет иметь вид:

$$V_{ОБР}(t) \propto \sin(\omega_{КГ}t + \varphi_{КГ} + 2\varphi_{Ш}). \quad (4)$$

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

$$V_1(t) \propto \sin \left[(\omega_{КГ} - 2\pi \cdot 90\text{МГц})t + \varphi_{КГ} - \frac{9}{10} \varphi_{ЭТ} \right] \oplus. \quad (5)$$

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

$$V_2(t) \propto \sin \left[(2\pi \cdot 110\text{МГц} - \omega_{КГ})t - \varphi_{КГ} - 2\varphi_{Ш} + \frac{11}{10} \varphi_{ЭТ} \right]. \quad (6)$$

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

$$V_{\text{ош}}(t) \propto 2\varphi_{\text{КГ}} + 2\varphi_{\text{ш}} - \frac{20}{10}\varphi_{\text{ЭТ}}. \quad (7)$$

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

$$\varphi_{\text{КГ}} = \varphi_{\text{ЭТ}} - \varphi_{\text{ш}}. \quad (8)$$

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

$$\varphi_{\text{вых}} = \varphi_{\text{ЭТ}}, \quad (9)$$

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

2.2.2.2. Исследования работы асимметричной схемы электронной компенсации с управляемым кварцевым генератором в качестве фазовращателя

Был собран макет по схеме, представленной на рисунке 15а, который обеспечивал асимметричную электронную компенсацию при передаче 100 МГц сигнала по 100 км ВОЛС [5]. В отличие от схемы на рисунке 15 в макете был введен следящий фильтр с полосой порядка ~300 Гц для подавления «быстрых» фазовых шумов сигнала 100 МГц, пробежавшего по линии «туда и обратно». Этот фильтр был реализован на основе ФАПЧ дополнительного кварцевого генератора КГ2 на 100 МГц по сигналу, пробежавшему по линии «туда и обратно» (см. рисунок 15). Следящий фильтр на основе ФАПЧ кварцевого генератора КГ2 служит для фильтрации «быстрых» шумов сигнала, пробежавшего по линии «туда и обратно».

Кварцевый генератор КГ2 был такого же типа, как и КГ1. Кроме прочего, следящий фильтр на основе ФАПЧ КГ2 снижает влияние паразитной модуляции амплитуды сигнала, пробежавшего по линии «туда и обратно».

На рисунке 16 представлены результаты измерений с помощью Symmetricom 5125А дисперсии Аллана (СКДО) сигнала 100 МГц на выходе 100 км ВОЛС относительно эталонного сигнала 100 МГц.

На рисунке 16 видно, что на интервалах усреднения от 10 минут до нескольких часов кривая погрешности передачи ЭСЧ 100 МГц лишь незначительно отклоняется от линейного хода в логарифмическом масштабе. Дополнительная фильтрация сигнала, подаваемого на смеситель СМ2 (см. рисунок 15), дает дополнительный положительный эффект в виде снижения нестабильности сигнала на удаленном конце линии при интервалах усреднения от 10 минут до нескольких часов. На этих интервалах температура ок-

ружающей среды наиболее быстро изменяется за счет циклической работы системы кондиционирования в помещении, где находился макет.

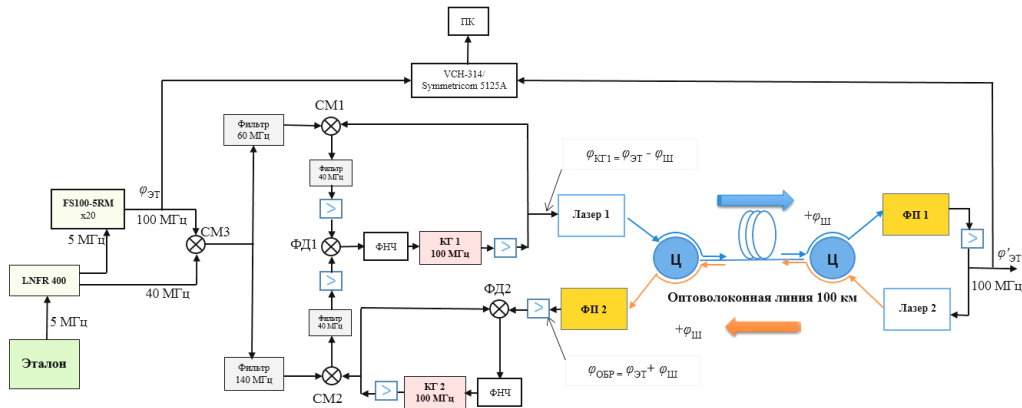


Рис. 15а. Схема макета передачи 100 МГц сигнала по 100 км ВОЛС с управляемым кварцевым генератором КГ1 в качестве фазовращателя [5]

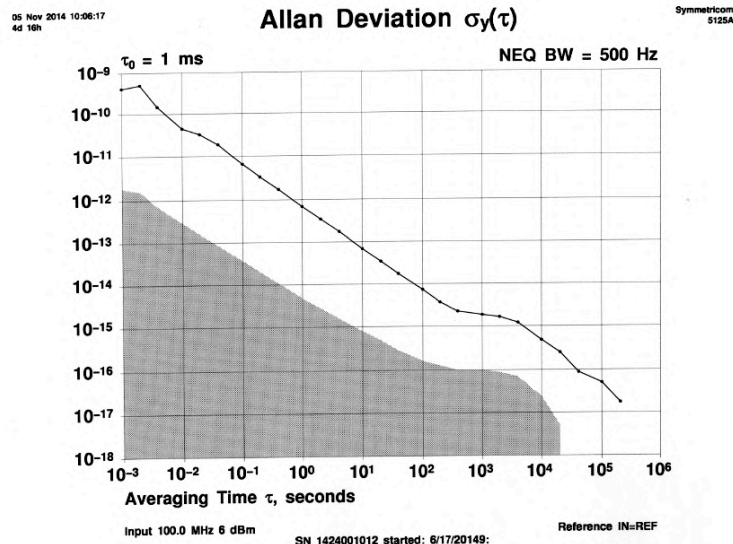


Рис. 16. Нестабильность частоты (СКДО) сигнала 100 МГц, переданного на конец 100 км линии с помощью доработанного макета устройства №1

Следует отметить, что после введения в схему генератора КГ2 (см. рисунок 15а) 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 40 МГц сигналов, разность фаз которых на ФД1 дает сиг-

нал ошибки для системы компенсации. Ниже на рисунках 17 - 20 представлены результаты некоторых других измерений, выполненных с помощью Symmetricom 5125A.

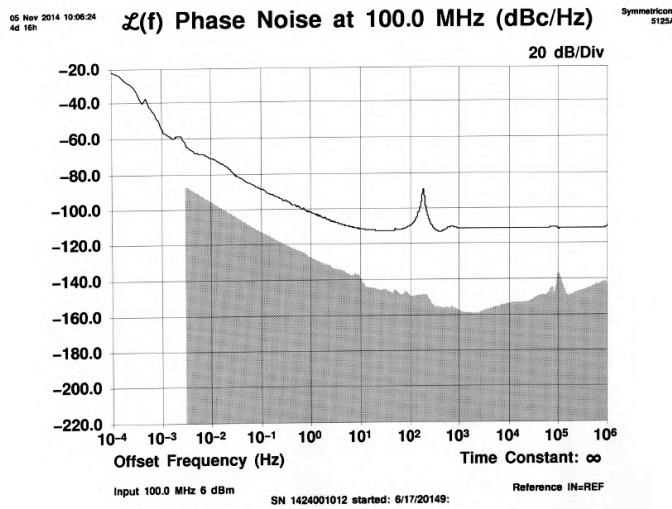


Рис. 17. Спектральная плотность фазовых шумов сигнала 100 МГц, переданного доработанным макетом на конец 100 км линии

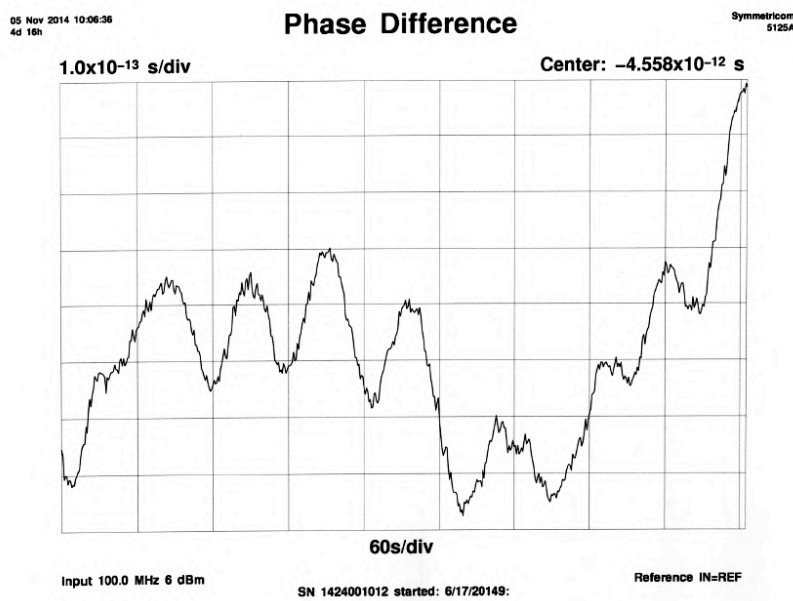


Рис. 18. Характерный ход фазы сигнала, переданного доработанным макетом на удаленный конец 100 км линии, относительно фазы эталонного сигнала за 540 с. Цена деления по вертикали 0,1 пс

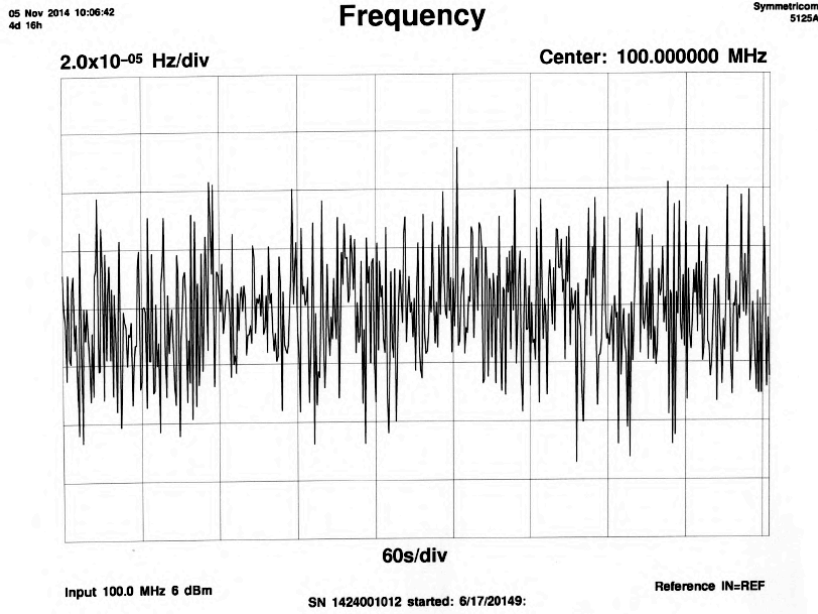


Рис. 19. Характерный ход результатов измерений частоты на секундном интервале для сигнала, переданного доработанным макетом на удаленный конец 100 км линии за 540 с. Цена деления по вертикали $2 \cdot 10^{-13}$

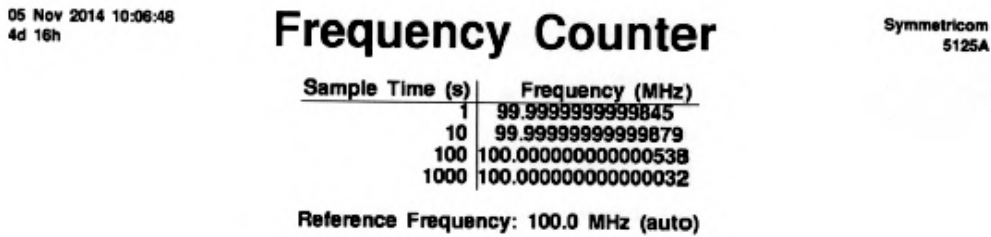


Рис. 20. Значение частоты сигнала, переданного доработанным макетом на удаленный конец 100 км линии, на различных интервалах усреднения. На интервале усреднения 1000 с отклонение $\sim 3 \cdot 10^{-16}$

Результаты представленных на рисунке 16 измерений подтверждают, что погрешность (СКДО) передачи частоты эталонного сигнала 100 МГц на конец 100 км линии макетом, реализующем активную электронную асимметричную компенсацию возмущений, вносимых волоконной линией, составляет:

$4 \cdot 10^{-10}$ на интервале усреднения 10^{-3} с,
 $8 \cdot 10^{-13}$ на интервале усреднения 1 с,
 $5 \cdot 10^{-17}$ на интервале усреднения 10^5 с,
 $1,5 \cdot 10^{-17}$ на интервале усреднения $2 \cdot 10^5$ с.

2.2.3. Метод активной оптоэлектронной компенсации

Возмущения фазы передаваемого по оптической линии сигнала эталонной частоты порождаются оптическим волокном - оптической средой, по которой распространяется оптический сигнал. Наиболее эффективным методом подавления возмущений, вносимых волокном, было бы подавление их путем прямого воздействия на оптическую среду канала связи. Исследования для реализации такого метода были начаты более десяти лет тому назад в нескольких лабораториях JPL (NASA), LNE-SYRTE + LPL [9-12].

Принцип активной оптоэлектронной компенсации вносимых ВОЛС возмущений основан на передаче радиочастотного ЭСЧ по одному волокну в прямом и обратном направлениях. Из сравнения фаз двух радиочастотных сигналов – эталонного, который отправляется в оптическую линию, и сигнала, проделавшего путь по линии в одну сторону и обратно, можно получить сигнал фазовой ошибки, который будет пропорционален вносимым линией возмущениям фазы ЭСЧ.

Этот сигнал фазовой ошибки можно использовать для коррекции фазы передаваемого ЭСЧ, например, путем изменения длины оптической линии с помощью управляемой оптической линии задержки (ОЛЗ), которая последовательно включается в основную длинную оптическую линию передачи ЭСЧ. Такой метод активной компенсации, когда оптической линией задержки корректируется фаза распространяющегося в ВОЛС на оптической несущей радиочастотного эталонного сигнала, получил название активной оптоэлектронной компенсации [8].

Сущность метода активной оптоэлектронной компенсации фазовых возмущений, вносимых каналом ВОЛС, понятна из упрощенной схемы, представленной на рисунке 21. Обозначения на рисунке 21: Ц - оптический циркулятор, ОТ - оптический трансмиттер, ОР - оптический ресивер, ОЛЗ - управляемая оптическая линия задержки, ФД - фазовый детектор.

