

**ОДНОВРЕМЕННАЯ ПЕРЕДАЧА ПО ОПТОЭЛЕКТРОННО
КОМПЕНСИРОВАННОЙ ВОЛОКОННОЙ ЛИНИИ
РАДИОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ
ОТ ДВУХ ВОДОРОДНЫХ ХРАНИТЕЛЕЙ**

Р.И. Балаев

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
balaev@vniiftri.ru*

Аннотация. Представлен метод активной оптоэлектронной компенсации возмущений, вносимых волоконной линией, который может обеспечить одновременную передачу по одной линии нескольких высокостабильных радиочастотных сигналов. Описана схема оптического мультиплексирования и оптоэлектронной компенсации, которая обеспечивает совместную высокоточную передачу на двух оптических несущих в одной волоконной линии сигналов частотой 100 МГц от двух водородных хранителей. Экспериментально показано, что при оптоэлектронной компенсации возмущений фазы сигнала, передаваемого по одному каналу, одновременно также обеспечивается компенсация доставленного на конец линии второго сигнала эталонной частоты, передаваемого в этой же линии по другому оптическому каналу.

Приведены экспериментальные результаты измерений нестабильности частоты сигналов 100 МГц, переданных на удалённый конец 200-км оптической линии по разным оптическим каналам. Рассмотрены перспективы использования систем передачи ЭСЧ по волоконно-оптическим линиям связи с активной оптоэлектронной компенсацией для решения задач, стоящих в области метрологии времени и частоты, а также в телекоммуникации.

Ключевые слова: стандарты частоты, передача эталонных сигналов частоты и времени по волоконно-оптическим линиям, спектральное уплотнение каналов.

**SIMULTANEOUS TRANSMISSION
ON OPTOELECTRONICALLY COMPENSATED FIBER
LINE OF RADIO FREQUENCY SIGNALS
FROM TWO HYDROGEN MASERS**

R.I. Balaev

*FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleevo, Moscow region, Russia,
balaev@vniiftri.ru*

Annotation. The method of active optoelectronic compensation of phase disturbances of a transmitted reference radio-frequency signal in an optical fiber, which can provide simultaneous transmission of several highly stable radio frequency signals over one line, is represented. The scheme with implemented optical multiplexing and optoelectronic compensation, which provides joint high-precision transmission on two optical carriers in one fiber line of signals with
Альманах современной метрологии, 2021, № 3 (27)

a frequency of 100 MHz from two hydrogen masers, is described. Experimentally shown that with optoelectronic compensation of phase disturbances of a signal transmitted over one channel, compensation is also provided for the second reference frequency signal delivered to the end of the line and transmitted in the same line through another optical channel.

Experimental results of measuring the frequency instability of 100 MHz signals transmitted to the remote end of a 200 km optical line through different optical channels are represented. The prospects of using systems for transmitting reference frequency signals over fiber-optic communication lines with active optoelectronic compensation for solving problems in the field of time and frequency metrology, as well as in telecommunications are considered.

Key words: frequency standards, standard frequency signal transmission over fiber-optic links, wavelength-division multiplexing.

Введение

В настоящее время существуют различные методы и средства проведения высокоточных сравнений частот и шкал времени территориально разнесенных стандартов и эталонов. Одним из перспективных направлений развития средств проведения высокоточных сравнений частот и шкал времени удалённых друг от друга стандартов и эталонов является использование систем передачи эталонных сигналов по специально выделенным волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС) [1]. Такие системы позволяют сравнивать стандарты, удалённые друг от друга на расстояние до нескольких сотен километров с меньшей погрешностью, чем традиционные средства, которые используют возимые квантовых часы либо системы передачи на основе спутниковых СВЧ-каналов связи [2]. Исследования, направленные на создание различных систем передачи эталонных сигналов для сравнения частот и шкал времени территориально удалённых стандартов и эталонов, актуальны и ведутся сейчас в различных лабораториях. Особый интерес представляют системы, использующие выделенные ВОЛС с устройствами компенсации возмущений фазы передаваемого эталонного сигнала, так они могут обеспечить передачу сигналов наиболее совершенных современных стандартов частоты и времени на значительные расстояния без потери точности.

