

Оценка точности передачи эталонного сигнала водородного генератора по волоконно-оптической линии связи с электронной компенсацией возмущений

Р. И. БАЛАЕВ¹, А. Н. МАЛИМОН¹, Д. М. ФЕДОРОВА^{1,2}, А. Ф. КУРЧАНОВ¹, В. И. ТРОЯН²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Россия, e-mail: dmfedorova2706@gmail.com

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия, e-mail: troyan@mephi.ru

Описана экспериментальная установка для передачи эталонного сигнала частоты по волоконно-оптической линии связи с электронной компенсацией возмущений, вносимых линией. Представлены результаты измерений погрешности передачи эталонного сигнала частотой 100 МГц водородного генератора Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1–2012 по волоконно-оптическим линиям связи длиной 100–200 км.

Ключевые слова: стандарты частоты, передача эталонных сигналов частоты, волоконно-оптические линии связи.

The experimental setup and the results of the measurements of the error of transmission of the 100 MHz reference signal of the H-maser of the State primary standard GET 1–2012 to the end of fiber lines of different lengths from 100 to 200 km are presented.

Key words: frequency standards, transmission of reference frequency signals, fiber-optic links.

В 2012 г. Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1–2012 был оснащён двумя метрологическими цезиевыми реперами частоты, в результате эталон стал воспроизводить единицы времени и частоты с неисключённой систематической погрешностью не более $5 \cdot 10^{-16}$ [1, 2]. Вместе с этим в состав ГЭТ 1–2012, а также вторичных и рабочих эталонов, были введены новые водородные хранители (ВХ) – хранители частоты и времени на основе водородных мазеров, долговременная нестабильность частоты которых на интервале времени усреднения 1 сутки была уменьшена до уровня $3 \cdot 10^{-16}$ [3]. Таким образом эталоны в новых составах приобрели более высокие метрологические характеристики [2, 3]. Вслед за этим возникла необходимость повышения точности сравнения частот и шкал времени (ШВ) созданных более совершенных эталонов, которые представляют территориально удалённые друг от друга уникальные установки. Для проведения сравнений необходимо передавать эталонные сигналы частоты и времени (ЭСЧВ) на большие расстояния. В национальных метрологических организациях ведутся исследования по разработке новых методов высокоточных сравнений частот и ШВ.

В настоящее время широко применяют спутниковые методы, в которых используются сигналы космических аппаратов навигационных систем или спутники связи, обеспечивающие реализацию дуплексного TWSTFT метода сравнения ШВ эталонов. В результате многолетних исследований и разработок практически достигнут предел возможностей спутниковых методов. Экспериментальные исследования подтверждают, что минимальная достижимая погрешность спутниковых методов сравнения ШВ составляет порядка 1 нс, а погрешность сравнения частот

двух пространственно-разнесённых эталонов на интервале усреднения в несколько суток – не ниже уровня $5 \cdot 10^{-16}$. Однако лучшие образцы ВХ в составе ГЭТ 1–2012, с помощью которых в настоящее время формируется российская национальная ШВ, имеют нестабильность частоты на уровне $\sim 2 \cdot 10^{-16}$ на интервалах усреднения в несколько суток. Поэтому в настоящее время погрешность сравнения пространственно-разнесённых эталонов определяется не характеристиками применяемых в них квантовых стандартов частоты, а свойствами канала связи и устанавливаемой на его концах аппаратуры, обеспечивающей передачу ЭСЧВ.

Перспективным направлением для передачи ЭСЧВ является использование волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Однако целый ряд физических свойств оптического волокна возмущает фазу передаваемого эталонного радиочастотного сигнала [4, 5]. Не принимая мер, компенсирующих вносимые ВОЛС возмущения, нельзя без потери точности передать эталонный радиочастотный сигнал на расстояние более километра. Выполненные в лабораториях и метрологических центрах исследования подтверждают, что, применив устройства пассивной и активной компенсации возмущений, можно без потери высокой точности передать ЭСЧВ по ВОЛС на расстояние до нескольких сотен километров.