На рисунке 21 интегральное шумовое возмущение фазы сигнала при прохождении им канала ВОЛС в одном направлении обозначено $\varphi_{\text{ш}}$. После пробега сигнала по ВОЛС «туда и обратно» интегральное шумовое возмущение фазы сигнала будет равно $2\varphi_{\text{ш}}$. Коррекция фазовых возмущений ЭСЧ, накапливаемых при его распространении по ВОЛС, может осуществляться путем изменения длины линии с помощью управляемой оптической

линии задержки ОЛЗ на величину сигнала ошибки

$$2\varphi_{\text{КОР}}(t) = -2\varphi_{\text{Ш}}(t). \quad (10)$$

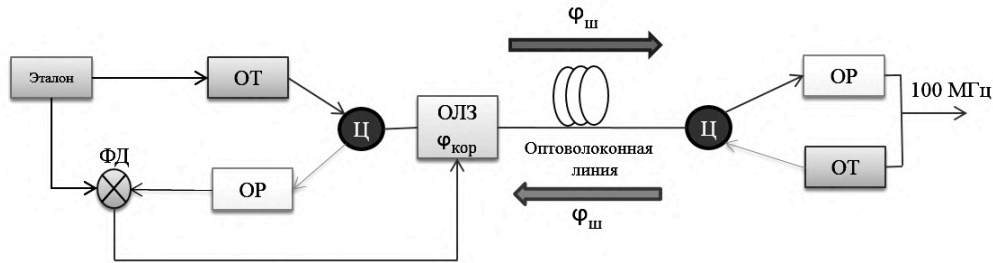


Рис. 21. Схема оптоэлектронной компенсации вносимых ВОЛС возмущений фазы передаваемого по ней радиочастотного эталонного сигнала

Коэффициент два в выражении (10) отражает тот факт, что шумовые и корректирующие возмущения воздействуют на фазу передаваемого сигнала ЭСЧ при распространении его по линии как «туда», так и «обратно». Корректирующий фазу сигнал ошибки $\varphi_{\text{КОР}}(t)$ вырабатывается фазовым детектором ФД, а затем пройдя фильтр нижних частот, усиливается в электронном контроллере, входящем в состав управляемой ОЛЗ, и обеспечивает непрерывную автоподстройку длины оптической линии передачи ЭСЧ.

2.2.3.1. Исследования работы макета по передаче эталонного сигнала 100 МГц и 200 МГц на 100 км с оптоэлектронной компенсацией

Был создан макет, реализующий идею активной оптоэлектронной компенсации фазовых возмущений, вносимых каналом ВОЛС, представленную на рисунке 21. На рисунке 22 приведена схема передачи на 100 км эталонного сигнала 200 МГц и на рисунке 24 эталонного сигнала 100 МГц.

Измерения нестабильности частоты (СКДО) эталонного сигнала 200 МГц, переданного макетом на удаленный конец 100 км ВОЛС, были выполнены анализатором Symmetricom 5125A по схеме, представленной на рисунке 22, и результаты измерений приведены на рисунке 23.

Полученные результаты измерений с управляемой оптической линией задержки подтверждают, что макетом эталонный сигнал частотой 200 МГц можно передать на удаленный конец 100 км ВОЛС с погрешностью (СКДО) $2 \cdot 10^{-16}$ на интервале усреднения в одни сутки.

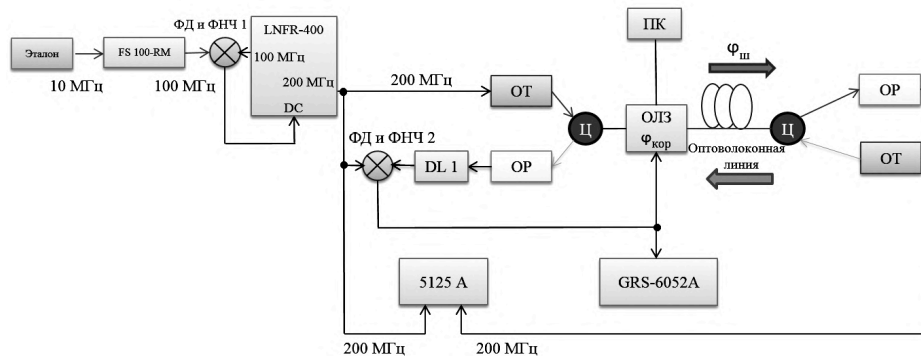


Рис. 22. Упрощенная схема проведения измерений СКДО сигнала 200 МГц, переданного на удаленный конец 100 км ВОЛС. FS100-RM – умножитель частоты с выходной частотой 100 МГц, LNFR-400 – малошумящий генератор с выходными частотами 100 МГц и 200 МГц, синхронизированный по эталонному сигналу

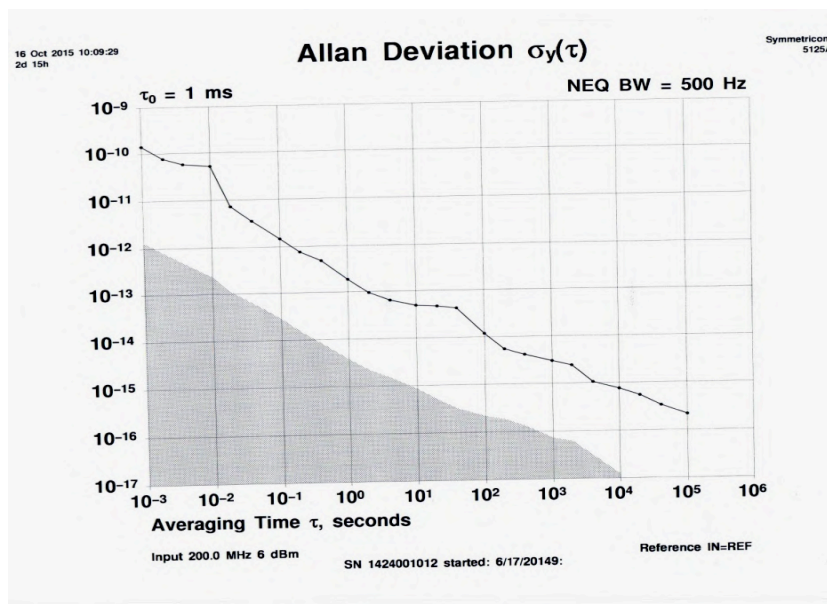


Рис. 23. Нестабильность (СКДО) частоты сигнала 200 МГц, переданного на удаленный конец 100 км ВОЛС с управляемой ОЛЗ

Измерение нестабильности частоты (СКДО) эталонного сигнала частотой 100 МГц, переданного макетом по волоконно-оптической линии на 100 км, осуществлялось согласно схеме на рисунке 24 с помощью прибора Symmetricom 5125A, включенного в режиме измерения девиации Аллана, и результаты измерений снимались с него в графической форме.

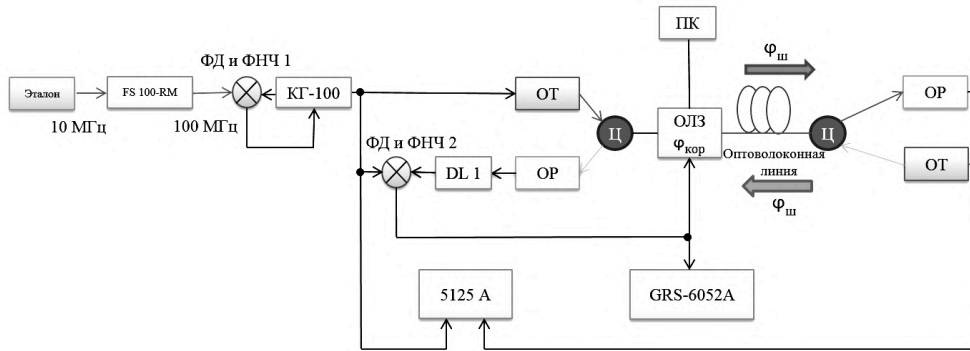


Рис. 24. Упрощенная схема проведения измерений СКДО сигнала 100 МГц, переданного на удаленный конец 100 км ВОЛС. FS100-RM – умножитель частоты с выходной частотой 100 МГц

Полученные результаты измерений с разработанной управляемой оптической линией задержки подтверждают, что макетом эталонный сигнал частотой 100 МГц можно передать на удаленный конец 100 км ВОЛС с погрешностью (СКДО) $6 \cdot 10^{-17}$ на интервале усреднения в одни сутки.

Выполненные в нескольких лабораториях мира к настоящему времени исследования подтверждают, что при использовании активных систем компенсации возможна передача эталонных сигналов частоты с относительной погрешностью на уровне $10^{-17} \dots 10^{-16}$ на суточном интервале усреднения в линиях длиной от километра до нескольких десятков километров. В то же время, передача эталонных сигналов частоты без использования систем компенсации, как указывалось выше, даже в коротких линиях до 1 км возможна с погрешностью в несколько единиц пятнадцатого знака, а в более длинных линиях с погрешностью на уровне $\sim 10^{-14} - 10^{-13}$ на суточном интервале усреднения. Следовательно, используя системы активной компенсации возмущений, вносимых волоконно-оптической линией, можно на два-три порядка снизить погрешность передачи по ВОЛС эталонных радиочастотных сигналов на расстояния в десятки километров.

Также следует отметить, что схемы активной компенсации лучше работают при передаче более высокочастотных сигналов в диапазоне 1 - 2 ГГц. Это связано с тем, что величина фазовой ошибки растет с ростом частоты, и на более высоких частотах передаваемого ЭСЧ амплитуда сигнала фазовой ошибки превышает шумы на выходе фазового детектора при меньших возмущениях ВОЛС. Экспериментально показано, что эталонный сигнал 1 ГГц и более высокочастотный сигнал при использовании активной компенсации может быть передан на расстояние 86 км с погрешностью в несколько единиц восемнадцатого знака [11].

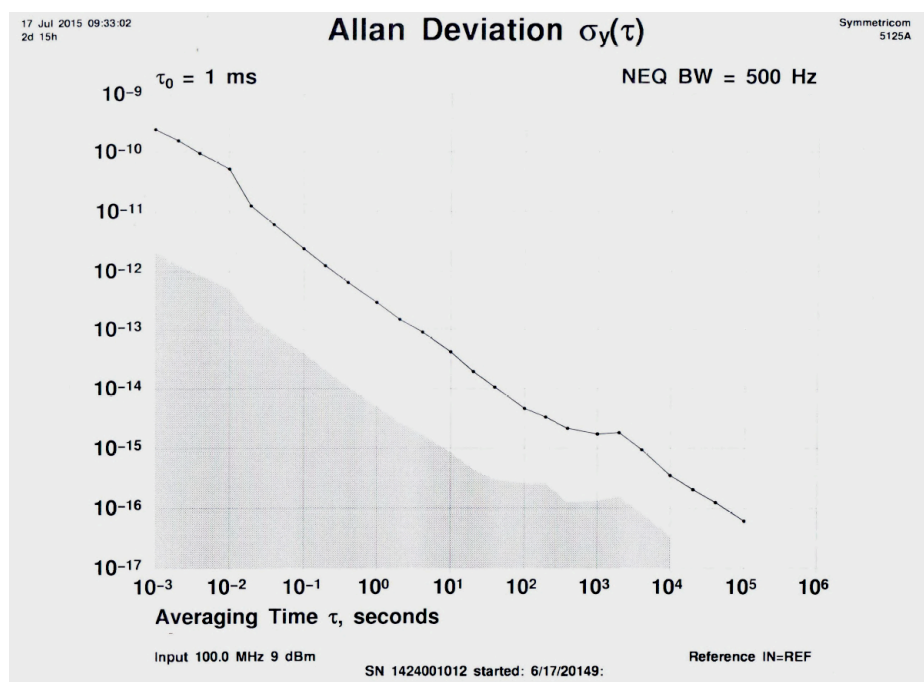


Рис. 25. Нестабильность (СКДО) частоты на разных интервалах усреднения сигнала 100 МГц, переданного на удаленный конец 100 км ВОЛС (при использовании управляемой ОЛЗ с двумя платами Пельтье)

2.2.4. Схема передачи сигнала времени по волоконной линии «туда и обратно»

Для измерений задержки эталонного сигнала времени в линии, а также для компенсации вносимых волоконной линией возмущений необходимо передавать эталонный сигнал в ВОЛС туда и обратно. При этом предполагается, что скорость и время распространения эталонного сигнала в волоконной линии в двух направлениях одинаково. Такое предположение выполняется с высокой точностью для стандартного оптического волокна, если длина волны оптических несущих, распространяющихся в двух направлениях, равны. Если длины волн оптических несущих не равны, то разность времени распространения сигнала туда и обратно можно оценить по величине хроматической дисперсии оптического волокна. Для стандартного волокна SMF-28 коэффициент хроматической дисперсии равен 17 пс/нм·км.

На рисунке 26 приведена упрощенная схема двунаправленной передачи сигнала эталонного времени 1 pps, либо импульсного сигнала времени с более коротким периодом. Двунаправленная передача эталонного сигнала может быть осуществлена в одном и том же волокне. Для разделения оптических сигналов, идущих туда и обратно, используются оптические циркуля-

торы Ц, установленные на концах оптической линии.

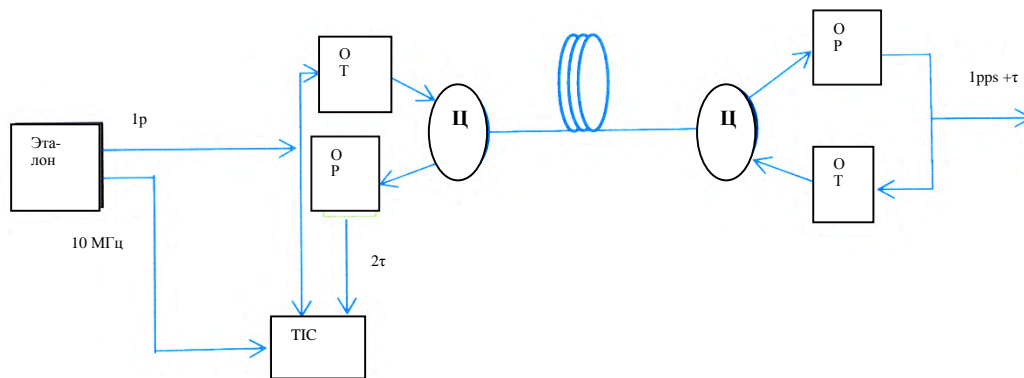


Рис. 26. Упрощенная схема двунаправленной передачи эталонного сигнала времени с измерением задержки сигнала в оптоволоконной линии. Ц – оптический циркулятор, ТИС – измеритель интервалов времени, ОТ – оптический трансмиттер (лазер), ОР – оптический ресивер (фотоприемник с усилителем)

Представленная на рисунке 26 схема позволяет непрерывно проводить измерения задержки сигнала, пробежавшего туда и обратно по волоконно-оптической линии с помощью измерителя интервалов времени ТИС. Показания измерителя интервалов времени будут соответствовать удвоенному значению времени $2\tau_{\text{л}}$ распространения эталонного сигнала по линии $\tau_{\text{л}}$ в одну сторону.

При использовании схемы двунаправленной передачи сигналов времени точность определения положения на шкале времени сигнала 1 pps на удаленном конце линии будет определяться ограниченным разрешением измерителя интервалов ТИС, джиттером фронта сигнала, приобретенного как в линии, так и в результате двойного электрооптического преобразования в оптических трансмиттерах и ресиверах, а также неопределенностью калибровочных измерений задержек на всех элементах системы передачи.

Температура оптического кабеля, размещенного под землей, изменяется медленно, а потому время задержки сигнала в линии $\tau_{\text{л}}$ изменяется также медленно. Это позволяет проводить усреднение результатов измерений на достаточно длительном интервале и достаточно точно определять усредненное значение задержки $\tau_{\text{л}}$ в каждый момент времени.

При осуществлении передачи по схеме, представленной на рисунке 26, суммарная (случайная и систематическая) погрешность определения положения на эталонной шкале сигнала времени 1 pps, получаемого на удаленном конце линии, будет лежать на уровне в несколько десятков пикосекунд. Основной вклад в случайную погрешность будет вносить джиттер сигнала и измеритель интервалов ТИС, а систематическую погрешность будет определять неопределенность калибровочных измерений задержек сигнала в лазерных трансмиттерах и оптических ресиверах и в других электронных уст-

ройствах, установленных в цепи системы передачи сигнала, а также зависимость этих задержек от изменений окружающей температуры в местах размещения электронных блоков на концах линии.