Следует отметить, что ряд физических процессов в оптическом волокне возмущают передаваемый эталонный сигнал и существенно снижают точностные характеристики эталонного сигнала, доставляемого на удаленный конец ВОЛС [3]. К этим процессам можно отнести: затухание оптической несущей по мере её распространения в волоконно-оптической линии, хроматическую и поляризационно-модовую дисперсию в оптическом волокне, вынужденное обратное рассеяние Манделъштама — Бриллюэна, релеевское рассеяние на микроскопических неоднородностях волокна, а также изменение задержки сигнала в волокне из-за вариации температуры

окружающей среды. Поэтому при использовании ВОЛС для передачи эталонных сигналов необходимо применять специальные пассивные и активные методы компенсации возмущений, оказывающих влияние на фазу распространяющегося по волокну на оптической несущей радиочастотного эталонного сигнала.

Целью настоящей работы являются экспериментальные исследования системы, которая разработана для одновременной передачи нескольких эталонных радиочастотных сигналов на различных оптических каналах в одной волоконной линии при использовании устройства активной оптоэлектронной компенсации возмущений в одном из каналов волоконной линии.

Принцип и методы компенсации возмущений передаваемого по волоконным линиям радиочастотного эталонного сигнала

Принцип активной компенсации фазовых возмущений передаваемого сигнала, вносимых каналом ВОЛС, основывается на двунаправленном (туда и обратно) распространении эталонного сигнала в одном и том же волокне, а также на предположении, что при прямом и обратном распространении сигнала он подвергается одинаковым возмущениям. Предположение об одинаковости возмущений выполняется с высокой степенью точности, если скорость изменения температуры линии не чрезмерно высока и если длины волн оптических несущих для сигналов, распространяющихся по волокну в прямом и обратном направлениях, совпадают.

Существуют различные реализации принципа активной компенсации фазовых возмущений передаваемого сигнала, вносимых каналом ВОЛС. Чаще всего используется электронный метод компенсации. Он основывается на предварительной компенсационной электронной коррекции фазы радиочастотного сигнала до подачи его на вход модуляции оптической несущей, генерируемой полупроводниковым лазером, подключённым к началу волоконной линии.

Но более эффективно устранять вносимые каналом ВОЛС возмущения можно путём подавления или компенсации их путём непосредственного действия на оптический канал, по которому распространяется на оптической несущей эталонный радиочастотный сигнал. Реализация такого метода требует прямого активного воздействия на оптическое волокно или на несущую, распространяющуюся в волокне с целью компенсации возмущений фазы передаваемого на оптической несущей радиочастотного сигнала. Методы, которые реализуют компенсационную коррекцию возмущений фазы передаваемого сигнала путём воздействия на оптический канал или на несущую, получили название оптоэлектронных методов компенсации [4, 5].

Так, активный оптоэлектронный метод компенсации можно реализовать путём коррекции фазы передаваемого эталонного сигнала за счёт изменения длины оптической линии, управляемой оптической линией задержки, включённой последовательно в линию.

Сущность метода активной оптоэлектронной компенсации фазовых возмущений, вносимых каналом ВОЛС, с помощью управляемой оптической линии задержки понятна из упрощённой схемы, представленной на рис. 1.