Цель настоящей работы – создание экспериментальной установки для передачи эталонного сигнала частотой 100 МГц (ЭСЧ) от ВХ по ВОЛС длиной до 200 км и измерение нестабильности частоты сигнала, доставленного в конец линии. Для ослабления влияния вносимых линией возмущений использовали систему активной асимметричной электронной компенсации [5].

Был проведён цикл измерений погрешности передачи

ЭСЧ по ВОЛС длинами 100, 147 и 200 км. Каждая ВОЛС формировалась из нескольких последовательно включённых катушек стандартного оптического волокна SMF-28. В качестве оптической несущей служило излучение DFB-лазеров с длиной волны 1,55 мкм, соответствующей окну прозрачности оптического волокна. На этой длине волны линия вносит минимальные потери. В длинных ВОЛС оптическая несущая значительно ослабляется, возрастает уровень фазовых шумов передаваемого ЭСЧ и увеличивается нестабильность частоты. В линиях длиной более 100 км при передаче ЭСЧ обязательны промежуточные оптические усилители.

Для работы системы электронной компенсации вносимых ВОЛС возмущений необходимо передавать ЭСЧ в конец линии, а затем возвращать его обратно по тому же волокну в начало линии. Для разделения оптического излучения, распространяющегося по ВОЛС на встречных направлениях, на концах линии устанавливаются оптические циркуляторы. Так как ведётся двухсторонняя передача сигналов, то в системах с электронной компенсацией для передачи ЭСЧ необходимо применять двунаправленные оптические усилители. Однако данные оптические усилители одновременно вносят дополнительные шумы в волоконно-оптический канал связи, что оказывает влияние на нестабильность частоты сигнала, доставленного в конец линии. У двунаправленных усилителей оптические входы и выходы совмещены в одном оптическом разъёме; это предъявляет более высокие требования к допустимому уровню обратных отражений в линии, чтобы система двусторонней передачи ЭСЧ не переходила в режим самовозбуждения. В настоящей работе измерения на линиях длинами 147 и 200 км выполняли с одним промежуточным двунаправленным оптическим услителем EDFA, который находился примерно посередине линии. Измерения на линии длиной 100 км были выполнены без оптического усилителя.

Экспериментальная установка – это система передачи ЭСЧ по ВОЛС с электронной компенсацией возмущений. Схема рассматриваемой установки с линией длиной 200 км представлена на рис. 1. Система передачи ЭСЧ 100 МГц состоит из трёх установленных в начале линии основных электронных устройств: формирователя опорных эталонных частот $\Phi\Omega\mathcal{C}$; кварцевого генератора $KГ$; блока выделения фазовой ошибки $БВ\Phi\mathcal{O}$ переданного ЭСЧ.

Формирователь опорных эталонных частот на основе эталонного сигнала водородного хранителя H частотой 5 МГц синтезирует эталонный сигнал частотой 100 МГц и два основных опорных сигнала частотами 80 и 120 МГц, необходимых для работы блока выделения фазовой ошибки.

В качестве кварцевого генератора используется вспомогательный управляемый кварцевый генератор на 100 МГц, сигнал которого непосредственно передаётся по ВОЛС путём модуляции по амплитуде излучения DFB-лазера $\mathcal{L}1$. Фаза $\Phi_{вх}$ сигнала на входе в линию соответствует фазе $\Phi_{кг}$ кварцевого генератора. Пройдя длинную ВОЛС, содержащую усилитель EDFA и оптические циркуляторы $\mathcal{O}\mathcal{C}$, излучение DFB-лазера $\mathcal{L}1$ детектируется фотоприёмником $\Phi\mathcal{П}1$. На выходе усилителя $\mathcal{У}3$ в конце линии формируется сигнал частотой 100 МГц и фазой $\Phi_{100к}$. Часть этого сигнала через разветвитель поступает на вход модуляции DFB-лазера $\mathcal{L}2$. Оптическая несущая лазера $\mathcal{L}2$, пройдя по линии обратный путь, возвращает сигнал в начало линии на

фотоприёмник $\Phi\mathcal{П}2$. Продетектированный фотоприёмником $\Phi\mathcal{П}2$ обратный сигнал фазой $\Phi_{обр}$ несёт информацию об интегральном возмущении фазы сигнала, проделавшего удвоенный путь по линии до конца и обратно.