2.2.5. О влиянии температуры в помещениях, где размещена электронная аппаратура передачи ЭСЧВ, на погрешность передачи

На точность передачи ЭСЧВ по ВОЛС оказывает влияние не только вариации температуры волоконной линии, но также фактор изменения температуры в местах размещения электронных устройств, установленных на концах линии передачи. При описании схем систем передачи с устройствами компенсации по умолчанию предполагается, что температура в помещениях на концах линии постоянна, а потому нет вариаций задержек эталонного сигнала в электронных устройствах, установленных на концах линии. Но это условие никогда не выполняется строго при реализации системы передачи, а потому необходимо проанализировать влияние этого фактора на точность передачи ЭСЧВ.

Время задержки сигнала в любом электронном или оптоэлектронном устройстве зависит от температуры. Температурный коэффициент времени задержки в таких устройствах может иметь разный знак и типичную величину в пределах от 3 пс/К до 40 пс/К. Так, например, высокостабильные буферные усилители эталонных сигналов 5 МГц (10 или 100 МГц) с единичным коэффициентом усиления, специально сконструированные для метрологических целей, имеют температурный коэффициент в пределах 3 ... 10 пс/К. Более сложные электронные устройства могут иметь температурный коэффициент ~ 40 пс/К. Следует отметить, что время распространения сигнала туда и обратно в схеме на рисунке 26 одинаково при условии, что лазерные трансмиттеры и оптические ресиверы идентичны и имеют одинаковый тем-пературный коэффициент задержки. Но температурный коэффициент задержки сигнала в электронных устройствах одного типа различается от образца к образцу. Это приводит к дополнительной ошибке при учете значений задержек в трансмиттерах и ресиверах, а также в других блоках, установленных на концах линии, из-за изменения температуры в помещениях, где они размещены. Тем более, что ход изменений температуры в удаленных помещениях может иметь разный характер.

Для повышения точности передачи сигнала времени необходимо, чтобы не только эталон и электронная аппаратура, установленные у входа в линию, но и блоки, подключенные к удаленному концу передающей линии, находилась в термостатированных помещениях. Климатические требования, предъявляемые к помещениям, куда поступает эталонный сигнал, должны быть близки к тем, которые предъявляются к помещениям, в которых устанавли-

вают водородные хранители, формирующие шкалу времени на том или ином объекте. Отметим, что аппаратура, входящая в состав ГЭВЧ, находится в помещениях, в которых непрерывно поддерживается температура в пределах $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, а обычный уровень требований по поддержанию постоянства температуры в местах размещения рабочих эталонов и аппаратуры частотных сличений - $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Можно сделать следующий общий вывод, относящийся к вопросу передачи по линиям эталонных сигналов времени, с погрешностью на уровне $\sim 1\text{ нс}$ и меньшей. Нецелесообразно доставлять эталонный сигнал времени 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 дополнительную погрешность – неопределенность положения доставленного сигнала на эталонной шкале времени. Эта погрешность, вносимая принимающими сигнал электронными устройствами, установленными на удаленном конце линии, может быть значительно больше той, которую вносит собственно оптический кабель длиной $\sim 1\text{ км}$, протянутый под землей, где температура изменяется не более чем на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение суток. Даже при поддержании окружающей среды в пределах $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ в помещениях, где размещены электронные устройства, участвующие в передаче ЭСЧВ, они могут дать суммарный температурный коэффициент временной задержки сигнала больший, чем температурный коэффициент 38 пс/К времени задержки однокิโลметровой волоконной линии (температурный коэффициент задержки волокна $\sim 38\text{ пс/К}\cdot\text{км}$).

Следует помнить, что если принимающие эталонный сигнал устройства нетермостатированы и они размещены в местах, где температура изменяется на десятки градусов, то вносимая ими дополнительная погрешность может достигать уровня наносекунды и выше, даже в случае применения систем компенсации возмущений, вносимых оптоволоконной линией при передаче ЭСЧВ.

2.2.6. Схема передачи сигнала времени по ВОЛС с активной компенсацией на основе электронных линий задержки

На рисунке 27 представлена упрощенная структурная схема двунаправленной передачи по ВОЛС эталонного сигнала времени, в которой реализуется постоянство задержки сигнала 1 pps при изменениях температуры линии.

В схеме на рисунке 27 используются последовательно включенные в линию передачи сигнала, как туда, так и обратно, две одинаковые компенса-

онные электронные управляемые линии задержки ЭЛЗ. Сигнал управления для них вырабатывается на основании данных о величине задержки пробежавшего туда и обратно сигнала времени 1 pps, которые поступают от измерителя интервалов ТИС. Цифровой результат измерений ТИС преобразуется ЦАП в аналоговую форму, фильтруется ФНЧ и подается на две управляемых ЭЛЗ.

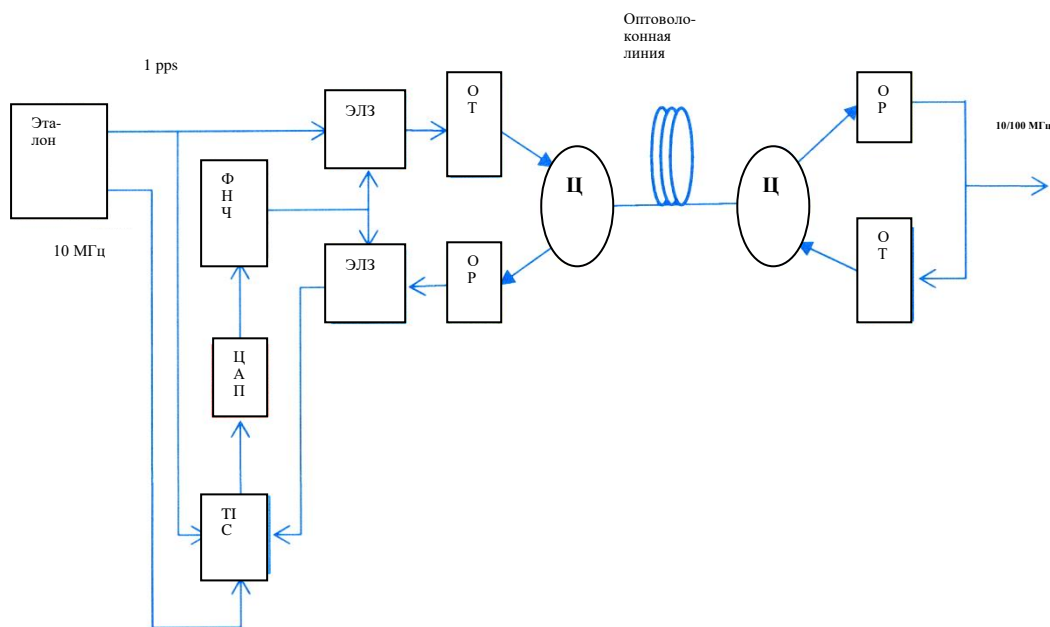


Рис. 27. Упрощенная структурная схема двусторонней передачи эталонного сигнала 1 pps с компенсацией вариаций задержки сигнала в линии. ЭЛЗ – управляемые электронные линии задержки

Схема на рисунке 27 представляет собой замкнутую петлю обратной связи, которая поддерживает постоянство времени задержки сигнала 1 pps при изменениях температуры волоконной линии. В англоязычной научной литературе такие схемы автоподстройки временной задержки называют DLL (delay-locked loop) подобно тому, как петли фазовой автоподстройки частоты называют PLL (phase-locked loop).

Если управляемая электронная линия задержки имеет достаточный диапазон регулирования, то она может компенсировать не только суточные, но и сезонные изменения температуры оптического кабеля. Для того, чтобы скомпенсировать сезонные – зима–лето температурные вариации задержки сигнала в оптическом подземном кабеле длиной ~1 км, необходимо иметь

управляемую электронную линию задержки с диапазоном регулирования не менее 1 нс. А для того, чтобы скомпенсировать сезонные – зима–лето температурные вариации задержки сигнала в оптическом подземном кабеле длиной ~100 км, необходимо иметь управляемую электронную линию задержки с диапазоном регулирования порядка 100 нс.

2.2.7. Схема передачи эталонных частот по ВОЛС с активной электронной компенсацией на основе электронных линий задержки

Для снижения погрешности передачи эталонных радиочастот используются схемы активной компенсации вносимых линией возмущений фазы передаваемого сигнала, которые, как отмечено выше, подразделяются на схемы электронной и оптоэлектронной компенсации. В схемах с оптоэлектронной компенсацией используются управляемые ОЛЗ (см. рисунок 21), а с электронной компенсацией – перестраиваемые по частоте вспомогательные генераторы (см. рисунок 15) или управляемые ЭЛЗ (см. рисунок 28).

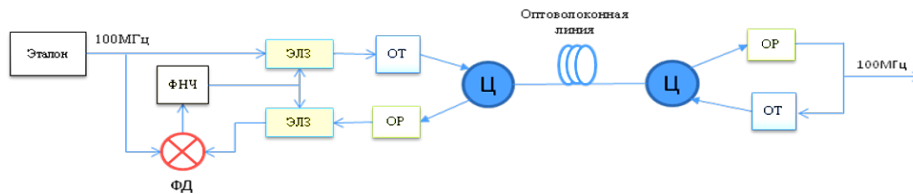


Рис. 28. Упрощенная схема передачи эталонной частоты 100 МГц с электронной компенсацией возмущений, вносимых оптоволоконной линией. ЭЛЗ – управляемая оптическая линия задержки; ФД – фазовый детектор

Поясним принцип работы системы, построенной по схеме активной электронной компенсации, представленной на рисунке 28 [14]. В этой схеме в качестве компенсационного устройства используются две управляемые электронные линии задержки ЭЛЗ. Сигнал фазовой ошибки, получаемый у входа в линию на фазовом детекторе после сравнения фазы сигнала эталонной частоты 100 МГц с фазой сигнала, пробежавшего по оптической линии туда и обратно, управляет длиной линии с помощью двух комплементарных ЭЛЗ.

Вносимые оптоволоконной линией возмущения фазы эталонного сигнала, пробегающего путь туда и обратно, компенсируются двумя ЭЛЗ, и в полосе автоподстройки переданный на удаленный конец ВОЛС сигнал с высокой точностью соответствует частоте эталонного сигнала.

Выполненные в нескольких лабораториях мира к настоящему времени исследования подтверждают, что при использовании активных систем компенсации на основе управляемых оптических и электронных линий задерж-

ки возможна передача эталонных сигналов частоты с погрешностью на уровне $\sim 10^{-17}$ на суточном интервале усреднения в линиях длиной в несколько десятков километров [5-12]. Следовательно, используя системы активной компенсации возмущений, вносимых волоконно-оптической линией, можно передать эталонный радиочастотный сигнал водородного стандарта практически без потери точности на расстояние в десятки километров, так как у стандарта его собственная нестабильность на суточном интервале усреднения имеет на два порядка более высокий уровень $7 \cdot 10^{-16}$ (см. рисунок 9).

В заключение также отметим, что передача эталонных сигналов частоты без использования систем компенсации в коротких линиях ~ 1 км возможна с погрешностью $\sim 3 \cdot 10^{-16}$, а в более длинных линиях с погрешностью на уровне $\sim 10^{-14}$ на суточном интервале усреднения. Следовательно, используя системы активной компенсации возмущений, вносимых волоконно-оптической линией, возможно снизить погрешность передачи частоты по ВОЛС на два порядка.

2.2.8. Схема совместной передачи эталонной частоты и сигнала времени с компенсацией на основе электронных линий задержки

Выше были рассмотрены упрощенные схемы передачи эталонной частоты (рисунок 28) и сигналов времени (рисунок 27) с электронными линиями задержки. Возможна реализация совместной передачи одной системой сигналов эталонной частоты и времени. Схема такой системы представлена на рисунке 29.

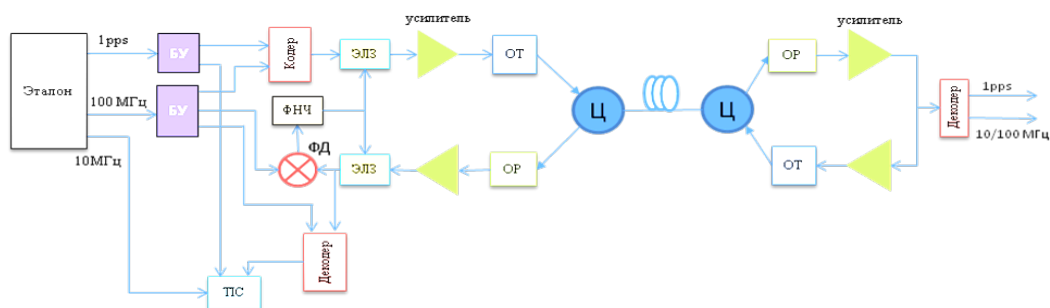


Рис. 29. Упрощенная схема системы передачи эталонной частоты 100 МГц и сигнала 1pps с электронной компенсацией возмущений, вносимых оптоволоконной линией.

БУ – буферные усилители

Принцип компенсации в схеме на рисунке 29 такой же, как в схеме на рисунке 28, реализующей передачу эталонной частоты. Для передачи эталонного времени импульс 1 pps в блоке «Кодер» «вписывается» в передаваемый

сигнал с эталонной частотой 100 МГц, то есть тем или иным способом осуществляется модуляция сигнала 100 МГц сигнала 1 pps. А в блоке «Декодер» на удаленном конце линии выделяются сигналы 1 pps, 100 МГц и поделенный в десять раз сигнал частотой 10 МГц.

В блоке «Декодер» у начала линии выделяется сигнал 1 pps для измерения времени задержки сигнала, пробежавшего туда и обратно по линии с помощью измерителя интервалов ТИС. Время задержки передаваемого сигнала времени 1 pps в такой схеме будет постоянным, так как при передаче эталонной частоты длина линии будет непрерывно корректироваться двумя ЭЛЗ и поддерживаться постоянной.

Представленные на рисунках 27-29 схемы передачи ЭСЧВ обладают симметрией путей прохождения сигналов туда и обратно, и по точности передачи ЭСЧВ их можно отнести к наилучшим системам. Анализ этих схем с двумя ЭЛЗ говорит о том, что они должны обеспечивать лучшую фильтрацию шумов линии, чем схема оптоэлектронной компенсации, использующая ОЛЗ, приведенная на рисунке 21. Это связано с тем, что все управляемые оптические линии задержки (ОЛЗ) с диапазоном регулирования ~ 100 пс и более обладают малым быстродействием. Поэтому на основе таких «медленных» управляемых линий задержки можно реализовать только очень узкую полосу фильтрации шумов линии, и она в лучшем случае будет составлять доли Герца. Отметим, что допустимая полоса обратной связи петли DLL ограничивается длиной волоконной линии, и для 100 км линии оптимальная полоса должна составлять ~ 300 Гц. Электронные управляемые ЭЛЗ, выполняемые в виде микрочипов, обладают большим быстродействием, и на их основе можно реализовать оптимальную широкую полосу фильтрации. Для схем на рисунках 27 - 29 микрочип должен содержать две комплементарные управляемые ЭЛЗ, имеющие очень близкие характеристики, с диапазоном перестройки ~ 100 нс (для компенсации сезонной вариации задержки в 100 км линии) и, предпочтительно, чтобы перестройка задержки осуществлялась аналоговым сигналом плавно, а не ступенчато. Анализ имеющихся на рынке микросхем говорит о том, что сейчас нет серийно выпускаемых аналоговых комплементарных микросхем, обеспечивающих плавную быструю перестройку времени задержки в диапазоне ~ 100 нс. Есть, например, цифровые микросхемы, которые имеют минимальный шаг изменения задержки 10 пс, с диапазоном перестройки до 10 нс и отклонением от линейного закона задержки ~ 30 пс. Цифровые микросхемы ЭЛЗ с большим диапазоном перестройки имеют соответственно и большую величину шага изменения задержки. Это является одним из препятствий реализации для длинных ВОЛС схем компенсации на основе электронных линий задержки, выполненных в виде микрочипов. Отметим также, что электронно-механические управляемые линии задержки (ЭМЛЗ) тромбонного типа

Альманах современной метрологии, 2016, №8

имеют небольшой диапазон плавной перестройки - до 1 нс и неопределенность установки задержки ~ 10 пс. И такие ЭМЛЗ имеют малое быстродействие и другой существенный недостаток - у них ограниченный ресурс количества включений для регулировки задержки. Поэтому они не смогут длительное время надежно работать в цепи непрерывного авторегулирования.

