УДК 006.924.4 КОМПЛЕКС СРЕДСТВ ДЛЯ СРАВНЕНИЯ ПО ВОЛС ШКАЛ ВРЕМЕНИ ЭТАЛОНОВ И ПЕРЕДАЧИ ЭТАЛОННЫХ РАДИОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ О.В. Колмогоров, А.Н. Щипунов, Д.В. Прохоров, С.С. Донченко, С.Г. Буев, А.Н. Малимон, Р.И. Балаев, Д.М. Федорова

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл. nio8@vniiftri.ru

Предложены варианты построения систем, предназначенных для сравнения шкал времени удаленных эталонов и передачи эталонных сигналов частоты по ВОЛС различной длины. Описан принцип действия составных частей комплекса средств передачи эталонных радиочастотных сигналов и сравнений шкал времени. Приведен расчет погрешности измерений расхождения шкал времени удаленных эталонов, выполненных с помощью предложенных средств. Представлены результаты экспериментальных исследований составных частей комплекса при передаче эталонных сигналов на расстояние до 200 км.

Variants of construction of systems intended for comparison of time scales of remote standards and transmission of reference RF signals over fiber-optic lines of different lengths are proposed. The principle of operation of the parts of the complex of equipment for comparing of time scales of standards and for stable RF transfer over optical fiber is described. The calculation of the error in measuring the divergence of the time scales of remote standards performed with the help of the proposed equipment is given. The results of experimental investigations of the components of the complex in the transmission of reference signals over a distance of up to 200 km are presented.

Ключевые слова: передача сигналов эталонной частоты по волоконнооптическим линиям; сравнение шкал времени удаленных эталонов

Введение

Задачу передачи эталонных сигналов времени и частоты требуется решать при сличении территориально удаленных эталонов единиц времени, частоты и шкалы времени различных метрологических лабораторий, при обеспечении эталонными сигналами систем различного назначения, в том числе, навигационных систем, систем связи, систем управления, измерительных средств и др. Для достижения глобальной навигационной системой ГЛОНАСС заданных точностных характеристик также необходима высокоточная передача эталонных сигналов.

Проведение сличений территориально удаленных эталонов и обеспечение эталонными сигналами частоты и времени (ЭСЧВ) измерительных средств, распределенных по территории объектов наземного комплекса (НК) глобальной навигационной системы (ГНС) ГЛОНАСС, требует передачи эталонных сигналов и шкалы времени (ШВ) на расстояние от единиц до сотен километров. Так, например, для функционирования измерительных средств, находящихся на объекте НК ГНС ГЛОНАСС, необходимо передавать к ним ЭСЧВ от рабочего эталона, установленного на объекте, на расстояние до нескольких километров.

Для оценки характеристик беззапросных и запросных измерительных средств, находящихся на объектах НК ГЛОНАСС, используется специализированный комплекс метрологического обеспечения [1]. Для функционирования этого комплекса необходима высокоточная синхронизация его ШВ с Государственным первичным эталоном единиц времени, частоты и национальной шкалы координированного времени UTC (SU) [2].

Важным средством фундаментального обеспечения ГЛОНАСС являются квантово-оптические станции (КОС) - высокоточные лазерные дальномерные системы. Они обеспечивают решение целевых задач в части уточнения фундаментальных астрономо-геодезических параметров, достижения требуемой точности привязки Государственной геоцентрической системы координат (ГГСК) к центру масс Земли, высокоточного определения параметров связи ГГСК с Международной общеземной системой координат, а также прецизионного согласования шкал времени ГЛОНАСС с ШВ Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени. Для обеспечения требуемой точности измерений каждая КОС оснащается стандартом частоты, который выполняет роль хранителя местной шкалы времени. Для решения задач контроля ШВ космических аппаратов ГЛОНАСС местные шкалы времени КОС должны быть максимально точно синхронизированы с национальной шкалой координированного времени UTC (SU) или со ШВ центрального синхронизатора ГЛОНАСС.

Совершенствование измерительных средств ГЛОНАСС выдвигает новые требования к системам передачи ЭСЧВ на объектах. В современных эталонах в качестве источников стабильной частоты и хранителей шкалы времени используются водородные активные стандарты частоты нового поколения, которые имеют более высокую точность. Нестабильность их частоты находится на уровне $3 \cdot 10^{-16}$ на суточных интервалах усреднения [3], поэтому системы передачи ЭСЧВ должны вносить погрешность ниже этого уровня.

Современные требования к системам передачи шкал времени эталонов предусматривают инструментальную погрешность не более 100 пс. Передача эталонных сигналов времени на расстояние свыше 100 м по коаксиальному кабелю не удовлетворяет такому требованию из-за вариаций задержки передаваемых ЭСЧВ вследствие изменений температуры окружающей среды в местах прокладки кабеля и значительного ослабления сигнала [4]. Наибольшую точность передачи эталонных сигналов на указанные расстояния могут обеспечить системы, передающие ЭСЧВ по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС), но при длине ВОЛС более нескольких

километров такие системы должны дополняться устройствами компенсации вносимых волоконной линией возмущений фазы передаваемого сигнала [5-8].