В блоке выделения фазовой ошибки вырабатывается и фильтруется с помощью фильтра нижних частот $\Phi\mathcal{Н}\mathcal{C}$ сигнал ошибки, который корректирует фазу кварцевого генератора, выполняющего роль фазовращателя для сигнала, отправляемого в линию. При работающей петле обратной связи осуществляется коррекция фазы $\Phi_{кг}$ так, что компенсируется интегральное возмущение фазы, приобретённое при однократном пробеге сигнала от кварцевого генератора до выхода усилителя $\mathcal{У}3$, установленного в конце линии. Уравнения, поясняющие принцип компенсации в установке, собранной по описанной схеме, приведены ниже.

Для компенсации возмущений, вносимых ВОЛС, фаза $\Phi_{вх}$ корректируется, а фаза $\Phi_{обр}$ не корректируется. Поэтому схему, представленную на рис. 1, можно отнести к разряду активных асимметричных электронных схем компенсации [5].

При передаче ЭСЧ по ВОЛС температура многокилометровой линии может изменяться в широких пределах. В экспериментах авторов температура изменялась в течение суток на 4 °С, что существенно превышает суточный ход температуры менее 1°С в местах прокладки подземных оптических кабелей [4]. Отметим, что при изменениях температуры окружающей среды фаза передаваемого сигнала возмущается волоконной линией и другими электронными и оптическими устройствами, которые умножают, фильтруют, преобразовывают первичный эталонный сигнал частотой 5 МГц. Возмущение фазы в каждом из этих устройств можно оценить по их температурному коэффициенту задержки сигнала, который, например, у умножителей частоты может достигать 40 пс/°С. Чтобы повысить точность компенсации возмущений, вносимых ВОЛС, необходимо все электронные и оптические устройства, расположенные в начале и в конце линии, устанавливать в помещениях или в камерах с постоянными климатическими условиями. В рассматриваемом случае использовали камеры, в которых поддерживалась температура в пределах (22,0±0,2) °С.

Такие же стабильные температурные условия круглогодично поддерживают и в помещениях, где находятся ВХ ГЭТ 1–2012. Температурный коэффициент относительного изменения частоты ВХ составляет (2... 3)·10⁻¹⁵/°С [3]. Вклад в его значение вносят, в том числе, электронные блоки, обеспечивающие преобразование сигнала ВХ частотой 5 МГц и сравнение его с частотой квантового перехода. Чтобы реализовать нестабильность частоты выходного сигнала ВХ, менее или равную 2·10⁻¹⁶, на интервалах усреднения от суток до недели, необходимо постоянство термодинамических факторов окружающей среды в местах установки ВХ.

Погрешность электронной компенсации возмущений, вносимых линией, зависит от точности синтеза в формирователе опорных эталонных частот опорных сигналов частотами 80 и 120 МГц и эталонного сигнала частотой 100 МГц. Эти три сигнала синтезируются на основе выходного сигнала частотой 5 МГц одного из ВХ ГЭТ 1–2012. Доставленный по кабелю к установке эталонный сигнал ВХ частотой 5 МГц предварительно фильтруется, а затем поступает на умножитель частоты