2.2.9. Экспериментальная реализация совместной передачи ЭСЧВ с компенсацией на основе электронных линий задержки

Конкретная реализация схемы передачи ЭСЧВ по ВОЛС с компенсацией на основе двух электронных линий задержки, которая в 2012 году была разработана исследователями из Польши, изображена на рисунках 30 и 31 [14]. Компенсация изменений задержки сигнала в ВОЛС производится петлей обратной связи двумя одинаковыми линиями задержки. Секундный импульс 1 pps модулирует передаваемый импульсный сигнал эталонной частоты 10 МГц путем удлинения соответствующего импульса 10 МГц в момент поступления фронта 1 pps. Встраивание сигнала 1 pps производится таким образом, чтобы положение фронтов нарастания 10 МГц сигнала оставались без изменений, и только положение спада 10 МГц импульса смещалось по времени в момент поступления 1 pps сигнала.

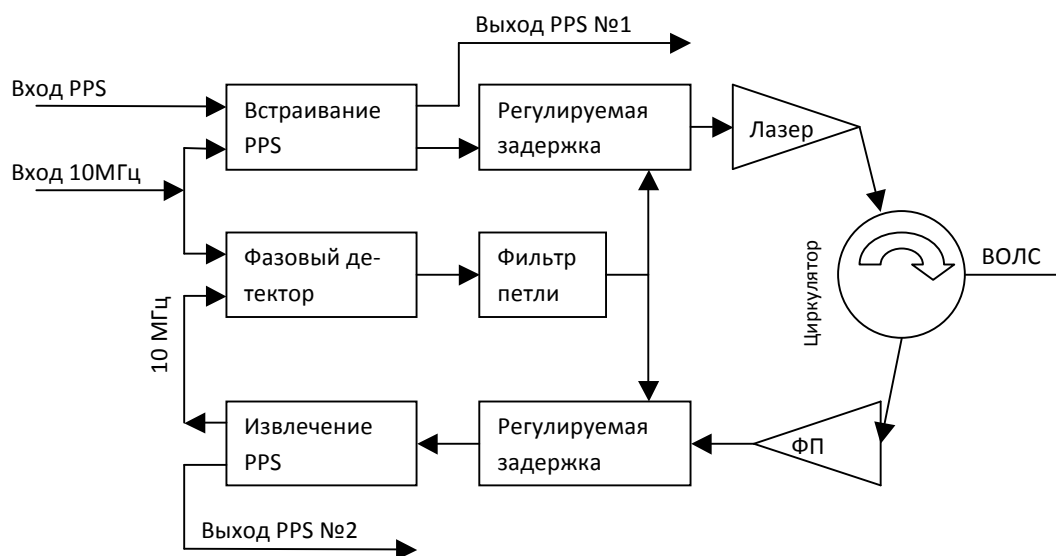


Рис. 30. Локальный модуль системы передачи времени и частоты, устанавливаемый у начала линии [14]

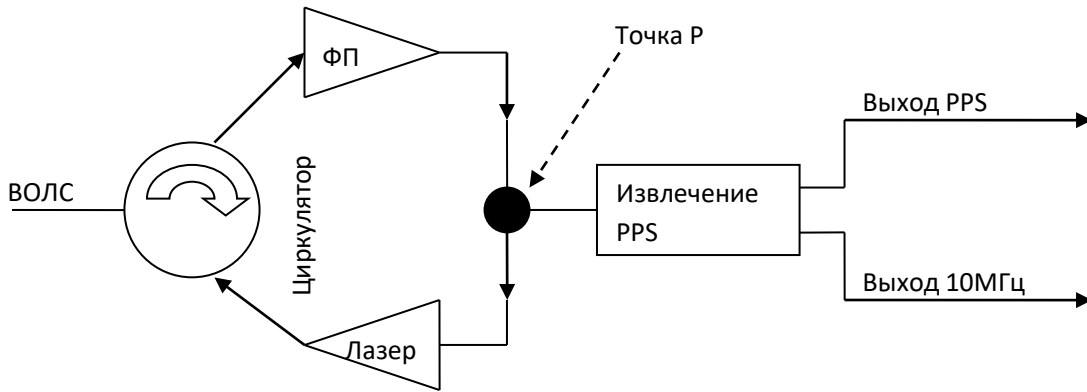


Рис. 31. Удаленный модуль системы передачи времени и частоты, устанавливаемый на конце линии [14]

На удаленном конце линии сигнал 1 pps детектируется при сравнении приходящего удлиненного 10 МГц импульса со стандартным. Исходная высокоточная периодичность сигнала частоты 10 МГц поддерживается цепью обратной связи путем сравнения фаз отправляемого сигнала и фазы сигнала пробежавшего по линии туда и обратно. Фазовый детектор устроен таким образом, что он реагирует только на растущие фронты сравниваемых импульсов приходящих сигналов. Поэтому изменение положения фронта спада не влияет на его работу.

Так как сигнал 1 pps, передающий время, проходит тот же путь, что и эталонный сигнал 10 МГц, передающий частоту, то в результате цепь обратной связи передачи частоты стабилизирует также и задержку 1 pps на выходе линии относительно исходного сигнала 1 pps. Для обеспечения возможности калибровки времени задержки сигнала от входа в локальном модуле до выхода в удаленном модуле предусмотрено в локальном модуле два вспомогательных выхода для сигнала 1 pps.

Локальный и удаленный модули имеют также микроконтроллеры (не показаны на рисунках 30 и 31), позволяющие производить обмен необходимой информацией через Ethernet линию связи. Контроллер локального модуля производит постоянный контроль изменяющейся во времени задержки сигнала. В связи с тем, что время задержки много больше периода сигнала частоты 10 МГц, возникает неопределенность в фазе, которая может возникать для ряда задержек, различающихся по времени на 100 нс. Микроконтроллер перезапускает процесс замыкания цепи обратной связи до тех пор, пока не будет достигнута середина диапазона возможной регулировки линий задержки. Кроме того, после кратковременных возмущений, вызванных, например, пропаданием сетевого электропитания или пропаданием входного

сигнала, предыдущее состояние цепи обратной связи может быть восстановлено.

Исследователи из Польши для создания рассмотренной системы передачи ЭСЧВ по ВОЛС 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 [14] 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 [14,15]. Погрешность передачи эталонной частоты в эксперименте оценена авторами на уровне $4 \cdot 10^{-17}$. Погрешность передачи сигнала времени по оптической линии длиной 420 км была оценена авторами на уровне ~ 12 пс. Эта оценка результатов измерений, полученных на оптической линии, проверялась авторами при сравнении с результатами сличений часов, установленных на концах линии, спутниковыми методами PPP и GPS CV. В пределах 1,3-2,5 нс результаты сличений по волоконной линии совпадали с результатами спутниковых методов, которые, как считают авторы работы [15], давали более значительную погрешность сличений.

Результаты работ [14,15] являются в настоящее время одними из лучших. Для обеспечения передачи оптической несущей эталонного сигнала на расстояние 420 км использовались специально разработанные восемь двунаправленных оптических EDFA усилителей и оптических фильтров, установленных в промежуточных узлах связи.

Важной особенностью схемы является то, что поддержание постоянства задержки сигнала в линии осуществляется на основе «быстрых» фазовых сличений на частоте 10 МГц, и при этом использовались быстродействующие электронные управляемые аналоговым сигналом линии задержки для непрерывной корректировки длины оптической линии. С такими новыми опытными образцами быстродействующей ЭЛЗ была реализована петля DLL автоподстройки задержки с полосой порядка сотни Герц, что эффективно подавляло шумы линии.

Завершая описание основных черт схемы, представленной на рисунках 30 и 31, отметим следующее. Принципиальная потребность реализации эффективной и технологичной в исполнении системы передачи ЭСЧВ побудило исследователей из Польши инициировать разработку экспериментальных образцов новой аналоговой микросхемы с двумя комплементарными быстродействующими управляемыми линиями задержки и фазовым детектором на одном кристалле. Первые опытные образцы такой микросхемы были получены и применены ими в системе передачи ЭСЧВ по ВОЛС. С этим в ча-

Альманах современной метрологии, 2016, №8

стности связан успех этой исследовательской группы в решении задач передачи ЭСЧВ по ВОЛС, которая заняла передовые позиции в вопросе передачи эталонных радиочастот по ВОЛС. Следует подчеркнуть, что диапазон регулирования в 100 нс созданных первых опытных образцов такой микросхемы с двумя комплементарными управляемыми аналоговыми линиями задержки позволяет реализовать систему компенсации сезонных изменений температуры линии и поддерживать постоянство задержки в подземном оптическом кабеле длиной до 100 км круглогодично непрерывно без перенастройки системы.

2.2.10. Схема передачи ЭСЧВ по ВОЛС на двух оптических длинах волн в одном волокне с электронной компенсацией

Исследователи из Китая реализовали эксперимент по передаче сигналов эталонной частоты и сигналов времени по кабелю длиной 80 км по двум оптическим каналам с различной длиной волны в одном волокне [16]. На рисунке 32 изображены составные части их схемы и пояснено их взаимодействие.

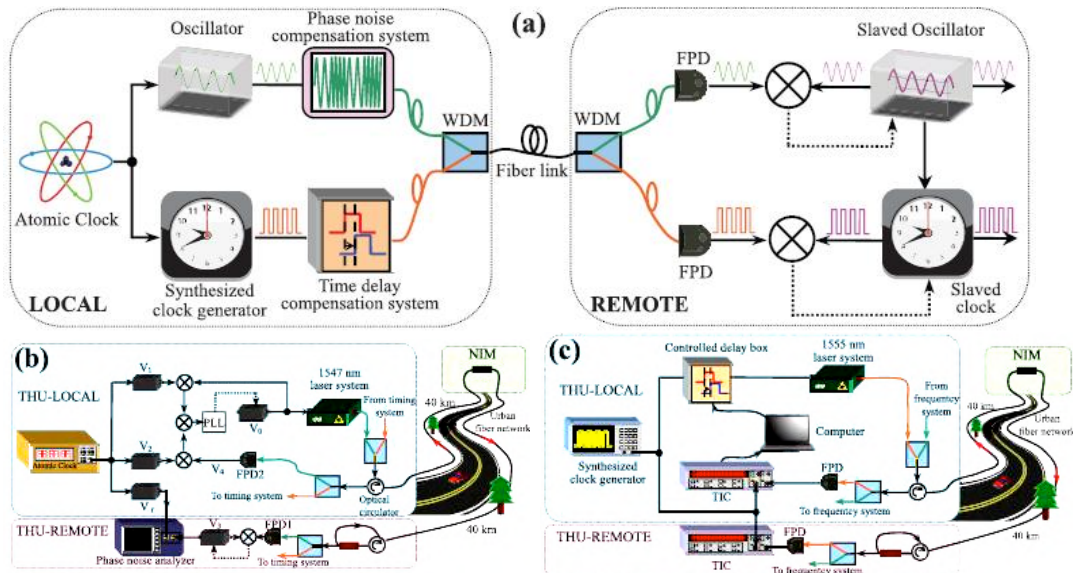


Рис. 32. Системы передачи точного времени и эталонной частоты [16]

(a) Принцип системы передачи времени и частоты. В удаленном модуле вспомогательный генератор (slaved oscillator) привязан по фазе к принимаемому сигналу частоты от генератора (oscillator) локального модуля.

(b) Система компенсации фазового шума при передаче сигнала эталонной частоты 9,1 ГГц.

(c) Система компенсации задержки времени при распространении сигнала времени

Схема передачи сигнала эталонной частоты реализована с помощью оптического излучения с длиной волны 1547 нм, а схема передачи сигналов времени реализована на длине волны 1555 нм. Оптические сигналы на этих двух длинах волн разделяются у начала и конца ВОЛС оптическими мультиплексорами.

Рассмотрим вначале схему передачи сигналов частоты (рисунок 32 б). Эта схема компенсации по существу соответствует схеме, описанной выше на рис. 15. Отличие только в том, что в ней используется не управляемый кварцевый генератор (VCXO) на 100 МГц, а более высокочастотный на 9,1 ГГц управляемый генератор (PDRO - phase-locked dielectric resonant oscillator) на диэлектрическом резонаторе. В схеме выходной эталонный сигнал атомных часов преобразовывается в три синусоидальных сигнала $V_1 = \cos(\omega_1 t + \varphi_1)$, $V_2 = \cos(\omega_2 t + \varphi_2)$ и $V_r = \cos(\omega_r t + \varphi_r)$. Частоты $\nu_1 = \omega_1 / (2\pi)$, $\nu_2 = \omega_2 / (2\pi)$ и $\nu_r = \omega_r / (2\pi)$, и фазы связаны как $(\nu_1 + \nu_2) / 2 = \nu_r$ и $\varphi_1 + \varphi_2 = 2\varphi_r + \xi$, где ξ – фиксированный постоянный фазовый сдвиг. При этом сигнал V_r частотой 9,1 ГГц как раз и представляет собой тот сигнал локального модуля, установленного в начале линии, который будет точно воспроизводиться удаленным модулем на конце линии.

Сигнал ошибки, получаемый у входа в линию, управляет работой генератора PDRO. Выходной сигнал $V_0 = \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ генератора PDRO частотой 9,1 ГГц передается на оптической несущей с длиной волны 1547 нм через циркулятор в волоконно-оптическую линию связи. На удаленном модуле оптический сигнал поступает в циркулятор, а затем в разветвитель. После этого оптический сигнал с одного выхода разветвителя поступает на фотоприемник FPD1, а с второго через циркулятор направляется по ВОЛС назад к локальному модулю.

Вернувшийся назад сигнал, пройдя через циркулятор, поступает на фотоприемник FPD2, на выходе которого формируется сигнал $V_4 = \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + 2\varphi_p)$, где φ_p – фазовая задержка распространения сигнала по ВОЛС в одну сторону от локального к удаленному модулю. На выходе фотоприемника FPD1 удаленного модуля при этом формируется выходной сигнал $V_3 = \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_p)$.

Условие правильной передачи фазы эталонной частоты $\varphi_p = \varphi_r + 2\pi n$, где n – целое число обеспечивает замкнутая петля обратной связи (ОС) системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Система ФАПЧ работает следующим образом. При изменении фазовой задержки φ_p сигнала в ВОЛС

(например, под влиянием изменения температуры), то есть при увеличении ее на $(+\Delta\varphi_p)$, и после компенсации ее системой ФАПЧ до нулевого значения изменение фазы на выходе передатчика локального модуля должно составить $(-\Delta\varphi_p)$, а на его входе после двойного прохождения ВОЛС должно составить $(+\Delta\varphi_p)$. Таким образом, в локальном модуле нам необходимо сравнивать между собой два сигнала с «противоположными» фазами, и удерживать равенство суммы их фаз нулю.