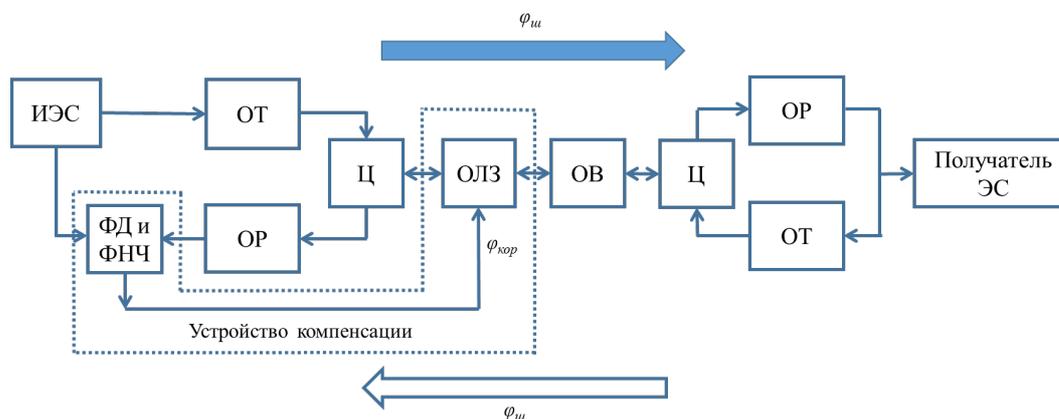


Рис. 1. Упрощённая схема передачи ЭСЧ с оптоэлектронным устройством компенсации возмущений, вносимых линией: ИЭС — источник эталонного сигнала; ОВ — линия из оптического волокна; Ц — оптический циркулятор; ОТ — оптический трансмиттер; ОР — оптический ресивер; ОЛЗ — управляемая оптическая линия задержки; ФД — фазовый детектор; ФНЧ — фильтр нижних частот; ЭС — эталонный сигнал

Отметим, что на рис. 1 два оптических циркулятора Ц, подключённых к концам оптической линии ОВ, обеспечивают разделение оптических сигналов, распространяющихся во встречных направлениях. Из сравнения фаз двух радиочастотных сигналов — эталонного, который на оптической несущей отправляется в оптическую линию, и сигнала, проделавшего путь по линии на оптической несущей в одну сторону и обратно — на фазовом детекторе ФД выделяется сигнал фазовой ошибки, который будет пропорционален вносимым линией интегральным возмущениям фазы переданного эталонного сигнала частоты (ЭСЧ). Этот сигнал фазовой ошибки используется для коррекции фазы передаваемого ЭСЧ путём изменения длины оптической линии с помощью управляемой оптической линии задержки ОЛЗ, которая последовательно включена в основную оптическую линию ОВ. Отметим, что коррекция фазы ЭСЧ с помощью ОЛЗ осуществляется одновременно как при распространении сигнала в линии в прямом, так и в обратном направлении.

Уравнения, поясняющие работу системы передачи ЭСЧ с оптоэлектронной компенсацией

На рис. 1 интегральное шумовое возмущение фазы сигнала при прохождении им канала ВОЛС в одном направлении обозначено $\varphi_{ш}$. После пробега сигнала по ВОЛС «туда и обратно» интегральное шумовое возмущение фазы сигнала будет равно $2\varphi_{ш}$. Коррекция фазовых возмущений ЭСЧ, накапливаемых при его распространении по ВОЛС, осуществляется путём изменения в момент времени t длины линии на величину сигнала ошибки $\varphi_{кор}(t)$ с помощью управляемой оптической линии задержки ОЛЗ:

$$2\varphi_{кор}(t) = -2\varphi_{ш}(t). \quad (1)$$

Коэффициент два в выражении (1) отражает тот факт, что шумовые и корректирующие возмущения воздействуют на фазу передаваемого сигнала ЭСЧ при распространении его по линии как «туда», так и «обратно». Поэтому система передачи с активной оптоэлектронной компенсацией всегда реализует симметричную схему компенсации, когда одновременно корректируются фазы сигналов, распространяющихся по линии в противоположных направлениях.

Корректирующий фазу сигнал ошибки $\varphi_{кор}(t)$ вырабатывается фазовым детектором ФД, а затем, пройдя фильтр нижних частот ФНЧ, усиливается в электронном контроллере, входящем в состав управляемой ОЛЗ, и обеспечивает непрерывную автоподстройку длины оптической линии передачи ЭСЧ, компенсируя возмущения фазы ЭСЧ, вносимые линией.

Для пояснения работы системы передачи ЭСЧ с оптоэлектронной компенсацией рассмотрим выражения для фаз передаваемого радиочастотного сигнала у начала оптической линии, в её конце и после того, как сигнал пройдёт двойной путь «туда и обратно» по линии.