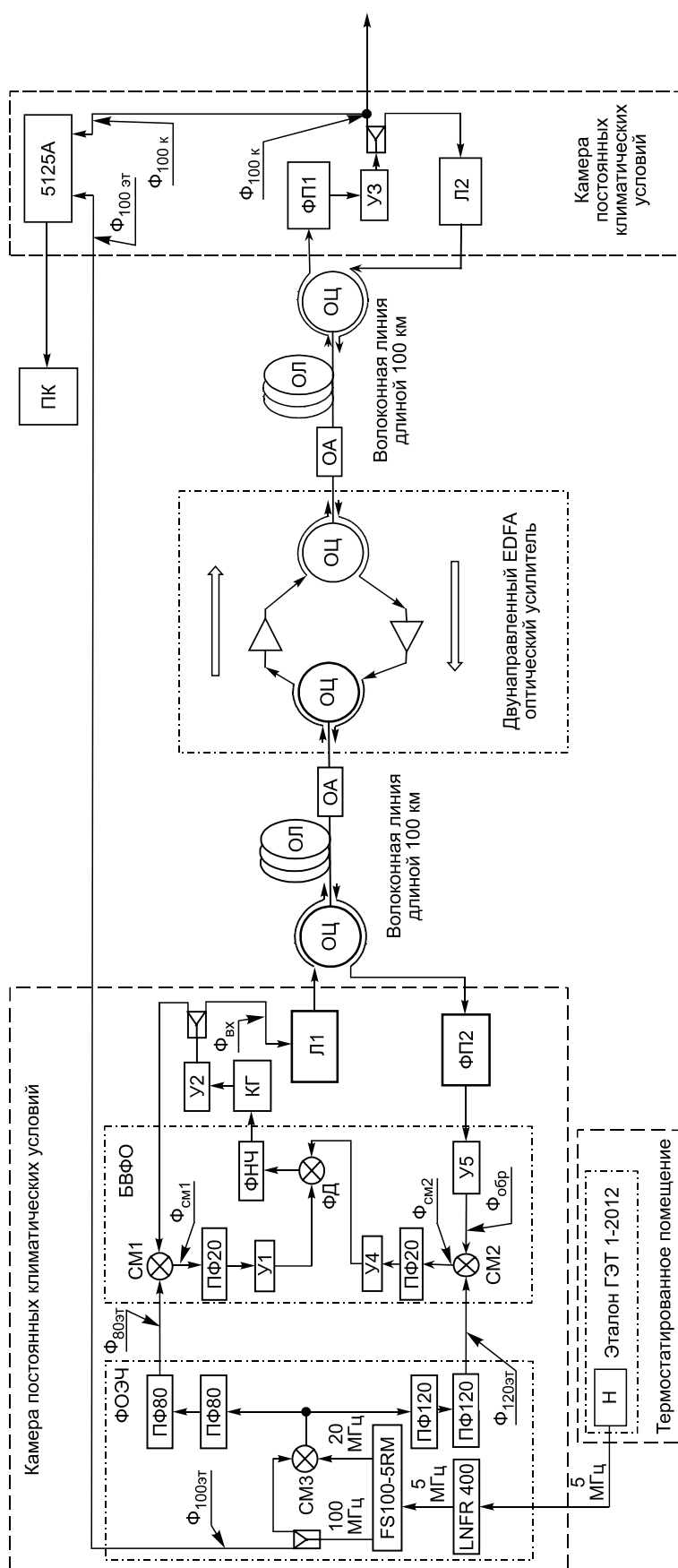


Рис. 1. Схема системы передачи ЭСЧ по ВОЛС длиной 200 км с активной электронной компенсацией:

ФОЗЧ – формирователь опорных эталонных частот; БВФО – блок выделения фазовой ошибки; Н – водородный хранитель ГЭТ 1-2012; LNFR-400 – малошумящий генератор; FS100RM-5 – умножитель частоты; ПФ20, ПФ80, ПФ120 – полосовые фильтры; СМ1-СМ3 – смесители; ФД – фазовый детектор; ФНЧ – фильтр нижних частот; КГ – кварцевый генератор; У1-У5 – усилители; Л1, Л2 – лазеры; ФП1, ФП2 – фотоприёмники; ОЛ – катушки оптической линии; ОЦ – оптические циркуляторы; ОА – оптические аттенуаторы; 5125А – измеритель нестабильности Symmetriscot; ПК – персональный компьютер