При сравнении между собой двух сигналов с близкими фазами и при выработке сигнала ошибки, пропорционального разности фаз, результат не зависит от произвола выбора начального момента времени. Произвол сдвига сигналов по фазе на $2\pi n$ при этом, естественно, остается. В нашем случае требуется вырабатывать сигнал ошибки, пропорциональный не разности фаз, а их «сумме». Для этого производят «изменение знака» фазы путем частотного сдвига сигнала с выделением разностного сигнала с меньшей и с большей частотой. Разностный сигнал $V_4 = \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + 2\varphi_p)$ и $V_2 = \cos(\omega_2 t + \varphi_2)$, где $\omega_2 < \omega_0$ имеет вид $V_{42} = \cos\left(\left(\omega_0 - \omega_2\right)t + \varphi_0 + 2\varphi_p - \varphi_2\right)$. Разностный сигнал $V_0 = \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ и $V_1 = \cos(\omega_1 t + \varphi_1)$, где $\omega_1 > \omega_0$, имеет вид $V_{10} = \cos\left(\left(\omega_1 - \omega_0\right)t + \varphi_1 - \varphi_0\right)$. Приравняв между собой фазы сигналов V_{42} и V_{10} , поступающих на фазовый детектор цепи обратной связи, получим:

$$\omega_0 = \omega_r, \varphi_0 = -\varphi_p + (\varphi_1 + \varphi_2) / 2 = -\varphi_p + \varphi_r + \xi.$$

Следовательно, сигнал, принимаемый удаленным модулем, имеет вид $V_3 = \cos(\omega_r t + \varphi_r + \xi)$, то есть отличается от передаваемого локальным модулем сигнала на постоянный фазовый сдвиг ξ , который может быть определен при калибровке системы в лабораторных условиях. Но при передаче эталонной частоты постоянный во времени фазовый сдвиг несущественен, так как частота является производной фазы по времени. Цепь обратной связи после фазового детектора и перед входом управления PDRO имеет фильтр низких частот, пропускающий на выход только частоты не выше 200 Гц.

При проведении эксперимента частоты сигналов были выбраны такими: $\nu_0 = 9100$ МГц, $\nu_0 = 9095$ МГц, $\nu_1 = 9105$ МГц, разность частот $\nu_1 - \nu_2$ составляла 10 МГц.

Результаты исследования параметров системы передачи частоты - нестационарных сигналов, описанные в

Альманах современной метрологии, 2016, №8

бильности частоты на выходе ВОЛС при выключенной и включенной компенсации отражены на рисунке 33.

Метод компенсации при передаче импульсного сигнала времени с периодом следования 2 мс описываемой схемы поясняет рисунок 32с. Метод компенсации задержки в линии в схеме подобен способам компенсации, представленным на рисунке 26 и 27. В схеме на рисунке 33с сигнал времени генерирует синхронизируемый тактовый генератор (clock generator). Верхний на рисунке ТИС измеряет время распространения сигнала в линии туда-обратно, результаты измерений поступают в компьютер, и выработанный компьютером сигнал коррекции управляет электронной линией задержки (Controlled delay box). Компьютер устанавливает время задержки импульсов сигнала времени так, чтобы сигнал времени на выходе оптической линии воспроизводился без задержки по отношению к сигналу тактового генератора. Для уменьшения джиттера фронта импульсного сигнала времени на удаленном конце линии (см рисунок 32a remote) используется вспомогательный генератор (slaved oscillator), который привязан по фазе к поступающему сигналу частотой 9,1 ГГц от генератора (oscillator) локального модуля. Сигнал вспомогательного генератора частотой 9.1 ГГц после деления до 500 Гц формирует импульсный временной базис с периодом следования 2 мс, положение которого корректируется после сравнения его с сигналом времени, детектируемым быстрым фотодиодом FPD на удаленном конце линии.

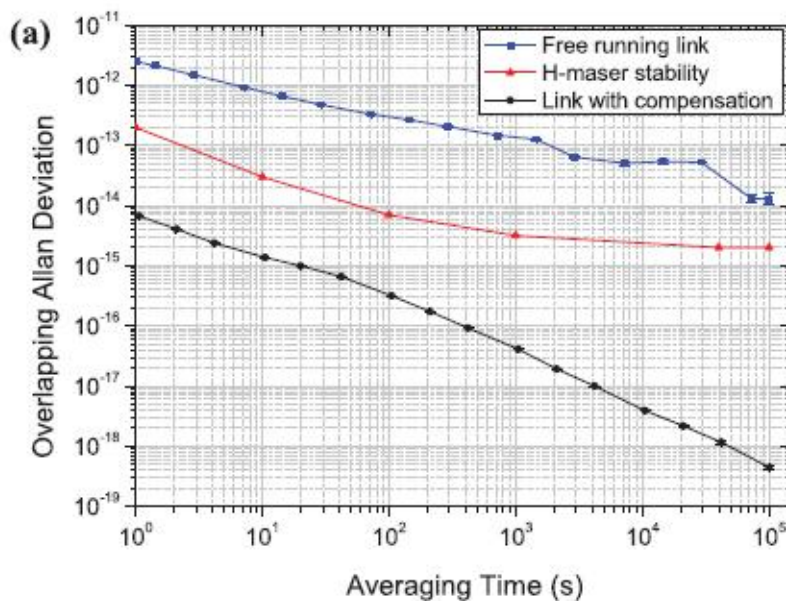


Рис. 33. Измерение нестабильности частоты на выходе ВОЛС длиной 80 км относительно сигнала, подаваемого на вход линии [16]. Верхняя кривая - компенсация выключена. Нижняя кривая - компенсация включена. Средняя кривая - нестабильность частоты выходного сигнала водородного мазера

Из рисунка 33 следует, что погрешность передачи на 80 км сигнала частотой 9,1 ГГц была на уровне $5 \cdot 10^{-19}$ на суточном интервале усреднения. Случайная погрешность передачи сигнала времени с периодом следования 2 мс была оценена авторами на уровне 50 пс. Высокая точность передачи эталонной частоты, описанной системой, связана с тем, что передавалась очень высокая частота 9,1 ГГц. Это улучшало отношение сигнал-шум получаемого сигнала ошибки в системе компенсации. Кроме того, следует отметить, что концы ВОЛС приходили в одно помещение, а потому аппаратура, установленная в начале и конце линии, находилась в одинаковом климатическом режиме, а потому вариации изменений температуры в помещении оказывали меньшее влияние на точность передачи ЭСЧВ.

2.3. О передаче ЭСЧВ в телекоммуникационной сети ВОЛС по методу Кихары

2.3.1. Дуплексный метод передачи ЭСЧВ в телекоммуникационном канале, предложенный Кихарой, как стимул для последующих исследований по проблеме передачи ЭСЧВ по ВОЛС

Предложения по реализации систем передачи по волоконно-оптическим линиям связи эталонных сигналов, обладающих высокими метрологическими характеристиками, были выдвинуты в 90-х годах прошлого века. Важным моментом в обращении последовательного внимания к этой проблеме можно считать 1995 год, когда Кихара на Европейской конференции EFTF изложил свой метод передачи сигналов точного времени в телекоммуникационных волоконно-оптических сетях связи [20,21]. Он предложил передавать сигналы эталонного времени в составе телекоммуникационного информационного потока в существующих телекоммуникационных сетях. Его метод реализовывал способ передачи сигналов точного времени и синхронизации удаленных часов на основе обмена информацией о моментах отправки и поступления меток времени на вход и конец линии.

Особенность реализации его дуплексного метода в том, что он предложил вводить информацию о времени в незаполненные ячейки заголовка кадров (фреймов) в одном из каналов телекоммуникационного потока. Он оценил перспективы предлагаемого им метода: возможно достижение погрешности передачи сигнала времени в существующих волоконно-оптических телекоммуникационных сетях на уровне ~ 10 нс на расстояниях до 1000 км [20]. Следует отметить, что используемые методы тактовой сетевой синхронизации (ТСС) в телекоммуникационных волоконно-оптических сетях обеспечивают точность синхронизации узлов связи на уровне ~ 1 мкс. Таким образом, передача сигналов времени в телекоммуникационных сетях по методу Кихары открывала реальную возможность достижения в 100 раз более вы-

сокой точности передачи времени, чем та, которую обеспечивали методы и применяемая стандартная аппаратура сетей связи. Это было одним из стимулов начала исследований по широкому фронту научных задач, связанных с передачей эталонных сигналов времени и частоты по ВОЛС.

Тогда же был дан дополнительный импульс теоретическим и практическим исследованиям по вопросу передачи по оптоволоконным линиям аналоговых радиочастотных сигналов, обладающих большим динамическим диапазоном и широким спектром, на относительно короткие расстояния в несколько километров. Эти исследования породили новое направление, получившее название аналоговая или линейная фотоника (linear photonics), которое исследует передачу аналоговых сигналов по ВОЛС с минимальными искажениями без ухудшения их спектральных, фазовых и шумовых характеристик [4]. Следует отметить, что сигнал эталонной частоты 5 МГц лучших современных стандартов частоты обладает большим динамическим диапазоном – относительный уровень спектральной плотности мощности его фазовых шумов -170 дБ/Гц лежит при отстройках от несущей больших 1 кГц вблизи уровня тепловых шумов -173 дБ/Гц. Поэтому для передачи эталонного сигнала по ВОЛС с сохранением его высоких метрологических характеристик необходимо минимально «компрессировать» сигнал, то есть, не повышать относительный уровень его фазовых шумов, как в процессе переноса эталонного радиочастотного сигнала на уровень оптической несущей и обратно, так и при его распространении на оптической несущей в волоконной линии. Поэтому исследование проблемы передачи сигналов эталонной частоты с точки зрения аналоговой фотоники – это первое необходимое звено в цепи научных задач по проблеме передачи эталонных радиочастот по ВОЛС.

Последовательные экспериментальные работы по передаче эталонных сигналов частоты по ВОЛС на расстояние от нескольких километров до нескольких десятков километров как без компенсации, так и с компенсацией, вносимых линией возмущений фазы передаваемого сигнала, начались после 2000 года. Первые же эксперименты по передаче эталонных сигналов по ВОЛС показали, что, не принимая специальных мер, нельзя передать эталонный сигнал по ВОЛС без потери высокого уровня его метрологических характеристик даже на расстояние в несколько километров. Исследователями JPL (NASA) в США в рамках проекта «Кассини» [9,10], а затем и в совместных работах сотрудников LPL+SYRTE во Франции [5,11,12] были реализованы программы исследований, завершившиеся экспериментами на ВОЛС длиной в 16 и 86 километров, по которым передавались сигналы эталонных радиочастот с компенсацией вносимых волоконной линией фазовых шумов. Достигнутая погрешность передачи эталонных частот 100 МГц и 1 ГГц в этих экспериментах была ниже уровня 10^{-17} на суточном интервале

Альманах современной метрологии, 2016, №8

усреднения. Французская группа из LPL+SYRTE проводит исследования по проблеме до сих пор, она последовательно на протяжении десяти лет вела исследования и провела эксперименты по передаче по ВОЛС эталонных частот радио, СВЧ и оптического диапазона [11,12,22-24].

Отметим, что исследователи из JPL проводили свои эксперименты на специально созданной 16-километровой волоконно-оптической линии на территории комплекса дальней космической связи NASA в Голдстоуне, а группа из LPL+SYRTE передавала сигналы на 86 километров по незадействованной, так называемой «темной» жиле телекоммуникационного кабеля в районе Парижа. Обе эти группы использовали метод активной оптоэлектронной компенсации возмущений, вносимых волоконной линией. Принцип работы такого метода компенсации представлен на рисунке 21 в разделе 2.2.3.

Из публикаций известно, что после выполнения исследований по передаче ЭСЧВ по ВОЛС исследователи из JPL провели модернизацию локальной сети доставки эталонных сигналов частоты и времени по территории комплексов дальней космической связи НАСА [9,10]. Была реализована доставка по волоконно-оптическим линиям опорных эталонных сигналов частоты и времени от водородного хранителя, установленного на этом комплексе, к рассредоточенным в пределах ~ 20 километров составным частям наземного комплекса дальней космической связи [25].

2.3.2. Об экспериментах по передаче ЭСЧВ по ВОЛС по методу Кихары

Исследования и эксперименты по передаче эталонных сигналов времени в составе телекоммуникационного потока по модифицированному методу Кихары [20,21] стали проводить в Японии, Швеции, Чехии и в других странах [26-27]. Наилучших результатов достигли группы исследователей Швеции и Чехии, так как они имели в своем распоряжении университетские и академические телекоммуникационные сети, в аппаратуру которых в узлах связи они могли вносить доработки и изменения при реализации своих экспериментов [27,28]. Уровень их лучших результатов подтвердил возможность передачи сигнала эталонного времени на расстояние до 500 км с погрешностью ~ 1 нс на суточном интервале усреднения, что соответствует точности передачи частоты ~ 10^{-14} на суточном интервале усреднения.

Исследования по передаче ЭСЧВ по ВОЛС по методу Кихары были выполнены в ООО «АЛТО» (С. Петербург). Эта российская организация, разрабатывающая телекоммуникационную аппаратуру, одна из первых в мире создала и предложила на рынке аппаратуру распределения сигналов времени (АРСВ) (см. рисунок 33а) по передаче сигналов времени с погрешностью, не превышающей 15 нс на расстояние ~ 40 км, разделяющее два соседних узла



Рис. 33а. Аппаратура APCB фирмы АЛТО (С.-Петербург) [29]

связи телекоммуникационной сети [29].

Дальность действия APCB ограничена, и точность передачи ЭСЧВ телекоммуникационной аппаратурой APCB недостаточна для выполнения метрологических сличений высокостабильных стандартов частоты. Были проведены исследования для оценки ее потенциальных возможностей в случае ее модернизации. Был выполнен совместный эксперимент АЛТО-ВНИИФТРИ по передаче сигнала 1 pps по методу Кихары с помощью модернизированной аппаратуры APCB по катушкам оптического волокна длиной 25 и 50 км при изменении их температуры в диапазоне от 0 до 60 градусов [30]. Эксперимент подтвердил потенциальную возможность передачи сигнала эталонного времени по выделенной ВОЛС на расстояние ~100 км с погрешностью 1-2 нс в случае усовершенствования аппаратуры APCB. Но последующий анализ содержания всех работ [26-28] и экспериментальный опыт, полученный в ходе выполнения работы [30], позволили сделать вывод о неперспективности направления работ по передаче эталонных сигналов в составе телекоммуникационного потока, если в распоряжении исследователей нет подконтрольной телекоммуникационной сети, аппаратуру которой они могут существенно дорабатывать.

Передача информационных потоков по телекоммуникационным каналам повсеместно ведется в одном направлении. Поэтому сигналы, которыми необходимо обмениваться при сличениях двух квантовых часов, проходят путь туда и обратно по различным волокнам оптического кабеля. При реализации метода Кихары [20,21] точность калибровки разности времен прохождения сигнала эталонного времени туда и обратно в телекоммуникационных каналах будет всегда ограничена тем, что дают спутниковые методы или

метод перевозимых квантовых часов. Кроме того, эта разность задержек сигнала туда и обратно после проведения калибровочных измерений может быть неконтролируемо изменена при автоматическом переходе на запасной канал или в процессе проведения телекоммуникационной компанией регламентных и ремонтных работ в узлах связи. Поэтому передача сигналов времени методом Кихары будет сопровождаться низкой достоверностью и неопределенностью результатов и погрешность передачи сигналов времени не может быть снижена в будущем. Погрешность же передачи эталонной частоты этим методом невысока – она соответствует той, которую получают при передаче по обычной выделенной волоконной линии без какой-либо компенсации.

Можно сделать вывод, что передачу сигналов точного времени на основе обмена информацией о моментах отправки и поступления меток времени на вход и конец линии необходимо проводить, используя одно из незадействованных «темных» волокон оптического кабеля телекоммуникационной сети либо выделенный оптический λ -канал в волокне. При передаче по выделенному λ -каналу или по «темному» волокну оптический сигнал, несущий информацию о времени и частоте, не подвергается преобразованию в промежуточных узлах связи с оптического уровня на «медный» и обратно. Каждое такое преобразование всегда приводит к дополнительной неопределенности задержек сигнала из-за изменений температуры электронных блоков в узлах связи и в итоге к ухудшению точности передачи ЭСЧВ по ВОЛС.