К настоящему времени опубликован ряд работ, посвященных исследованиям в области передачи по ВОЛС эталонных сигналов частоты и времени, например, [9-10], однако в этих работах основное внимание уделяется сличению удаленных эталонов метрологических центров и научноисследовательских лабораторий, и не рассматриваются вопросы создания систем, обеспечивающих передачу ЭСЧВ от эталонов к потребителям (измерительным средствам и комплексам) по внутриобъектовым ВОЛС.

Если на объекте имеется стандарт частоты, формирующий местную ШВ, то передача эталонных сигналов времени возможна путем сравнения местной ШВ со шкалой удаленного эталона с использованием оптического кабеля. При этом не происходит физической передачи эталонных сигналов времени по оптическому кабелю, но информация о рассогласовании шкал времени позволяет синхронизировать местную шкалу времени с эталонной, что эквивалентно передаче эталонного сигнала времени. Ниже описаны системы, реализующие такой алгоритм передачи.

Если на объекте имеется стандарт частоты, формирующий местную ШВ, то синхронизировать её со ШВ удаленного эталона можно, передавая по ВОЛС сигналы от вспомогательного генератора и фиксируя моменты их отправки и поступления в местной и эталонной шкалах времени. При этом не происходит непосредственной передачи сигналов времени эталонов, но информация о рассогласовании шкал позволяет синхронизировать местную ШВ с эталонной ШВ, что эквивалентно передаче эталонного сигнала времени. Ниже описаны системы, реализующие такой алгоритм передачи.

1. Система передачи ЭСЧВ с однонаправленной передачей сигнала эталонной частоты по ВОЛС без компенсации возмущений, вносимых линией

Для решения задачи передачи эталонных сигналов к средствам наземного комплекса (НК) ГЛОНАСС посредством объектовых ВОЛС предложена система передачи эталонных сигналов частоты и времени (СП ЭСЧВ), функциональная схема которой представлена на рис.1.



Рис. 1. Функциональная схема системы СП ЭСЧВ, в которой для передачи по ВОЛС эталонной частоты используется однонаправленная система ОНПЭЧ

ИСЧВ – источник эталонных сигналов частоты и времени, установленный в пункте 1;

1 PPS ШВ1 и 1 PPS ШВ2 – сигналы секундных меток шкал времени пунктов 1 и 2;

ОНПЭЧ – система однонаправленной передачи сигнала эталонной частоты;

ПЭОМ – передающий электронно-оптический модуль;

ПОЭМ – приемный оптико-электронный модуль;

ПГ – промежуточный перестраиваемый генератор;

УР – комплект аппаратуры для усиления и распределения сигналов секундных меток и опорных частот;

СОДС ШВ – система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени;

ТС1 и ТС2 – таймеры событий;

ФПУ1 и ФПУ2 – фотоприемные устройства;

РР – ретрорефлектор;

ПК1 и ПК2 – персональные компьютеры;

ИК – информационный канал передачи данных;

ВГИ – вспомогательный генератор импульсов;

ЛПМ – лазерный передающий модуль;

БРО – блок разветвителей-объединителей.

Альманах современной метрологии, 2017, № 11

СП ЭСЧВ включает в себя две основные части: систему ОНПЭЧ - однонаправленной передачи эталонного сигнала частотой 5 МГц от эталонного источника ИСЧВ (водородного хранителя) по одной из жил волоконнооптического кабеля и систему одно- и двухсторонних сравнений шкал времени (СОДС ШВ), предложенную в [11, 12], и использующую другую жилу волоконно-оптического кабеля. Показанные слева на схеме устройства и блоки размещаются в пункте 1 объекта, рядом с эталонным источником. Часть устройств, обозначенных справа на схеме, размещается в пункте 2, где находится измерительное средство из состава НК ГЛОНАСС. Пункты 1 и 2 соединены оптическим кабелем.

Принцип действия СП ЭСЧВ следующий. С ИСЧВ опорный эталонный сигнал частоты (ЭСЧ) поступает на передающий электронно-оптический модуль, который модулирует оптическую несущую эталонным радиосигналом 5 МГц. Оптическая несущая распространяется по ВОЛС до пункта 2 на объекте, к которому надо доставить сигнал, и там преобразуется с помощью приемного оптико-электронного модуля обратно в радиосигнал опорной частоты. Переданный по ВОЛС сигнал опорной частоты подается на промежуточный перестраиваемый генератор ПГ (генератор серии HROG), который формирует секундные метки времени и управляет их фазой, а также формирует синусоидальный выходной сигнал 5 МГц с регулируемой отстройкой его частоты. С выхода ПГ сигнал 5 МГц подается для усиления и распределения сигналов секундных меток и опорных частот на комплект аппаратуры УР, который формирует и распределяет сигналы 5, 10, 100 МГц и сигнал времени 1 PPS для находящихся в пункте 2 устройств из состава измерительных средств НК ГЛОНАСС. Система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени СОДС ШВ определяет расхождение эталонной шкалы времени ИСЧВ, формируемой в пункте 1, и шкалы времени, формируемой с помощью генератора HROG в пункте 2. На основе полученных данных система вырабатывает управляющий сигнал, который корректирует положение сигнала 1PPS на выходе ПГ HROG для устранения рассогласования ШВ пункта 2 относительно эталонной ШВ, формируемой ИСЧВ в пункте 1.