FS100RM-5 для получения сигналов частотами 20 и 100 МГц. Для фильтрации сигнала ВХ используется следящий фильтр на основе фазовой автоподстройки частоты малошумящего 5 МГц кварцевого генератора LNFR-400 по сигналу ВХ частотой 5 МГц. Использование фильтра позволило снизить уровень фазовых шумов эталонного сигнала частотой 5 МГц на 15 дБ при отстройках от несущей больше 1 кГц.

Выходные сигналы умножителя частотами 20 и 100 МГц подаются на смеситель СМЗ для получения двух основных опорных сигналов частотами 80 и 120 МГц. Для подавления нежелательных составляющих в их спектре используются полосовые фильтры ПФ80 и ПФ120. Два опорных сигнала необходимы для выработки сигнала коррекции фазы кварцевого генератора, который выполняет роль управляемого фазовращателя и компенсирует возмущения. К фазовой стабильности опорных сигналов предъявляются высокие требования, так как они, в первую очередь, определяют точность компенсации. Для уменьшения влияния температурного фактора на стабильность фаз опорных сигналов использовали фильтры ПФ80 и ПФ120 с широкой полосой пропускания порядка 4 МГц, так как они имеют меньший температурный коэффициент задержки сигнала.

Были проведены измерения погрешности синтеза основных опорных частот и уровня их белых фазовых шумов. Формирователь опорных эталонных частот размещается в камере с постоянными климатическими условиями и синтезирует опорные сигналы частотами 80 и 120 МГц с погрешностью, не превышающей $1,5 \cdot 10^{-17}$ на интервале усреднения 10^5 с. Белые фазовые шумы опорных сигналов в диапазоне отстроек от несущей 1–200 кГц составляют – 150 дБ/Гц.

Рассмотрим уравнения, из которых следует, что фаза сигнала $\Phi_{100к}$, полученного на удалённом конце линии, соответствует фазе $\Phi_{100эт}$ эталонного сигнала частотой 100 МГц. Для этого запишем выражения для фаз опорных сигналов 80 и 120 МГц и для передаваемого сигнала частотой 100 МГц в разных точках схемы на рис. 1:

$$\Phi_{80эт} = 0,8\Phi_{100эт}; \Phi_{120эт} = 1,2\Phi_{100эт}. \quad (1)$$

На входе в линию фаза сигнала частотой 100 МГц соответствует фазе кварцевого генератора:

$$\Phi_{вх} = \Phi_{кГ}. \quad (2)$$

В выражениях (1), (2) и последующих не учитываются постоянные сдвиги фаз сигналов, связанные с задержкой в кабелях и электронных устройствах, так как это несущественно при анализе работы схемы компенсации.

Фазу $\Phi_{100к}$ сигнала, проделавшего путь по линии в одну сторону, и фазу $\Phi_{обр}$ сигнала, проделавшего путь по линии туда и обратно, определим как

$$\Phi_{100к} = \Phi_{кГ} + \varphi_{л}; \quad (3)$$

$$\Phi_{обр} = \Phi_{кГ} + 2\varphi_{л}, \quad (4)$$

где $\varphi_{л}$ – сдвиг фазы сигнала, связанный с задержкой в ВОЛС

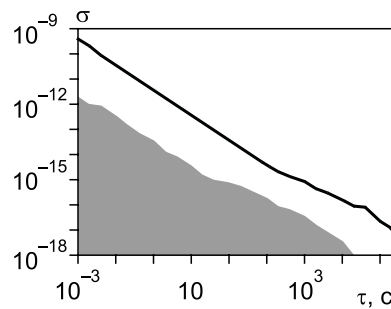


Рис. 2. Среднее квадратическое относительно двухвыборочное отклонение σ ЭСЧ 100 МГц, переданного в конец ВОЛС длиной 100 км; τ – время усреднения; верхняя линия области серого цвета соответствует уровню разрешения измерителя нестабильности 5125А