Использование выделенной линии или λ -канала дает преимущество, связанное с тем, что такой канал не требует калибровки разности времени прохождения сигнала туда и обратно, так как по λ -каналу можно реализовать передачу в две стороны. В выделенной линии сигнал проходит одинаковый путь туда и обратно по одному и тому же волокну, а потому разность задержек сигналов, распространяющихся по линии туда и обратно, практически близка к нулю. Эффективное разделение оптических сигналов, распространяющихся по выделенному λ -каналу туда и обратно и несущих информацию об эталонной частоте и времени, можно реализовать с помощью оптических циркуляторов, установленных на концах линии.

Метод Кихары передачи ЭСЧВ по ВОЛС – это разновидность обычного дуплексного способа сличений часов, который используется, например, в спутниковом дуплексном методе TWSTFT. Особенность метода Кихары в том, что он позволяет «вписать» в рамки существующих телекоммуникационных протоколов и передавать в составе информационного потока с небольшой скоростью метки моментов времени и необходимую для сличений часов информацию. При использовании специальной выделенной линии или λ -канала для передачи только лишь эталонных сигналов нет необходимости работать в ограничивающих рамках телекоммуникационных протоколов и

стандартного метода Кихары. Это дает еще одно преимущество - возможность увеличения скорости передачи и использования сложной помехозащищенной кодировки сигнала, подобной той, которая применяется в модемах TWSTFT. Таким путем можно повысить точность передачи ЭСЧВ. Ряд групп стали развивать это направление и проводить эксперименты по использованию спутниковых модемов TWSTFT, которые стали подключать к концам волоконной линии через электрооптические преобразователи – оптические трансмиттеры и ресиверы [31].

2.4. Теоретические оценки влияния вариаций температуры линии на погрешность передачи ЭСЧВ по ВОЛС

2.4.1. Факторы, определяющие погрешность передачи ЭСЧВ в коаксиальных и оптических кабелях длиной до 1 км

Для коаксиальных и волоконно-оптических кабелей важен фактор влияния температуры окружающей среды. При вариациях температуры изменяется длина линии передачи ЭСЧВ, а также показатель преломления n диэлектрического материала кабеля. Это приводит к вариации задержки сигнала в линии. В волоконно-оптической линии вариации задержки в основном определяются изменением геометрической длины линии, а влияние фактора температурного изменения показателя преломления волокна незначительно. В коаксиальных линиях более существенное влияние на величину задержки сигнала оказывает фактор температурного изменения показателя преломления диэлектрического материала кабеля. С ростом температуры длина коаксиального кабеля увеличивается, а показатель преломления падает, что приводит к противоположным знакам величины задержки сигнала. В специальных, так называемых фазостабильных коаксиальных кабелях, используется диэлектрический материал с температурным коэффициентом изменения показателя преломления таким, что он компенсирует линейное расширение длины кабеля. Это дает возможность более чем на порядок снизить температурный коэффициент задержки (ТКЗ) у фазостабильных коаксиальных кабелей.

Зависимость изменения от температуры задержки передаваемого сигнала в 30-метровых отрезках различных типов коаксиальных кабелей показана на рисунке 34 [38].

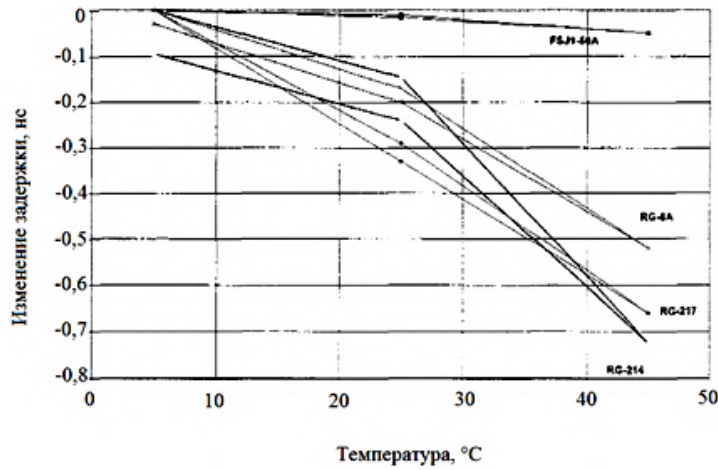


Рис. 34. Зависимость изменения от температуры задержки передаваемого сигнала в 30-метровых отрезках различных типов коаксиальных кабелей [38]

Из представленных на рис. 34 кабелей наименьшую величину изменения задержки от температуры имеет фазостабильный кабель FSJ1-50A. Его ТКЗ для километрового отрезка кабеля имеет величину, меньшую 30 пс/(км·°C).

Характеристики нескольких типов коаксиальных кабелей - затухания передаваемого сигнала в 30-метровом отрезке кабеля и температурного коэффициента задержки α_3 представлены в таблице 1 [38].

Таблица 1

Тип кабеля	RG-217	FSJ1-50A	RG-214	RG-8A	RG-58
Затухания в дБ для 30-метрового кабеля на 1575.42 МГц	7.5	7.5	14	11	16
Затухания в дБ для 30-метрового кабеля на 1226.6 МГц	6.5	6.75	12	9	14
α_3 пс/(км·°C)	540	30	540	450	420
Фактор скорости 1/n	0.66	0.84	0.66	0.66	0.66

Величина коэффициента α_3 и погонного затухания сигнала в различных типах оптического волокна, используемого в оптических кабелях, представлена в таблице 2 [15].

Таблица 2

Тип волокна	Длина волны, нм	Коэфф. α_3 , пс/(км·°С)	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

Следует отметить, что температурный коэффициент задержки сигнала в волокне для различных окон прозрачности волокна на длинах волн 1310 нм и 1550 нм практически одинаков.

В настоящее время разработаны также специальные типы фазостабильных оптических волокон, которые имеют на порядок меньший коэффициент α_3 , чем у стандартного волокна SMF-28. Физические принципы, лежащие в основе реализации такого нового типа волокна, изложены в разделе 2.4.6.

Следует отметить, что коаксиальные кабели имеют примерно на два порядка большее погонное затухание, чем волоконно-оптические кабели. Кроме того, погонное затухание коаксиальных кабелей значительно увеличивается по мере роста частоты передаваемого эталонного сигнала, что приводит к искажению фронта импульсного сигнала, несущего информацию об эталонном времени. Но в относительно коротких линиях роль фактора затухания сигнала в коаксиальных кабелях, а тем более в волоконно-оптических кабелях, не играет большой роли. Для линий длиной менее 1 км наиболее существенным является изменение оптической или электрической длины кабеля из-за непостоянства температуры окружающей среды.

2.4.2. Теоретические выражения, определяющие погрешность передачи ЭСЧВ в кабеле при вариациях температуры

На рисунке 35 представлена упрощенная схема передачи ЭСЧ или сигнала эталонного времени на удаленный конец ВОЛС без систем компенсации возмущений, вносимых линией. При передаче использована амплитудная модуляция оптической несущей сигналом эталонной радиочастоты, составляющей, например, 10 МГц, или импульсным сигналом эталонного времени с периодом в 1 с.

Промодулированная лазерная оптическая несущая, передающая информацию об эталонных радиочастоте или времени, распространяется не в вакууме, а последовательно в ряде материальных сред и устройств, возмущающих передаваемый сигнал и меняющих время его распространения. Основным фактором, возмущающим фазу эталонного сигнала, является температурная зависимость времени распространения сигнала в этих средах и ус-

тройствах. Изменение температуры окружающей среды оказывает влияние как на длину линии, так и на показатель преломления материала оптического волокна. При передаче сигнала на расстояние, превышающее 100 м, вариация задержки, а следовательно, и погрешность передачи будет в основном определяться линией [38].



Рис. 35. Упрощенная схема передачи ЭСЧВ по ВОЛС

Погрешность Δt передачи импульсного сигнала частотой 1 Гц в длинной линии, фронт которого несет информацию об эталонном времени, можно оценить как

$$\Delta t = \alpha_3 \Delta T L, \tag{1}$$

где α_3 – температурный коэффициент задержки сигнала в линии равный 38 пс/°С·км; ΔT – полная амплитуда (размах) температурной волны в градусах; L – длина оптической линии (кабеля) [38].

Изменение температуры окружающей среды вызывает фазовую модуляцию температурной волной передаваемого по оптической линии радиочастотного ЭС. Это приводит к снижению точности частоты сигнала, детектируемого фотоприемником на удаленном конце линии. Предположив, что температурная волна имеет синусоидальную форму, можно оценить среднее квадратическое двухвыборочное относительное отклонение (СКДО) результата измерений частоты на удаленном конце ВОЛС:

$$\sigma_y(\tau) = \Delta T \alpha_3 L \sin^2(\pi \tau \nu_0) / \tau, \tag{2}$$

где τ – время усреднения в секундах; ν_0 – частота температурной волны [38].

Погрешность передачи сигнала времени, как это следует из (1), пропорциональна длине и изменению температуры линии. Из (2) следует, что на интервалах усреднения, равных полупериоду температурной волны, погрешность передачи эталонной частоты имеет максимальное значение, пропорциональное длине линии и скорости изменения ее температуры. Отметим, что стандартные оптические волокна имеют близкий температурный коэффициент задержки $\alpha_3 \approx 38$ пс/(км·К) на длинах волн 1,31; 1,55 мкм, соответствующих окнам прозрачности волокна [8].

На основании (1), (2) можно получить следующие оценки. Из-за суточного изменения на 1°С температуры 100 км линии погрешность передачи эта-

лонной частоты будет примерно $1 \cdot 10^{-13}$, а погрешность передачи сигнала эталонного времени может достигать 4 нс. Сезонные изменения температуры оптических кабелей могут составлять несколько десятков градусов, следовательно, погрешность передачи эталонного времени в кабеле длиной 100 км может достигать сотен наносекунд. Без использования специальных систем компенсации возмущений, вносимых линией, передачу ЭСЧВ с приемлемым уровнем точности, который соответствует характеристикам современной эталонной базы, можно реализовать только в относительно коротких линиях длиной до нескольких сотен метров.

2.4.3. Результаты измерений вариаций температуры в местах прокладки подземных волоконно-оптических кабелей

Вызванные вариациями температуры изменения задержки распространения сигнала в оптическом кабеле длиной ~ 6 км, протянутом в подземном телекоммуникационном канале, представлены на рисунке 2 [15].

Данные, представленные на рис. 36, говорят о том, что изменения температуры воздуха над поверхностью земли в течение суток почти не проявляются в виде суточных «быстрых» изменений задержки в подземном кабеле, но медленный сезонный ход изменения температуры в течение двух месяцев отчетливо виден.

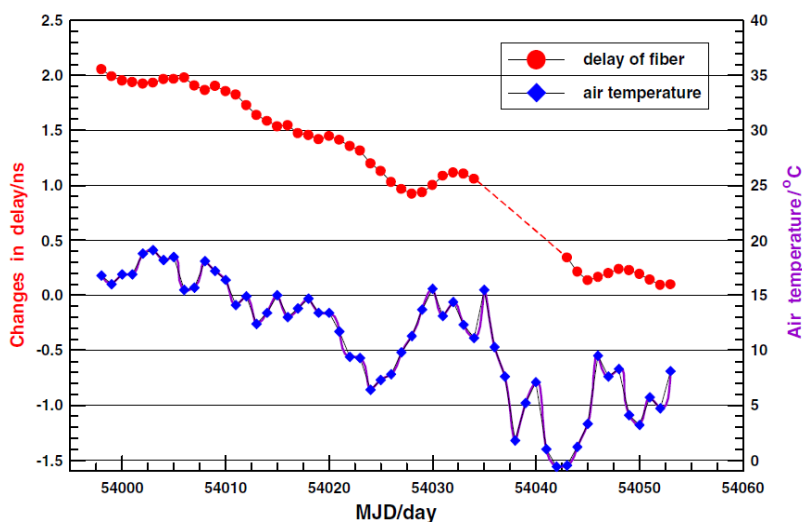


Рис. 36. Зависимость изменения задержки в нс распространения сигнала в оптоволокне (верхняя кривая) и изменение температуры воздуха в градусах $^{\circ}\text{C}$ (нижняя кривая) на протяжении ~ 60 дней [15]

На территории приемо-передающего комплекса дальней космической

связи NASA в Голдстоуне (Калифорния) были проведены исследования сезонного изменения температуры на различной глубине от поверхности земли [9,10].

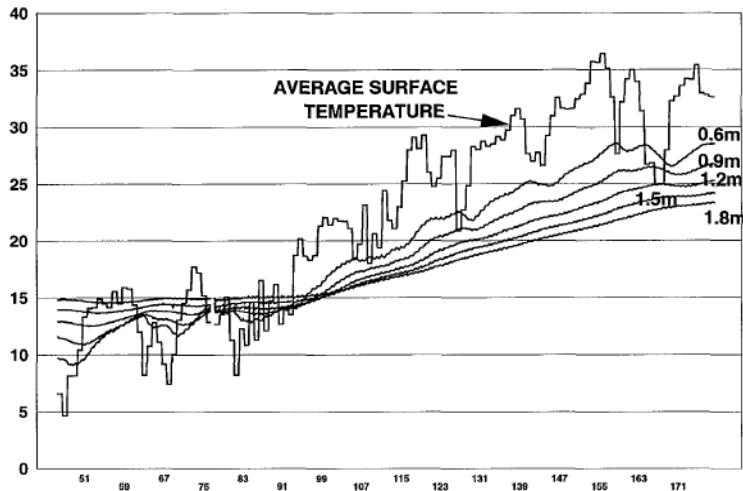


Рис. 37. Сезонное изменение температуры воздуха и температуры под землей на разной глубине на территории комплекса дальней космической связи в районе Голдстоуна (Калифорния) за ~180 дней [9,10]

Исследования позволили сделать вывод о том, что суточное изменение температуры воздуха также мало отражается на температуре под землей в независимости от глубины (см. рисунок 37). По данным других исследователей, суточные вариации температуры кабеля на глубине ~ 0,7 метра от поверхности земли обычно не превышают 0,5 °С [11].

Из данных, представленных на рисунке 37, следует, что изменение средней температуры воздуха в районе Голдстоуна на 30 °С за полгода привело к изменению температуры под землей на глубине 0,6 метра на ~20 °С, а на глубине 1,8 метра на ~ 8 °С. Следует отметить, что в Голдстоуне на территории комплекса NASA волоконные кабели, которые предназначены для передачи ЭСЧВ, разместили на глубине 1,5 метра.

Подобный же размах изменения температур ~20 °С на глубине 0,6 метра под землей в течение полугода характерен для московского региона и для российских широт в целом (см. рисунок 38) [18].

Результаты измерений, представленные на рисунках 36, 37 и 38, говорят о том, что поверхностный слой земли, обладающий большой теплоемкостью и относительно малой теплопроводностью, выполняет роль пассивного термостата, сглаживающего под землей изменения температуры над ее поверхностью.

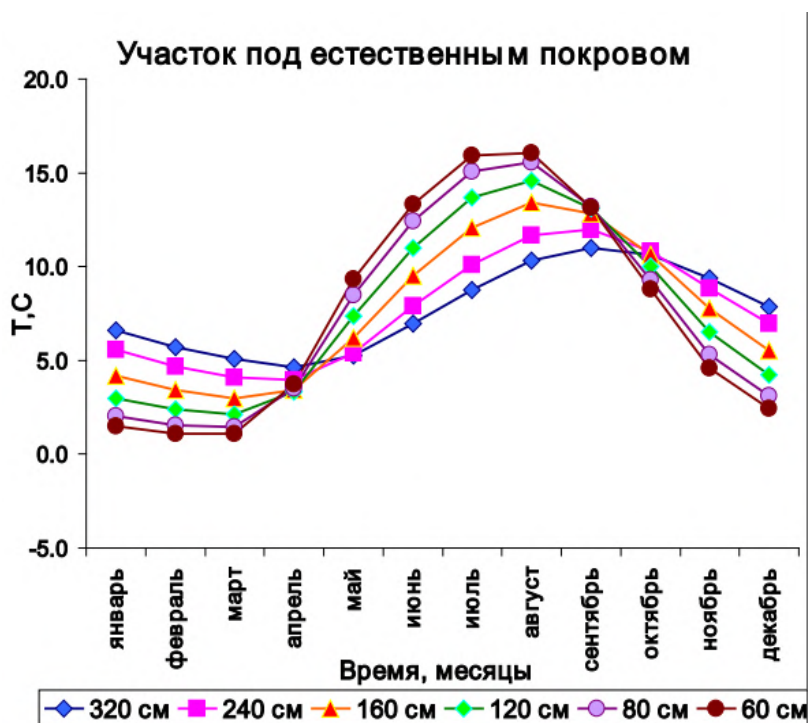


Рис. 38. Годовой ход температуры грунта на разных глубинах в московском регионе [18]

Из графика на рисунке 38 следует, что сезонное изменение температуры грунта на глубине 3,2 м составляет около 7 °С. Таким образом, даже при прокладывании ВОЛС на больших глубинах снижение сезонных колебаний температуры снижается только в несколько раз.