Изменения температуры окружающей среды оказывают влияние на оптическую линию и приводят к вариациям задержки фазы передаваемого радиосигнала. Температурный коэффициент задержки сигнала в волоконной жиле оптического кабеля составляет 40 пс/°С км [4]. На точность передачи фазы ЭСЧ оказывает влияние также ряд присущих оптическому волокну физических факторов: поляризационная модовая дисперсия, хроматическая дисперсия и вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна. Но при передаче сигналов в коротких ВОЛС длиной до нескольких километров основным фактором, определяющим погрешность передачи ЭСЧ, является нестабильность температуры окружающей среды (амплитуда колебаний температуры и скорость её изменения). Влияние этого фактора при передаче эталонных сигналов на расстояние до 5 км теоретически оценено в [4-6] и было измерено в процессе экспериментальных исследований СП ЭСЧВ. Относительное среднее квадратическое двухвыборочное отклонение (СКДО) ЭСЧ, переданного по линии длиной 3 км, не превышало 4·10⁻¹⁶ на суточном интервале усреднения, что подтверждает возможность передачи ЭСЧ в коротких линиях с помощью СП ЭСЧВ без использования устройств компенсации возмущений, вносимых линией [5].

Принцип действия СОДС ШВ, контролирующей отклонение выходных секундных меток СП ЭСЧВ относительно входных эталонных, состоит в следующем. Вспомогательный генератор импульсов ВГИ в течение секундного цикла формирует последовательность импульсов, которые преобразуются лазерным передающим модулем ЛПМ в оптические импульсы. Каждый *i*-й оптический импульс проходит через блок разветвителейобъединителей БРО, где небольшая часть мощности оптического импульса поступает в фотоприёмное устройство ФПУ2, а основная часть мощности импульса поступает в ВОЛС. Электрический сигнал с ФПУ2 поступает в таймер событий TC2, на который также подается импульсный сигнал времени 1 PPS, формируемый ПГ, что обеспечивает фиксацию момента времени излучения импульса в линию t_i в шкале времени ШВ2 пункта 2.

Оптический импульс, пришедший по волоконно-оптической линии связи в пункт 1 с некоторой временной задержкой τ_3 , через ретрорефлектор PP поступает в ФПУ1, которое преобразует его в электрический сигнал, и подается на таймер событий TC1. Также в TC1 от ИСЧВ поступает эталонный сигнал 1 PPS шкалы времени ШВ1 пункта 1, что позволяет определить время прихода *i*-го оптического импульса τ_i^A в ШВ1.

Часть мощности оптического импульса, пришедшего в пункт 1, отражается от ретрорефлектора PP и проходит по оптической линии обратный путь. С временной задержкой, строго равной задержке τ_3 в линии при прямом прохождении, отраженный импульс через БРО поступает на вход ФПУ2 пункта 2. Сигнал с ФПУ2 поступает на вход ТС2, что позволяет зафиксировать время прихода *i*-го отраженного импульса τ_i^B в ШВ2. Отметим, что время прохождения оптического импульса по ВОЛС протяженностью до десяти километров составляет не более ста микросекунд, поэтому очень медленные изменения длины линии из-за колебаний температуры не создают разницы времени прохождения оптического импульса по ВОЛС в прямом и обратном направлении.

Компьютеры ПК1 и ПК2, обрабатывающие измерительную информацию, объединены в локальную сеть FastEthernet. По локальной сети информация с ПК1 о моментах времени τ_i^A в ШВ1 пункта 1 поступает в компьютер ПК2 в пункте 2 для последующей обработки измерительных данных, поступающих с ТС1 и ТС2.

Временная диаграмма, поясняющая работу системы СОДС ШВ, показана

на рис.2, где A и B – шкалы времени пунктов 1 (ШВ1) и 2 (ШВ2) соответственно, t^A и t^B – секундные метки 1 PPS шкал времени пунктов 1 и 2 соответственно. Калибруемые задержки в аппаратуре не показаны.



Рис. 2. Временная диаграмма работы системы СОДС ШВ

На основании временной диаграммы согласно рис. 2 можно записать следующие уравнения:

$$\boldsymbol{\tau}_i^A = \Delta T + \boldsymbol{t}_i + \boldsymbol{\tau}_3 \; ; \tag{1}$$

$$\tau_{_3} = \frac{\tau_i^B - t_i}{2} \ . \tag{2}$$

Подставляя значение времени прохождения оптического импульса в ВОЛС τ_3 из (1) в (2), можно определить значение ΔT расхождения шкал времени пунктов 1 и 2. Таким образом, видно, что время прохождения оптического импульса (время задержки распространения сигнала в ВОЛС) алгоритмически исключается, что является положительной особенностью СОДС ШВ.

За время секундного цикла проводится серия измерений. В итоге в каждом секундном цикле работы СОДС ШВ в ПК2 определяется расхождение ΔT шкал времени пунктов 1 и 2 по формуле:

$$\Delta T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(\tau_i^{A} - \frac{\tau_i^{B} + t_i}{2} \right),$$
(3)

где *п* – количество измерений.