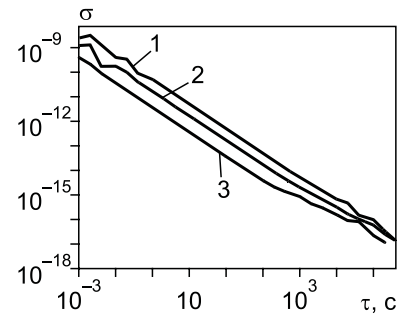


Рис. 3. Среднее квадратическое относительно двухвыборочное отклонение σ ЭСЧ 100 МГц, переданного в конец ВОЛС длиной 200 км (кривая 1), 147 км (кривая 2), 100 км (кривая 3)

при распространении в одну сторону.

Фазы двух сигналов частотой 20 МГц, которые получаются на выходе смесителей СМ1 и СМ2 (см. рис. 1) и подаются на фазовый детектор ФД, выразим как

$$\Phi_{СМ1} = \Phi_{кГ} - 0,8\Phi_{100эт}; \Phi_{СМ2} = 1,2\Phi_{100эт} - \Phi_{обр}.$$

Управляющий сигнал, поступающий с выхода фазового детектора на кварцевый генератор, будет пропорционален разности фаз двух сигналов частотой 20 МГц. Найдём эту разность с учётом (4):

$$\Phi_{СМ1} - \Phi_{СМ2} = 2\Phi_{кГ} - 2\Phi_{100эт} + 2\varphi_{л}. \quad (5)$$

При функционирующей петле фазовой автоподстройки разность (5) фаз можно приравнять нулю, тогда фазу кварцевого генератора можно найти как

$$\Phi_{кГ} = \Phi_{100эт} - \varphi_{л}. \quad (6)$$

Подставив выражение (6) в (3), получим фазу сигнала на удалённом конце ВОЛС, равную фазе эталона:

$$\Phi_{100к} = \Phi_{100эт}.$$

Таким образом, при работе схемы компенсации фаза $\Phi_{100к}$ будет соответствовать фазе $\Phi_{100эт}$ даже в случае изменения задержки сигнала в линии, например, из-за изменения её температуры.

Измерение нестабильности частоты сигнала, доставленного с помощью экспериментальной установки в конец ВОЛС, осуществлялось измерителем фазовых шумов и нестабильности Symmetricom 5125А. С его помощью было определено среднее квадратическое относительно двухвыборочное отклонение (СКДО) сигнала частотой 100 МГц в конце линии относительно эталонного сигнала 100 МГц.

Результаты измерений СКДО сигнала частотой 100 МГц, переданного установкой в конец линии длиной 100 км без промежуточного оптического усилителя, при работающей системе электронной компенсации представлены на рис. 2. Экспериментальная установка

СКДО ЭСЧ 100 МГц, переданного в концы ВОЛС разной длины

Время усреднения τ, с	Линия без оптического усиления	Линии с оптическим усилителем	
	100 км	147 км	200 км
1	$3,6 \cdot 10^{-13}$	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$4,7 \cdot 10^{-12}$
10	$3,6 \cdot 10^{-14}$	$1,7 \cdot 10^{-13}$	$4,8 \cdot 10^{-13}$
10^3	$8,6 \cdot 10^{-16}$	$2 \cdot 10^{-15}$	$5,2 \cdot 10^{-15}$
10^5	$2,3 \cdot 10^{-17}$	$6 \cdot 10^{-17}$	$9,9 \cdot 10^{-17}$
$2 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^{-17}$	$2,6 \cdot 10^{-17}$	$3,5 \cdot 10^{-17}$
$4 \cdot 10^5$	—	$1,3 \cdot 10^{-17}$	$1,4 \cdot 10^{-17}$