Снижение же суточных колебаний температуры в глубине грунта многократно больше в связи с тем, что тепловая волна с суточным циклом ослабляется с ростом глубины экспоненциально. При теплопроводности мокрого песка $7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ [19] характерная длина тепловой волны с суточным периодом составляет 0,25 м, то есть каждый полуметровый слой грунта должен ослаблять суточное колебание температуры воздуха над его поверхностью на порядок. Малая амплитуда температурной суточной волны у кабеля под землей дает возможность с помощью медленной петли обратной связи, в специально создаваемых системах передачи ЭСЧВ с активной компенсацией, эффективно компенсировать суточные вариации временной задержки эталонного сигнала даже в длинных 100 км ВОЛС.

Представленные результаты на рис. 36-38 позволяют сделать вывод о том, что необходимо стремиться прокладывать кабели для передачи ЭСЧВ под землей и избегать использования кабелей, протянутых между опорами

на открытом воздухе, так как в этом случае они будут подвергаться очень быстрому нагреву прямым солнечным излучением.

2.4.4. Сравнение физических характеристик коаксиальных и оптических кабелей

В таблице 3 приведены данные о коэффициенте ослабления и о температурной чувствительности задержки распространения сигнала в коаксиальных кабелях нескольких типов и в оптическом кабеле со стандартным волокном.

Таблица 3

Коэффициенты ослабления и температурной чувствительности задержки сигнала в коаксиальных и оптических кабелях

Тип кабеля	Температурный коэффициент задержки, пс/(км·К)	Погонное затухание в кабеле на частоте 100 МГц в дБ/км
Стандартный коаксиальный RG-217/U	540	50
Стандартный коаксиальный RG-214/U	540	70
Специальный фазостабильный коаксиальный кабель FSJ1-50A	30	55
Оптический со стандартным волокном SMF-28 на длине волны 1,55 мкм	38	0,2

Сравнение данных, приведенных в таблице 3, позволяет сделать следующие выводы:

1. Волоконно-оптический кабель имеет в двести-триста раз меньшее погонное затухание, чем стандартные коаксиальные кабели.
2. Стандартный оптический кабель имеет в 14 раз меньший коэффициент температурной вариации задержки по сравнению со стандартным коаксиальным кабелем.
3. Специальный дорогостоящий фазостабильный кабель FSJ1-50A имеет в 1,3 раза меньший коэффициент температурной вариации задержки, чем оптический кабель со стандартным волокном.
4. Переход от использования стандартных коаксиальных кабелей для доставки ЭСЧВ к применению для этих целей стандартных оптических кабелей позволяет при одинаковых прочих условиях более, чем на порядок, снизить

погрешность передачи ЭСЧВ. Такое снижение погрешности передачи по ВОЛС достигается даже без применения в передающей системе дополнительных устройств активной компенсации возмущений линии.

5. Если не используются устройства компенсации, то степень влияния температуры окружающей среды на точность передачи по оптическому кабелю сигнала эталонного времени определяется в основном длиной кабеля и амплитудой изменений его температуры.

Следует отметить, что наряду с достоинствами у метода передачи по ВОЛС эталонной радиочастоты есть недостаток. На интервалах усреднения меньших секунды кратковременная стабильность сигнала, получаемого на выходе волоконной линии, может быть хуже, чем на конце коаксиальной линии такой же длины.

2.4.5. Теоретические оценки погрешности передачи ЭСЧВ без использования систем компенсации в оптических и коаксиальных кабелях длиной 1 км

Как показано в разделах 2.4.1 - 2.4.3, проникающая к подземному кабелю медленная периодическая волна дневного повышения температуры приводит к модуляции фазы эталонного сигнала, получаемого на выходе из кабеля. Это приводит к ухудшению долговременной стабильности эталонного сигнала на выходе волоконно-оптического или коаксиального кабеля. В наибольшей степени это скажется на значении долговременной стабильности эталонного сигнала на интервалах усреднения, близких к значению полупериода температурной волны. Соответственно из-за суточной температурной волны нестабильность частоты сигнала на выходе из длинной линии будет дополнительно возрастать на интервале усреднения в половину суток.

Вариации суточных изменений температуры кабеля, размещенного в подземном канале на глубине ~0,7 метра, составляют около 0,5 градуса. Сезонные вариации (зима–лето) изменений температуры для подземного кабеля в таком же канале составляют ~20 градусов. Таким образом, на кабель в подземном канале воздействуют две температурные волны – быстрая с периодом в сутки, изменяющая температуру со скоростью до $\pm 0,5$ °C/сутки, и медленная сезонная с периодом в год, которая вызывает медленный дрейф температуры кабеля со среднесуточной скоростью до $\pm 0,15$ °C/сутки. Эти две волны оказывают влияние как на точность передачи сигнала эталонного времени, так и на точность передачи эталонной частоты. В таблице 4 на основании выражений (2) и (3) приведены теоретические оценки действия этих волн на погрешность передачи сигналов частоты и времени по коаксиальным и оптическим кабелям.

Таблица 4

Вид линии передачи: оптоволоконный или коаксиальный кабель в подземном канале	Температурный коэффициент задержки в кабеле α_3 , пс/(°С·км)	Величина вариации задержки сигнала на выходе 1 км кабеля в течение суток, пс	Величина вариации задержки сигнала на выходе 1 км кабеля в течение года, нс	Дисперсия Аллана для значения частоты на выходе 1 км кабеля на суточном интервале усреднения, связанная с изменением его температуры
Оптический кабель со стандартным волокном	38	≤ 20	$\leq 0,8$	$\sim 4 \cdot 10^{-16}$
Стандартный коаксиальный кабель RG-214	540	≤ 270	≤ 11	$\sim 6 \cdot 10^{-15}$
Специальный фазостабилизированный коаксиальный кабель FSJ1-50A	30	≤ 15	$\leq 0,6$	$\sim 3 \cdot 10^{-16}$

Хотя суточная волна имеет большую скорость изменения температуры, но ее влияние на погрешность передачи эталонной частоты эффективно усредняется на интервалах в несколько суток. Действие сезонной волны на передаваемую эталонную частоту менее значительно, но связанную с ней погрешность передачи эталонной частоты трудно усреднить из-за большого периода этой температурной волны.

Приведенная в таблице 4 теоретическая оценка дисперсии Аллана $\sim 4 \cdot 10^{-16}$ получаемой эталонной частоты на выходе 1 км оптического кабеля, которую можно получить на суточном интервале усреднения, соответствует полученным экспериментальным результатам $\sim 2 \cdot 10^{-16}$ (в пересчете для 1 км длины линии) наших измерений, представленным на рисунках 7 и экспериментальным данным, полученным исследователями из Франции, которые приведены на рисунке 8 [6].

2.4.6. Фазостабилизированное оптическое волокно

Влияние изменений температуры линии на точность передачи эталонных сигналов по оптоволокну может быть уменьшено, если использовать специальные волокна с малым температурным коэффициентом задержки [38].

Температурный коэффициент задержки α_3 волокна может быть рассчитан по формулам:

$$\alpha_3 = \frac{1}{c} [NqK + \frac{dNg}{dT} + \frac{dNg}{d\sigma} E_f(K - k_f)] , \tag{3}$$

$$K = \frac{A_f E_f k_f + A_j E_j k_j}{A_f E_f + A_j E_j}, \quad (4)$$

где c - скорость света в вакууме, $N_q = 1,4682$ - показатель преломления, T - температура, $\frac{dNg}{dT}$ - термооптический коэффициент, σ - напряжение в волокне, $\frac{dNg}{d\sigma} = -4,27 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ групповой коэффициент зависимости напряжения волокна, E_f, E_j - модуль Юнга, K, k_f, k_j - коэффициенты теплового расширения, A_f, A_j - площади поперечного сечения (индексы f и j относятся к волокну и оболочке соответственно) [40].

Волокно с малым температурным коэффициентом задержки представляет собой стандартное одномодовое волокно, которое покрыто слоем из специального жидкокристаллического полимера (LCP). Этот LCP материал имеет отрицательный коэффициент теплового расширения, что значительно снижает изменение задержки сигнала в оптическом волокне с таким покрытием при вариациях температуры. В сравнении с обычными оптическими кабелями со стандартным волокном, температурный коэффициент задержки α_3 которых находится в диапазоне от 40 до 130 пс/(°С·км), у волокна с LCP покрытием коэффициент задержки α_3 ниже, и он находится в пределах от 4 до 10 пс/(°С·км). В настоящее время ведутся работы по совершенствованию технологии изготовления новых типов оптических волокон с малым коэффициентом α_3 .

Волокно с жидкокристаллическим покрытием имеет высокую стоимость, она составляет десятки долларов за метр. Ранее такое волокно изготавливала только японская фирма Furukawa [41]. Но в 2012 году появились сообщения фирмы Linden Photonics (Германия) [42] о том, что ею отработана технология изготовления фазостабильного волокна с жидкокристаллическим покрытием и в результате цена его была снижена в несколько раз, став экономически приемлемой для линий длиной до одного километра.

Группой независимых исследователей были проведены расчеты в соответствии с (4), а также экспериментально измерены температурные коэффициенты задержки различных типов оптических кабелей - специальных, использующих волокно с жидкокристаллическим покрытием, и стандартных [40]. Внутренняя структура этих оптических кабелей представлена на рисунках 40 и 41. В специальных кабелях использовалось фазостабильное волокно с жидкокристаллическим покрытием Linden Photonics и Furukawa.

Полученные результаты расчетов и измерений представлены в таблице 5, где можно увидеть оценку величины среднего значения температурного коэффициента задержки оптических кабелей. Результаты измерений подтвердили, что температурный коэффициент задержки α_3 фазостабильных кабелей на основе оптического волокна, покрытого жидкокристаллическим полиме-

ром, лежит в пределах от +3,7 до -12 пс/(°С·км).

Результаты измерений также показали, что широко используемый для изготовления оптических патч-кордов 3-мм полужесткий оптический кабель со стандартным оптическим волокном имеет $\alpha_3 \sim 130$ пс/(°С·км), что в три раза больше, чем α_3 используемого в данном кабеле стандартного 250 мкм волокна с плотной оболочкой. Это можно объяснить тем, что в кабеле оболочечные покрытия из полиолефина и арамидных нитей, имеющие большой коэффициент линейного расширения, плотно прилегают к жиле оптического волокна и тем самым приводят к увеличению α_3 кабеля.

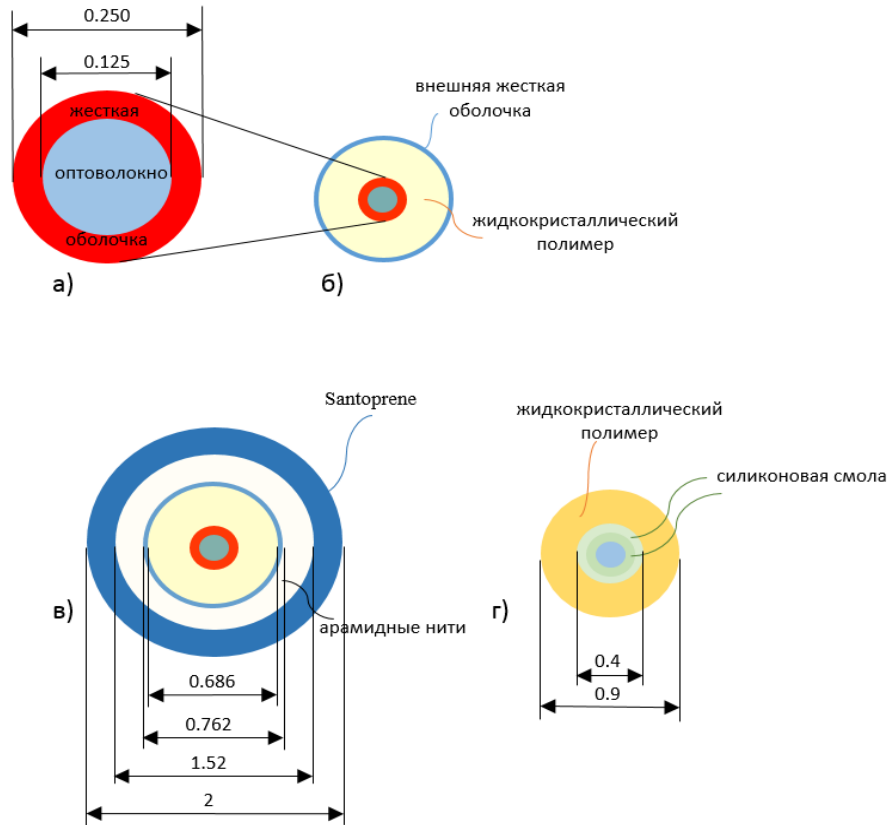


Рис. 39. Исследованные типы специальных кабелей (б, в и г) с жилой из оптического одномодового волокна, покрытого жидкокристаллическим полимером [40]: а) стандартное 250 мкм волокно с плотной оболочкой, б) STFOC фирмы Linden Photonics, в) Non-Kink STFOC фирмы Linden Photonics, г) PSOF фирмы Furukawa

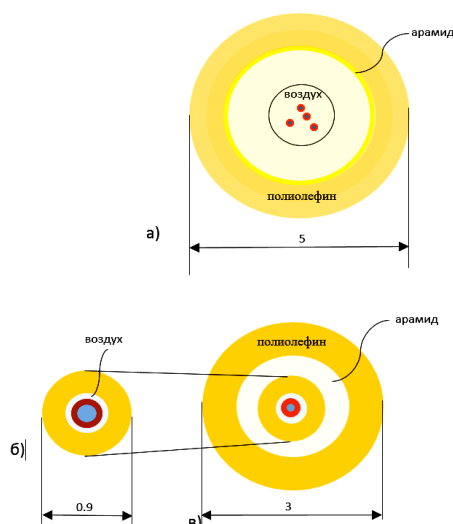


Рис. 40. Исследованные стандартные типы кабелей [40]: а) модульной конструкции (волокно в свободной общей трубке), б) 900 мкм полужесткий, в) 3 мм полужесткий

Таблица 5

Средняя оценка величины α_3 в диапазоне температур оптического кабеля от 5 °С до 45 °С		
Тип кабеля	α_3 пс/(°С·км)	
	Результат измерений	Расчет
Стандартное 250 мкм волокно с плотной прилегающей оболочкой	37,5	33,4 – 42,7
STFOC	5,6	11,1
Non-Kink STFOC	-12,3	11,1
PSOF	3,7	< 5,0
Кабель модульной конструкции	42,6	33,4 – 42,7
900 мкм полужесткий кабель	53,9	> 33,4
3 мм полужесткий кабель	128,3	> 33,4

Из данных таблицы 5 следует, что у фазостабильного Non-Kink STFOC кабеля α_3 отрицателен, а у фазостабильного STFOC положителен. Если вдоль всей линии температура изменяется одинаково, то выполнив линию частично из STFOC и частично из Non-Kink STFOC кабелей, можно получить коэффициент α_3 линии близкий к нулю. Поэтому наиболее перспектив-

ным вариантом компенсации температурных изменений линии представляется комбинирование полной длины линии из Non-Kink STFOC и STFOC кабелей.