Для проверки точностных характеристик предложенной схемы СП ЭСЧВ была собрана в соответствии с рис.1 экспериментальная установка, все оборудование которой размещалось в лаборатории в одной стойке. В качестве ВОЛС использовались две волоконные бухты длиной по 3 км. По одной из них система СП ЭСЧВ передавала эталонный сигнал частоты от

водородного хранителя (ВХ), входящего в состав первичного эталона ГЭТ1-2012 [2, 3]. Таким образом, в качестве ИСЧВ использовался водородный мазер с нестабильностью частоты $5 \cdot 10^{-16}$ на суточном интервале усреднения. Вторая оптоволоконная бухта использовалась для осуществления сравнения эталонной и переданной шкал времени с помощью СОДС ШВ. В ходе эксперимента определялась погрешность передачи на 3 км с помощью СП ЭСЧВ сигналов 5 МГц и 1 PPS, генерируемых ВХ.

Для определения погрешности передачи частоты 5 МГц использовался анализатор фазовых шумов Symmetricom 5125A, на входы которого подавались сигналы 5 МГц с ВХ и HROG. В процессе измерений с помощью 5125A определялись значения относительного среднего квадратического двухвыборочного отклонения (СКДО) при передаче частоты. Контроль климатических условий в лаборатории проводился с помощью измерителя влажности и температуры ИВТМ-7 М. Колебания температуры в лаборатории за время измерений не превышали ±2°С.

В результате эксперимента установлено, что нестабильность частоты (СКДО) сигнала 5 МГц, переданного системой ОНПЭЧ по ВОЛС длиной 3 км, относительно подаваемого в линию эталонного 5 МГц сигнала, не превышает $5 \cdot 10^{-16}$ на интервалах усреднения $1 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$ с.

2. Система передачи ЭСЧВ с двунаправленной передачей сигнала эталонной частоты по ВОЛС, реализующая компенсацию возмущений, вносимых линией

Для уменьшения погрешности передачи эталонной частоты в составе СП ЭСЧВ была также опробована работа системы двунаправленной передачи эталонного сигнала частоты (ДНПЭЧ), которая обеспечивает активную электронную компенсацию возмущений, вносимых линией. Функциональная схема системы СП ЭСЧВ с системой ДНПЭЧ по ВОЛС представлена на рис.3, а более детальная схема системы ДНПЭЧ представлена на рис.4 [6, 13].



Рис.3. Функциональная схема системы СП ЭСЧВ с системой двунаправленной передачи эталонной частоты (ДНПЭЧ) по ВОЛС, обеспечивающей электронную компенсацию вносимых линией возмущений

ИСЧВ – источник эталонных сигналов частоты и времени;

1 PPS ШВ1 и ШВ2 – сигналы секундных меток шкал времени пунктов 1 и 2;

ДНПЭЧ – система двунаправленной передачи эталонной частоты;

ФОЭЧ – формирователь опорных эталонных частот;

БВФО – блок выдачи сигнала фазовой ошибки;

КГ-кварцевый генератор 100 МГц;

Л1 и Л2 – оптические модули, содержащие DFB лазеры;

ФП1 и ФП2 – фотоприемники с усилителем;

Ц – оптические циркуляторы; ДЧ – делитель частоты:

ПГ – промежуточный перестраиваемый генератор;

УР – комплект аппаратуры для усиления и распределения сигналов секундных меток и опорных частот;

СОДС ШВ – система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени;

ТС1 и ТС2 – таймеры событий; ФПУ1 и ФПУ2 – фотоприемные устройства:

РР – ретрорефлектор; ПК1 и ПК2 – персональные компьютеры;

ИК – информационный канал передачи данных;

ВГИ – вспомогательный генератор импульсов;

ЛПМ – лазерный передающий модуль; БРО – блок разветвителейобъединителей.

Альманах современной метрологии, 2017, № 11

Подробная схема системы ДНПЭЧ представлена на рис.4. Она включает в себя три основных, установленных у начала линии, электронных устройства - формирователь опорных эталонных частот (ФОЭЧ), кварцевый генератор (КГ) и блок выделения фазовой ошибки (БВФО) у переданного ЭСЧ.



Рис.4. Схема системы двунаправленной передачи эталонной частоты (ДНПЭЧ) по ВОЛС с активной электронной компенсацией вносимых линией возмущений

ФОЭЧ – формирователь опорных эталонных частот;

БВФО – блок выдачи сигнала фазовой ошибки;

КГ-кварцевый генератор 100 МГц;

Л1 и Л2 – оптические модули, содержащие DFB лазеры;

ФП1 и ФП2 – фотоприемники с усилителем;

У – радиочастотные усилители; СМ – смесители; ПК- персональный компьютер;

ПФ – полосовые фильтры; ФД и ФНЧ – фазовый детектор и фильтр нижних частот;

Ц – оптический циркулятор; ДЧ – делитель частоты:

5125А - измеритель нестабильности частоты Symmetricom;

LNFR-400 – малошумящий генератор частоты Spectra Dynamics;

FS100-5RM - умножитель частоты Spectra Dynamics.