передаёт ЭСЧ 100 МГц по ВОЛС длиной 100 км с СКДО результата измерений частоты в конце линии $2,3 \cdot 10^{-17}$ на интервале усреднения 1 сутки. В работе [6] получено, что первый вариант экспериментальной установки для передачи ЭСЧ по ВОЛС с электронной компенсацией обеспечивал доставку эталонного сигнала частотой 100 МГц на расстояние 100 км с СКДО, равным $1 \cdot 10^{-16}$ на интервале усреднения 1 сутки.

Следовательно, новая экспериментальная установка (см. рис. 1) обеспечивает доставку сигнала частотой 100 МГц в конец ВОЛС длиной 100 км с погрешностью, меньшей в 4 раза, чем погрешность ранее разработанной схемы. Новая установка точнее компенсирует возмущения, вносимые длиной ВОЛС. Это объясняется высокой стабильностью синтезированных опорных сигналов, а также тем, что вся электронная аппаратура, установленная на концах линии, была в меньшей мере подвержена изменениям температуры окружающей среды, так как была размещена в камерах с постоянными климатическими условиями.

Экспериментальные результаты измерений СКДО ЭСЧ 100 МГц, переданного в конец линии длиной 200 и 147 км с промежуточным оптическим EDFA усилителем, при работающей системе электронной компенсации представлены на рис. 3 (кривые 1, 2). Кривая 3 на рис. 3 — результаты измерений СКДО ЭСЧ 100 МГц, переданного в конец линии длиной 100 км без промежуточного оптического усилителя.

Анализ результатов измерений (см. рис. 3) позволяет сделать вывод, что по мере удлинения линии увеличивается СКДО эталонного сигнала в конце линии. Это связано с возрастанием шумов сигнала на выходе длиной линии как за счёт ослабления уровня сигнала, так и из-за внесения оптическим усилителем дополнительных шумов.

В таблице в соответствии с данными, представленными на рис. 3, приведена нестабильность ЭСЧ 100 МГц, который

был передан с помощью экспериментальной установки в концы линий длинами 100, 147 и 200 км.

Закключение. Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод о том, что с помощью одного промежуточного двунаправленного оптического усилителя EDFA можно передать ЭСЧ 100 МГц водородного хранителя в конец ВОЛС длиной 200 км с СКДО $1 \cdot 10^{-16}$ на интервале усреднения 1 сутки и погрешностью $1,4 \cdot 10^{-17}$ на интервале усреднения 5 суток. Следовательно, по каналу ВОЛС можно передать сигнал ВХ частотой 100 МГц на 200 км практически без потери точности, так как собственная нестабильность выходного сигнала лучших ВХ на интервалах усреднения от 1 до 5 суток в несколько раз выше, чем дополнительно вносимая каналом погрешность.

Л и т е р а т у р а

1. 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.

2. Блинов И. Ю., Гончаров А. С., Пальчиков В. Г., Смирнов Ю. Ф. Государственная служба времени частоты и определения параметров вращения Земли и её деятельность по обеспечению потребителей эталонными сигналами частоты и времени и информацией о точном времени // Вестник метролога. 2016. № 4. С. 7–11.

3. Беляев А. А., Демидов Н. А., Медведев С. Ю., Пастухов А. В., Сахаров Б. А., Блинов И. Ю. Аппаратура водородных хранителей эталонов единиц времени и частоты // Вестник метролога. 2015. № 2. С. 14–23.

4. 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.

5. Малимон А. Н. Передача эталонных сигналов времени и частоты по волоконно-оптическим линиям // Альманах современной метрологии. Менделеево: ВНИИФТРИ. 2016. № 8. С. 198–268.

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

Дата принятия: 23.03.2017.