2.4.7. Перспективы пассивной компенсации возмущений, вносимых линией, на основе использования фазостабильного волокна

Целый ряд систем и устройств, использующих или передающих сигналы, несущие информацию об эталонном времени и частоте, обычно рассредоточены в пределах порядка километра по территории, прилегающей к зданию, в котором размещен собственно сам эталон. Поэтому для передачи сигналов от эталона к таким системам необходимо создавать специальную внутриобъектовую кабельную сеть и аппаратуру, которая может обеспечить доставку ЭСЧВ с минимальной погрешностью.

Представленные выше данные и теоретические расчеты позволяют оценить погрешности, которые могут вносить применяемые в такой сети коаксиальные или оптические кабели, когда при передаче ЭСЧВ не используются электронные системы активной компенсации вносимых линией возмущений. Основным фактором, который оказывает влияние на точность передачи ЭСЧВ в относительно коротких линиях длиной до 1 км является вариация задержки эталонного сигнала в кабеле из-за изменения температуры окружающей среды. Для снижения погрешности передачи ЭСЧВ необходимо использовать кабели с малым температурным коэффициентом задержки сигнала.

При передаче высокостабильных эталонных сигналов частоты и времени на расстояния даже в несколько десятков метров необходимо использовать фазостабильные радиочастотные коаксиальные кабели либо оптические кабели. Температурные коэффициенты задержки фазостабильного радиочастотного кабеля ~ 30 пс/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{км}$) и оптического кабеля на основе стандартного волокна SMF-28 ~ 40 пс/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{км}$) примерно одинаковы.

Особые преимущества может дать применение в сетях передачи ЭСЧВ фазостабильных оптических кабелей, в которых используется покрытое жидкокристаллическим полимером оптическое волокно. Температурный коэффициент задержки фазостабильного оптического кабеля в несколько раз меньше, чем у фазостабильного радиочастотного кабеля, он лежит в пределах от 4 до 10 пс/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{км}$). Следует ожидать, что в связи со снижением стоимости волокна с жидкокристаллическим покрытием будут разработаны внутриобъектовые фазостабильные оптические кабели, которые можно будет протягивать в подземных телекоммуникационных каналах.

Внутриобъектовые фазостабильные оптические кабели найдут широкое применение в сетях передачи эталонных сигналов на расстояние порядка одного-двух километров от места установки эталона частоты и времени. *Ис-*

пользование фазостабильных оптических кабелей позволит передавать на такое расстояние эталонные сигналы современных эталонов без использования специальных сложных систем активной компенсации возмущений, вносимых волоконной линией. При этом эталонный сигнал, переданный на удаленный конец фазостабильного кабеля, будет воспроизводиться с минимальной погрешностью.

Результаты, представленные в настоящей работе, говорят о том, что, используя протянутый под землей специальный фазостабильный оптический кабель, можно реализовать без специальных активных систем компенсации непрерывную круглогодичную передачу по территории объекта на расстояние в 1 км сигнала эталонного времени с суммарной погрешностью (случайной и систематической), не превышающей 100 пс и сигнала эталонной частоты с относительной погрешностью (СКДО), не превышающей $5 \cdot 10^{-17}$ на суточном интервале усреднения.

3. Заключение

В представленной работе были рассмотрены методы передачи ЭСЧВ по ВОЛС. Дан краткий анализ зарубежных и отечественных исследований по использованию волоконно-оптических линий связи для передачи по ним эталонных радиочастотных сигналов с наивысшими метрологическими характеристиками.

В работе последовательно изложены принцип и методы передачи на оптической несущей эталонных радиочастотных сигналов по ВОЛС, как без устройств активной компенсации вносимых линией возмущений, так и с их применением. Описаны схемы, использующие различные методы и устройства активной компенсации вносимых линией возмущений, и объяснен принцип их работы.

Рассмотрены также теоретические вопросы, связанные с передачей ЭСЧВ по коротким коаксиальным или оптическим кабелям в пределах территории ГЭВЧ или, например, наземного объекта системы ГЛОНАСС. В качестве рабочего эталона частоты и времени на наземных объектах системы ГЛОНАСС используются активные водородные генераторы. От этой группы необходимо доставлять по кабелям высокостабильные эталонные сигналы к различным, размещенным на объекте, потребителям сигналов. Потребители могут быть расположены на удалении от нескольких десятков метров до нескольких сотен метров от рабочего эталона. Получены теоретические оценки точности передачи ЭСЧВ по коротким коаксиальным и оптическим линиям, когда не используются устройства активной компенсации. Эти оценки могут быть полезны для выбора оптимального способа передачи ЭСЧВ по территории объекта, а также для определения типа кабеля и условий его

прокладки на объекте.

Проведено сравнение физических характеристик коаксиальных и оптических кабелей, которые влияют на погрешность передачи ЭСЧВ. Дано объяснение определяющей роли фактора вариаций температуры оптического кабеля на погрешность передачи ЭСЧВ по этому кабелю.

Получены теоретические оценки влияния фактора сезонных и суточных вариаций температуры на погрешность передачи ЭСЧВ по оптическим и коаксиальным кабелям.

В работе также приведены полученные во ВНИИФТРИ результаты экспериментальных исследований по оценке точности передачи эталонного сигнала 100 МГц по 100-километровой ВОЛС при использовании систем электронной и оптоэлектронной компенсации вносимых линией возмущений фазы передаваемого эталонного сигнала.

Литература

1. C.Vian et al. BNM-SYRTE fountains: recent results. Instr. and Meas.// IEEE Trans/ on v. 54, p. 833, 2005.
 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. L.Lorini et al. Recent atomic clock comparisons at NIST. Eur.Phys.// J. Special Topics, v. 163, p.19. 2008.
 4. Charles H. Cox, III. Analog optical links. Theory and Practice. Cambridge University Press 2004. isbn-13 978-0-511-19562-4.
 5. Федорова Д.М., Балаев Р.И., Курчанов А.Ф., Троян В.И., Малимон А.Н. Передача эталонных радиочастот по волоконно-оптической линии с электронной компенсацией возмущений // Измерительная техника, 2015, № 9, с. 34-37.
- 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.- Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», с. 75.
- Гальшев 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-го Международ. симп. «Метрология времени и пространства», 17–19 сент.- Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2012. с. 88–93.

6. Lopez O., Amy-Klein A., Daussy C., Chardonnet C., Narbonneau F., Lours M. and G.Santarelli.// *The European Physical Journal D*, v.48, 2008, p.35-41.
7. Малимон А.Н., Гальшев 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.- Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», с. 70.
8. Гальшев А.А., Каган С.Н., Малимон А.Н., Пальчиков В.Г., Шibaева 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.- Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2012, с. 88.
9. Calhoun M., Wang R., Kirk A., Diener W., Dick J., and 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. <http://tycho.usno.navy.mil/ptti/ptti2000/paper25.pdf> .
10. 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*. <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/40275/1/06-2522.pdf>.
11. Lopez O., Amy-Klein A., Lours M., Chardonnet C. and Santarelli G. High-resolution microwave frequency dissemination on an 86-km urban optical link. arXiv.org.
12. Daussy C., Lopez O., Amy-Klein A., Goncharov A., Guinet M., Chardonnet C., Narbonneau F., Lours M., Chamon D., Bize S., Clairon A., Santarelli G., Tobar M.E. and Luiten A.N. Long-distance frequency dissemination with a resolution of 10^{-17} .// *Phys. Rev. Lett.*, 94, 203904, 2005.
13. Calhoun M., Sydnor R. and Diener W.// *The Interplanetary Network Progress Report*, IPN PR 42-148, p. 1-11, 2001.
14. Krehlik P., Sliwczynski L., Buczek L. and Lipinski M. Fiber-optic joint time and frequency transfer with active stabilization of propagation delay// *IEEE Transaction and Measurement*, v. 61, №. 10, October 2012, p. 2845–2851.
15. Sliwczynski L., Krehlik P., Czubla A., Buczek L. and Lipinski M. Dissemination of time and RF frequency via a stabilized fibre optic link over a distance of 420 km// *Metrologia*, v.50, 2013, p.133.
16. Wang B., Gao C., Chen W.L., Miao J., Zhu X., Bai Y., Zhang J.W., Feng Y.Y., Li T.C., Wang L.J. Precise and continuous time and frequency synchronisation at the $5 \cdot 10^{-19}$ accuracy level.- *Scientific reports* 2012;2:556. doi: 10.1038/srep00556. Epub Aug 6, 2012. www.nature.com/scientificreports.
17. Sliwczynski L., Krehlik P. and Lipinski M. Optical fibers in time and frequency transfer// *Measurement Science and Technology*, 21. 2010 (075302), p.1.

18. Корнева И.А., Локощенко М.А. Многолетние изменения температуры грунта на разных глубинах в Москве/ 16-я Международная конф. молодых ученых «САТЭП –2012»./ Тезисы. 28 мая – 1 июня 2012 г., Звенигород, стр.93.
www.ifaran.ru/science/conferences.satep2012/ presentations/ 29_05/Korneva.pdf.
19. Житомирский И.С. Температурный скин-слой земной коры и вечная мерзлота. http://is-zhitomirsky.narod.ru/R_Temperature_Skin_Layer.htm
20. Kihara M. and Imaoka A. SDH-based time and frequency transfer system, in Proc. 9th EFTF, Besancon, France, 1995, p.317-322.
21. Hisadome K., Kihara M. Gigabit Ethernet-Based Time Transfer System, Electrical Engineering in Japan, 2007, v. 160, № 3.
22. Lopez Olivier, Haboucha Adil, Kéfélian Fabien, Jiang Haifeng, Chanteau Bruno, Roncin Vincent, Christian Chardonnet, Amy-Klein Anne and Santarelli Giorgio. Cascaded multiplexed optical link on a telecommunication network for frequency dissemination// 2010, OPTICS EXPRESS ,v. 18, № 16.
23. Lopez Olivier, Haboucha Adil, Chanteau Bruno, Chardonnet Christian, Amy-Klein Anne and Santarelli Giorgio. Ultra-stable long distance optical frequency distribution using the Internet fiber network, arXiv.org. 2012.
24. Lopez Olivier, Kanj Amale, Pottie Paul-Eric, Rovera Daniele, Achkar Joseph, Chardonnet Christian, Amy-Klein Anne and Santarelli Giorgio. Simultaneous remote transfer of accurate timing and optical frequency over a public fiber network. arXiv.org. 2012.
25. Lauf J., Calhoun M., Kuhnle P.F., Sydnor R.L. and Tjoelker R.L.. Master clock and time distribution system for the NASA deep space network/ 35th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, 2003, p.371.
26. Ebenhag S.C., Jaldenhag K., Jarlemark P., Hedekvist P.O., Emardson R., Lothberg P. Time Transfer Using an Asynchronous Computer Network: Results from a 500 km Baseline Experiment/ Proc.38th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, 2007, p. 477.
27. Ebenhag S.Ch., Jarlemmak K., Emardson R., Hedekvist P.O., Jardehag P., Lothberg P. Time Transfer over a 560 km fiber link, presented at the 22nd European Frequency Time Forum, Toulouse France, p. 130, 2008.
28. Smotlacha V. and Kuna A. and Mache W. Time Transfer In Optical Network, in Proceedings of the PTTI, 2010.
29. Иванов А.В., Моховиков Н.В. и др. Аппаратура распределения сигналов времени (АРСВ). Технические условия ИФПМ.465275.020 ТУ.
<http://www.alto-spb.ru/index.html?http://www.alto-spb.ru/arsv.html>
30. Иванов А.В., 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, вып. 23, 2012, с.131-135.

31. 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.
32. Ma L.S., Jungner P., Ye J. and Hall J.L.// *Optics Letters*, v. 19, №21, 1994., p. 1777-1779.
33. Hanssen J.L. Time Service Dept., US Naval Obs., Washington, DC, USA; Crane S.G.; Ekstrom C.R. One-way two-color fiber link for frequency transfer. Frequency Control Symposium (FCS), 2012, IEEE International.
34. Hedekvist P.O. and Ebenhag S.C. Time and Frequency Transfer in Optical Fibers. Recent Progress in Optical Fiber Research, Dr Moh. Yasin (Ed.) p.371-386.
ISBN: 978-953-307-823-6, InTech, www.intechopen.com
35. Grosche G., Terra O., Predehl K., Hozwarth R., Lipphart B., Vogt F., Sterr U. and Schantz H. Optical frequency transfer via 146 km fiber link with 10^{-19} relative accuracy. arXiv.org. 2007.
36. Predehl K., Grosche G., Raupach S.M.F., Droste S., Terra O., Aintis J., Legero Th., Hansch T.W., Udem Th., Hozwarth R. and Schantz H. A 920-Kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place. *Science*, v. 336, 2012. www.scincemag.org
37. Fujieda M., Kumagai M., Nagano S., Gotoh T. UTC (NICT) signal transfer system using optical fiber / Proc. of the 9th NICT IVS TDS Symp, 2010, № 31, p. 17–20. [Электрон. ресурс]
http://www2.nict.go.jp/aeri/sts/stmg/ivstdc/news_31/pdf/tdcnews_31.pdf
(дата обращения 01.01.2015).
38. Powers Edward, Wheeler Paul, Judge David, Matsakis Demetrios. Hardware delay measurements and sensitivities in carrier phase time transfer/ Proceedings of 30th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting. 1998, p. 293.
39. Балаев Р. И., Шибяева 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, Менделеево: ВНИИФТРИ, 2015, № 2, с. 165–179.
40. Bousonville M., Bock M.K., Felber M., Ladwig T., Lamb T., Schlarb H., Schulz S., Sydlo C., Hunziker S., Kownacki P., Jablonski S. New phase stable optical Fiber. Proceedings of BIW2012, Newport News, VA USA. (MOPG033), 2012, p. 101-103.
41. Furukawa electric. Phased Stabilized Optical Fiber Cable (PSOF).
www.specialtyphotonics.com/images/pdf/brochures/PSOF%20Brochure.pdf
42. Linden Photonics, Inc. Phase Stabilized STFOC.
www.lindenphotonics.com/documents/2013/Phase%20Stabilized%20STFOC.pdf

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ВОЛС	волоконно-оптическая линия связи
1 pps	импульсный сигнал времени с частотой следования 1 Гц
ГЭВЧ	Государственный эталон времени и частоты
ГСВЧ	Государственная служба времени и частоты
ГЛОНАСС	Глобальная навигационная спутниковая система
GPS	Глобальная навигационная система США
DFB диод	полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью
ЕЛЗ	управляемая электронная линия задержки
или ODL	
EFTF	Европейский форум по времени и частоте
JPL NASA	Лаборатория реактивного движения NASA
LPL	Лаборатория по лазерной физике Франции
LNE-SYRTE	Парижская обсерватория
DLL	петля обратной связи, стабилизирующая время задержки сигнала
PLL	ФАПЧ - петля обратной связи фазовой автоподстройки частоты
NASA	Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства
VCXO	управляемый по частоте кварцевый генератор
СКДО	среднеквадратическое двухвыборочное отклонение частоты

СКДО	среднеквадратическое двухвыборочное отклонение частоты
TWSTFT	спутниковый дуплексный метод сличений времени и частоты
PMD	поляризационно-модовая дисперсия
TSS	тактовая сетевая синхронизация
ЭСЧ	эталонный сигнал частоты
ЭСЧВ	эталонные сигналы частоты и времени
ЦС	центральный синхронизатор ГЛОНАСС