В системе ДНПЭЧ для передачи ЭСЧ по ВОЛС используется частота 100 МГц. Необходимость передачи не 5 МГц, а 100 МГц эталонного сигнала связана с тем, что по мере роста частоты передаваемого сигнала системы передачи ЭСЧ по ВОЛС с активной электронной компенсацией обеспечивают более точную коррекцию возмущений фазы передаваемого сигнала. Это объясняется тем, что амплитуда вырабатываемого в блоке БВФО сигнала фазовой ошибки пропорциональна частоте передаваемого сигнала. Поэтому одинаковое изменение длины волоконной линии из-за вариаций температуры окружающей среды при передаче более высокочастотного сигнала будет давать сигнал фазовой ошибки с лучшим отношением сигналшум. Поэтому при передаче по ВОЛС не эталонного 5 МГц, а синтезированного на его основе более высокочастотного 100 МГц сигнала обеспечивается на порядок более точная компенсация вносимых линией возмущений фазы передаваемого 100 МГц ЭСЧ.

Формирователем опорных эталонных частот ФОЭЧ (см. рис.4) синтезируется на основе эталонного 5 МГц сигнала ИСЧВ (водородного хранителя) эталонный сигнал с частотой 100 МГц. Для этого поступающий в блок ФОЭЧ эталонный сигнал 5 МГц фильтруется малошумящим генератором частоты LNFR-400 Spectra Dynamics, затем поступает на умножитель частоты FS100-5RM Spectra Dynamics, который синтезирует два эталонных сигнала: 100 МГц и 20 МГц. На их основе на смесителе СМЗ получают два основных высокостабильных опорных сигнала с частотами 80 МГц и 120 МГц, необходимых для работы БВФО.

 $K\Gamma$ – это вспомогательный управляемый кварцевый генератор на 100 МГц, сигнал которого непосредственно передается по линии на оптической несущей путем модуляции по амплитуде излучения DFB-лазера Л1. Фаза у сигнала на входе в линию Φ_{ex} соответствует фазе сигнала КГ Φ_{KT} . Пройдя 3 км волоконную линию, содержащую циркуляторы ОЦ, излучение Л1 детектируется фотоприемником ФП1, и на выходе усилителя У3 на конце линии получается сигнал 100 МГц, фаза которого Φ_{100yk} . Часть его через разветвитель поступает на вход модуляции DFB-лазера Л2. Несущая лазера Л2, пройдя по линии обратный путь, возвращает сигнал к началу линии на фотоприемник ФП2. Продектированный ФП2 обратный сигнал, фаза которого $\Phi_{oбp}$, несет информацию об интегральном возмущении фазы сигнала, проделавшего удвоенный путь по линии до ее конца и обратно.

БВФО вырабатывает и фильтрует в ФНЧ сигнал ошибки, который корректирует фазу КГ. Этот КГ выполняет роль управляемого фазовращателя для сигнала, отправляемого в линию. При работающей петле обратной связи осуществляется коррекция фазы $\Phi_{K\Gamma}$ так, что компенсируется интегральное возмущение фазы, приобретенное при однократном пробеге сигнала от КГ до выхода усилителя УЗ, установленного на конце линии. Для получения на выходе ДНПЭЧ синусоидального сигнала 5 МГц доставленный по ВОЛС 100 МГц эталонный сигнал подается на делитель ДЧ, а затем фильтруется и подается на перестраиваемый генератор ПГ.

На рис. 5 представлены результаты измерений нестабильности частоты (СКДО) сигнала 100 МГц, переданного системой ДНПЭЧ по ВОЛС длиной 3 км, относительно подаваемого в линию эталонного 100 МГц сигнала.



Рис 5. СКДО частоты эталонного сигнала, переданного системой ДНПЭЧ по ВОЛС длиной 3 км

3. Сравнение результатов измерений СКДО частоты эталонного сигнала, переданного по ВОЛС длиной 3 км, при использовании ОНПЭЧ и ДНПЭЧ

На рис.6 представлены результаты измерений СКДО сигнала 5 МГц на выходе ОНПЭЧ и ДНПЭЧ. Верхняя кривая (1) соответствует измерениям СКДО сигнала 5 МГц, переданного СП ЭСЧВ по ВОЛС на 3 км при использовании в ней системы ОНПЭЧ, а нижняя кривая (2) соответствует измерениям СКДО сигнала 5 МГц, переданного СП ЭСЧВ по ВОЛС на 3 км при использовании в ней системы ДНПЭЧ.

Альманах современной метрологии, 2017, № 11



Рис 6. СКДО частоты эталонного сигнала, переданного по ВОЛС длиной 3 км, когда в СП ЭСЧВ используется ОНПЭЧ (кривая 1) и ДНПЭЧ (кривая 2)

Из результатов, представленных на рис. 6, следует, что дополнительная погрешность (СКДО), которую вносит система передачи ЭСЧ по 3-х км ВОЛС при использовании ОНПЭЧ, не превышает $5 \cdot 10^{-16}$, а при использовании ДНПЭЧ $6 \cdot 10^{-18}$ на интервале усреднения $2 \cdot 10^5$ с. Сравнение результатов измерений, представленных на рис. 6, подтверждает, что на двухсуточном интервале усреднения погрешность передачи ЭСЧ от ВХ по 3 км линии уменьшается на два порядка при использовании системы ДНПЭЧ, которая обеспечивает компенсацию возмущений, вносимых ВОЛС.

Следует отметить, что при длине ВОЛС более 3 км необходимо применять в составе СП ЭСЧВ систему ДНПЭЧ, которая может обеспечить передачу частоты ВХ по ВОЛС практически без потери точности на расстояние до 100 км [6], а при использовании промежуточного двунаправленного оптического усилителя на расстояние до 200 км [13]. При передаче ЭСЧ в коротких линиях предпочтительно использовать более простую систему ОНПЭЧ, которая может передать по линиям длиной до 3 км эталонный сигнал с погрешностью, не превышающей собственную нестабильность частоты эталонного источника – водородного мазера.

4. Экспериментальные исследования СП ЭСЧВ при передаче шкалы времени

Экспериментальные исследования системы СП ЭСЧВ при передаче ШВ

проводились с использованием методики, изложенной в [14]. В качестве эталонного измерителя временных интервалов (ИВИ) использовался частотомер 53230A, работающий от сигнала опорной частоты с ВХ. При определении погрешности передачи ШВ исследуемой системой ИВИ непрерывно измерял временные интервалы между фронтами импульсов 1 PPS, генерируемых ВХ и HROG. По результатам эксперимента установлено, что границы погрешности передачи ШВ системой СП ЭСЧВ по ВОЛС длиной 3 км не превышают \pm 90 пс (при доверительной вероятности 0,95). Кроме того, в работе [14] показано, что применяемые в СОДС ШВ устройства обеспечивают ее работоспособность при протяженности ВОЛС до 30 км.

Проведенные исследования подтверждают возможность применения СП ЭСЧВ, построенной по предложенной схеме, для реализации высокоточной передачи эталонных сигналов частоты и шкалы времени по ВОЛС на расстояние до 30 км.

5. СП ЭСЧВ, в которой используется система встречных сравнений шкал времени (СВС ШВ)

Для повышения дальности действия СП ЭСЧВ в её составе предложено использовать систему встречных сравнений шкал времени (СВС ШВ). Структурная схема СВС ШВ приведена на рис.7.



Рис. 7. Структурная схема СВС ШВ

ШВ – шкала времени; ТС – таймер событий; ФП – фотоприемник;

ИГ – импульсный генератор; ПМ – передающий модуль;

БРО – блок разветвителей-объединителей;

ИК – информационный канал передачи данных;

ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи; ПК – персональный компьютер;

ПГ – промежуточный перестраиваемый генератор.

СВС ШВ функционирует следующим образом. Шкала времени первого объекта (ШВ1) формируется эталоном единиц времени и частоты (ЭВЧ) в

виде физических сигналов 1 PPS (секундные метки времени). В качестве формирователя шкалы времени второго объекта (ШВ2) используется промежуточный генератор (ПГ), на вход которого со стандарта частоты поступает сигнал 1 PPS, не синхронизированный со шкалой времени первого объекта. Для синхронизации двух ШВ используется СВС ШВ. Связь между элементами СВС ШВ, размещенными на разных объектах, осуществляется по ВОЛС, проложенной между этими объектами, и по информационному каналу ИК.

На первом объекте в произвольный момент времени с импульсного генератора ИГ1 на лазерный передающий модуль ПМ1 с определенной частотой начинают поступать электрические импульсы, которые ПМ1 преобразует в оптические импульсы той же частоты следования. Оптические импульсы с ПМ1 поступают на вход блока разветвителей-объединителей БРО1. Некоторая часть мощности каждого оптического импульса поступает в фотоприемник ФП1 первого объекта, а основная её часть направляется в волоконную линию. Электрический сигнал с ФП1 поступает в таймер событий TC1 первого объекта, который фиксирует момент излучения оптического импульса t_1 в шкале времени ШВ1 первого объекта. Для этого на второй вход TC1 подается сигнал 1 PPS ШВ1. Информация о моменте излучения оптического импульса t_1 по ИК поступает в компьютер (ПК), расположенный на втором объекте.

Оптический импульс, пришедший с первого объекта по волоконной линии связи на второй объект, через БРО2 поступает в ФП2 второго объекта, который преобразует его в электрический сигнал и передает на вход TC2. На TC2 также подается сигнал 1 PPS от промежуточного генератора ПГ, что позволяет определить время τ_1 прихода оптического импульса в шкале времени ШВ2 второго объекта, формируемой ПГ. Информация о моменте прихода оптического импульса τ_1 направляется в ПК.

На втором объекте в произвольный момент времени с импульсного генератора ИГ2 на ПМ2 начинают поступать электрические импульсы с частотой или длительностью, отличающейся от генерируемой ИГ1. Каждый оптический импульс с ПМ2 поступает на вход БРО2, часть мощности оптического импульса поступает в ФП2 второго объекта, а основная часть его мощности подается в ВОЛС. Электрический сигнал с ФП2 подается на TC2, который фиксирует момент излучения оптического импульса t_2 в шкале времени ШВ2 второго объекта. Информация о моменте излучения оптического импульса t_2 с таймера событий TC2 поступает в ПК. Оптический импульс, пришедший по ВОЛС с второго на первый объект, через БРО1 поступает на Φ П1, который преобразует его в электрический сигнал и подает на вход TC1. Таймер событий TC1 определяет время τ_2 прихода оптического импульса в шкале времени ШВ1 первого объекта. Информация о моменте прихода оптического импульса τ_2 поступает по ИК в ПК.

Во время секундного цикла сравнения шкал времени с помощью программного обеспечения определяется с какого объекта: своего или противоположного, поступил на фотоприемник (ФП1 или ФП2) данный импульс. Распознавание источника поступающих импульсов проводится по частоте следования импульсов или по их длительности.

Временная диаграмма работы СВС ШВ показана на рис. 8, где 1 и 2 – шкала времени первого и второго объектов соответственно, t_1 и t_2 – секундные метки 1 PPS шкал времени первого и второго объектов соответственно.

Расхождение шкал времени удаленных объектов Δt определяется по формуле:

$$\Delta t = \frac{t_1 - t_2}{2} + \frac{\tau_2 - \tau_1}{2}, \qquad (4)$$

где

 t_1 - измеренное время излучения оптического импульса с первого объекта в ШВ1 первого объекта,

 t_2 - измеренное время излучения оптического импульса со второго объекта в ШВ2 второго объекта,

 τ_1 – измеренное время прихода оптического импульса с первого объекта на второй объект в ШВ2,

 τ_2 – измеренное время прихода оптического импульса со второго объекта на первый объект в ШВ1.

На основе результатов измерений ∆t ПК вырабатывает управляющую команду, по которой ПГ синхронизирует шкалы времени ШВ1 и ШВ2.

Усреднение результатов измерений за время цикла сравнения по каждой паре импульсов обеспечивает повышение точности сравнения и синхронизации.



Рис. 8. Временная диаграмма работы СВС ШВ

Альманах современной метрологии, 2017, № 11

Неисключенная систематическая погрешность (НСП) СВС ШВ Θ_{Σ} зависит от погрешности измерений интервалов времени таймерами событий и погрешности определения аппаратурной поправки, учитывающей задержки в оптических кабелях и электронных устройствах системы. Для расчета НСП СВС ШВ используем выражение:

$$\Theta_{\Sigma} = 1, 1 \sqrt{\frac{1}{4} \Theta_{t_1}^2 + \frac{1}{4} \Theta_{t_2}^2 + \frac{1}{4} \Theta_{\tau_2}^2 + \frac{1}{4} \Theta_{\tau_1}^2 + \Theta_{A\Pi\Pi}^2}, \qquad (5)$$

где Θ_{t_1} - погрешность измерений интервала времени t_1 таймером событий TC1;

 Θ_{t_2} - погрешность измерений интервала времени t_2 таймером событий TC2;

 Θ_{τ_1} - погрешность измерений интервала времени τ_1 таймером событий TC2;

 Θ_{τ_2} - погрешность измерений интервала времени τ_2 таймером событий TC1;

 $\Theta_{_{A\Pi\Pi}}$ - погрешность определения аппаратурной поправки.

Значения НСП системы СВС ШВ, полученные в результате расчетов по формуле (5), приведены на графиках, представленных на рис. 9. Из графиков следует, что НСП системы СВС ШВ не превысит 100 пс при использовании таймеров событий с погрешностью 70 – 80 пс, а при использовании наиболее точных из существующих таймеров событий с погрешностью около 10 пс НСП системы составит 20 – 50 пс, что соответствует современным требованиям к наиболее точным системам синхронизации шкал времени.



Рис. 9. Зависимость НСП системы СОДС ШВ Θ_{Σ} от погрешности таймеров событий Θ_t при различных значениях погрешности определения аппаратурной поправки $\Theta_{A\Pi\Pi}$

Оценку абсолютной погрешности измерений расхождений шкал времени Δ с помощью СВС ШВ при доверительной вероятности 0,95 можно провести в соответствии с выражением:

$$\Delta = \pm 2\sqrt{\frac{1}{3}\Theta_{\Sigma}^{2} + \sigma^{2}} \quad . \tag{6}$$

Значения абсолютной погрешности измерений расхождений шкал времени системой СВС ШВ, полученные в результате расчетов по формуле (6), приведены на графиках, представленных на рис. 10. Из графиков следует, что погрешность измерений расхождений шкал времени Δ системой СВС ШВ (при доверительной вероятности 0,95) не превысит ± 150 пс при использовании таймеров событий с погрешностью Θ_t не более ± 100 пс, и не превысит ± 100 пс при использовании таймеров событий с погрешностью Θ_t не более ± 50 пс. Кроме того, расчеты показывают возможность уменьшения погрешности системы до значений 30 - 40 пс при использовании таймеров событий с погрешностью Θ_t не более ± 15 пс и при определении аппаратурной поправки с погрешностью не более ± 20 пс.



Рис. 10. Результаты расчета погрешности Δ системы CBC ШВ (при доверительной вероятности 0,95) в зависимости от погрешности таймеров событий Θ_t , при различных значениях погрешности аппаратурной поправки $\Theta_{A\Pi\Pi}$ и случайной погрешности σ (СКО) системы CBC ШВ

Оценка дальности действия СВС ШВ показывает, что применение стандартных приемных и передающих оптоволоконных модулей обеспечит дальность работы СВС ШВ не менее 100 км для стандартного оптического волокна SMF-28. Причем выявлено, что за счет выбора энергетических и спектральных характеристик волоконно-оптических устройств СВС ШВ с учетом параметров ВОЛС можно повысить дальность работы СВС ШВ и свыше 100 км.

Заключение

Использование в составе комплекса СП ЭСЧВ системы встречных сравнений шкал времени СВС ШВ и системы ДНПЭЧ с электронной активной компенсацией вносимых волоконной линией возмущений при передаче эталонных радиочастот позволяет осуществить передачу ЭСЧ и сравнение шкал времени территориально удаленных эталонов на расстоянии до 200 км. При передаче эталонных сигналов по ВОЛС на расстояния свыше 100 км необходимо использовать промежуточные оптические двунаправлен-ные усилители.

С учетом особенностей рассмотренного выше комплекса средств для передачи ЭСЧ и сравнения ШВ эталонов можно сформулировать рекомендации по построению на основе этих средств различных конфигураций СП ЭСЧВ. Система СП ЭСЧВ может быть построена в нескольких конфигурациях в зависимости от длины оптоволоконной линии и требуемой точности передачи эталонных сигналов частоты. Варианты состава комплекса для ВОЛС различной длины приведены ниже в таблице.

Таблица

Состав комплекса СП ЭСЧВ по ВОЛС (используемые в ком- плексе системы срав- нения ШВ и передачи ЭСЧ)	СОДС ШВ + ОНПЭЧ	СОДС ШВ + ДНПЭЧ	СВС ШВ + ДНПЭЧ	СВС ШВ + ДНПЭЧ
Длина линии, км	до 3 км	до 3 км	до 100 км	до 200 км *
Погрешность изме- рений при сравнении ШВ эталонов	≤90 пс	≤90 пс	150**	200**
Нестабильность (СКДО) переданного радиочастотного эта- лонного сигнала на 2-х суточном ин- тервале усреднения	5·10 ⁻¹⁶	6·10 ⁻¹⁸	1,3.10 ⁻¹⁷	3,5·10 ¹⁷ ***

* при использовании в линии промежуточных двунаправленных оптических усилителей;

** оценочные значения, полученные на основании расчета;

*** экспериментальный результат, полученный при использовании в 200 км линии одного промежуточного двунаправленного оптического EDFA усилителя.

Выполненные к настоящему времени исследования и измерения подтвердили, что с помощью комплекса средств передачи ЭСЧВ возможно доставить эталонные сигналы на расстояние не менее 200 км с погрешностью меньшей, чем собственная нестабильность лучших водородных хранителей, входящих в состав эталонов единиц частоты и времени.

Литература

- 1. Денисенко О.В., Федотов В.Н., Сильвестров И.С., Смирнов Ф.Р., Баженов Н.Р., Гериева Л.Б. Обеспечение единства измерений при развитии и использовании ГЛОНАСС // Измерительная техника, 2015, № 1, с. 17-20.
- 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. Беляев А.А., Блинов И.Ю., Демидов Н.А., Медведев С.Ю., Пастухов А.В., Сахаров Б.А. Аппаратура водородных хранителей эталонов единиц времени и частоты // Вестник метролога, 2015, №2, с.14-23.
- 4. Балаев Р.И., Шибаева Д.М., Малимон А.Н., Курчанов А.Ф. Характеристики фазостабильных коаксиальных и оптических кабелей, используемых для передачи информации об эталонном времени и частоте // Альманах современной метрологии, 2015, № 2, с. 165-179.
- 5. Малимон А.Н. Передача эталонных сигналов времени и частоты по волоконно-оптическим линиям // Альманах современной метрологии, 2016, № 8, с. 198-268.
- 6. 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.
- 7. M.Rost, D.Piester, W. Yang, T.Feldmann, T.Wübbena and A.Bauch. Time transfer through optical fibers over a distance of 73 km with an uncertainty below 100 ps // Submitted to Metrologia, August 2012.
- 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. 2012. Вып. 23, с. 131-135.
- K. Predehl, G. Grosche, S. M. F. Raupach, S. Droste, O. Terra, J. Alnis, Th. Legero, T. W. Hänsch, Th. Udem, R. Holzwarth, H. Schnatz. A 920-Kilometer Optical Fiber Link for Frequency Metrology at the 19th Decimal Place // Science. 2012, v. 336, p. 441-444.

- 10. Fujieda Miho, Kumagai Motohiro, Nagano Shigeo and Ido Tetsuya. Frequency Transfer Using Optical Fibers // Journal of the National Institute of Information and Communications Technology, 2010, v. 57, № ³/₄, p. 209-217.
- 11. Донченко С.С., Колмогоров О.В., Прохоров Д.В. Синхронизация шкал времени удаленных объектов с помощью системы одно- и двухсторонних сравнений // Мир измерений, 2016, № 3 (173), с. 26-29.
- 12. Донченко С.С., Колмогоров О.В., Прохоров Д.В. Система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени// Измерительная техника, 2015, № 1, с. 14-17.
- 13. Балаев Р.И., Малимон А.Н., Федорова Д.М., Курчанов А.Ф., Троян В.И. Передача эталонного сигнала водородного хранителя по 200 км волоконно-оптической линии с активной электронной компенсацией возмущений, вносимых линией. Измерительная техника, 2017, № 9.
- 14. Донченко С.С., Колмогоров О.В., Прохоров Д.В., Буев С.Г. Результаты экспериментальных исследований системы одно- и двухсторонних сравнений шкал времени. Альманах современной метрологии, 2017, № 9, с. 117-121.