По ВОЛС передаётся «туда и обратно» эталонный радиочастотный сигнал с частотой $\omega_{ЭТ}$ равной, например, 100 МГц с начальной фазой $\varphi_{ЭТ}$ и полной фазой равной $\Phi_{ЭТ}(t)$. Будем считать, что полная фаза гармонического эталонного сигнала на входе в линию $\Phi_{вх}(t)$ равна эталонной:

$$\Phi_{вх}(t) = \Phi_{ЭТ}(t) = \omega_{ЭТ}t + \varphi_{ЭТ}. \quad (2)$$

На фазовом детекторе ФД (см. рис. 1) сравниваются два сигнала — эталонный, подаваемый на вход линии, и сигнал, пробежавший по линии «туда и обратно». Будем считать, что фаза ЭСЧ на входе в линию равна эталонной. При работающей петле обратной связи фаза сигнала на удалённом конце линии $\Phi_{вых}(t)$ должна соответствовать фазе эталонного сигнала $\Phi_{ЭТ}(t)$, поступающего на вход ВОЛС. Под понятием «соответствовать» в

данном случае понимается то, что фаза сигнала на удалённом конце линии $\Phi_{\text{ВЫХ}}(t)$ может иметь по отношению к $\Phi_{\text{ЭТ}}(t)$ не изменяющийся со временем постоянный фазовый сдвиг, то есть:

$$\Phi_{\text{ВЫХ}}(t) - \Phi_{\text{ЭТ}}(t) = \text{const.} \quad (3)$$

Так как постоянный фазовый сдвиг не влияет на величину частоты сигнала, то, не нарушая общего характера выводов, ниже будем считать, что const в выражении (3) равна нулю.

Покажем, как в схеме, представленной на рис. 1, при работе схемы опто-электронной компенсации, то есть при работающей петле обратной связи, достигается соотношения фаз такое, что фаза на выходе линии $\Phi_{\text{ВЫХ}}(t)$ будет соответствовать эталонной $\Phi_{\text{ЭТ}}(t)$.

Продетектированный фотоприёмником в оптическом ресивере ОР на удалённом конце волоконной линии сигнал после его распространения от начала до конца линии будет иметь фазу $\Phi_{\text{ВЫХ}}(t)$:

$$\Phi_{\text{ВЫХ}}(t) = \omega_{\text{ЭТ}}t + \varphi_{\text{ЭТ}} + \varphi_{\text{Ш}} + \varphi_{\text{КОР}}, \quad (4)$$

где $\varphi_{\text{Ш}}$ — интегральное шумовое возмущение фазы передаваемого сигнала при его распространении по линии в одну сторону; $\varphi_{\text{КОР}}$ — величина коррекции фазы передаваемого сигнала управляемой оптической линией задержки ОЛЗ.

Обратно вернувшийся оптический сигнал, испытавший такое же фазовое возмущение (задержку) на обратном пути, после детектирования фотоприёмником в ОР у начала волоконной линии будет иметь фазу:

$$\Phi_{\text{ОБР}}(t) = \omega_{\text{ЭТ}}t + \varphi_{\text{ЭТ}} + 2\varphi_{\text{Ш}} + 2\varphi_{\text{КОР}}. \quad (5)$$

На фазовом детекторе ФД перемножаются и сравниваются фазы сигналов (2) и (5). На выходе ФД получается сигнал ошибки $V_{\text{ОШ}}(t)$, пропорциональный разности фаз сигналов (2) и (5):

$$V_{\text{ОШ}}(t) \propto 2\varphi_{\text{Ш}} + 2\varphi_{\text{КОР}}. \quad (6)$$

При работающей системе фазовой автоподстройки сигнал ошибки (6) стремится к нулю, потому, что в полосе слежения петли ФАПЧ выполняется соотношение фаз:

$$\varphi_{\text{КОР}} = -\varphi_{\text{Ш}}. \quad (7)$$

С учётом (7) из (4) получаем, что сигнал на выходе волоконно-оптической линии будет иметь фазу:

$$\Phi_{\text{ВЫХ}}(t) = \omega_{\text{ЭТ}}t + \varphi_{\text{ЭТ}}. \quad (8)$$

Следовательно, продетектированный фотоприёмником сигнал на удалённом конце волоконной линии будет в каждый момент времени иметь фазу $\Phi_{\text{ВЫХ}}(t)$ (8) соответствующую фазе эталонного сигнала $\Phi_{\text{ВХ}}(t)$ (2), подаваемого на вход линии.

Экспериментальная установка

На рис. 2 представлена упрощённая схема экспериментальной установки. На рис. 3 – её внешний вид.

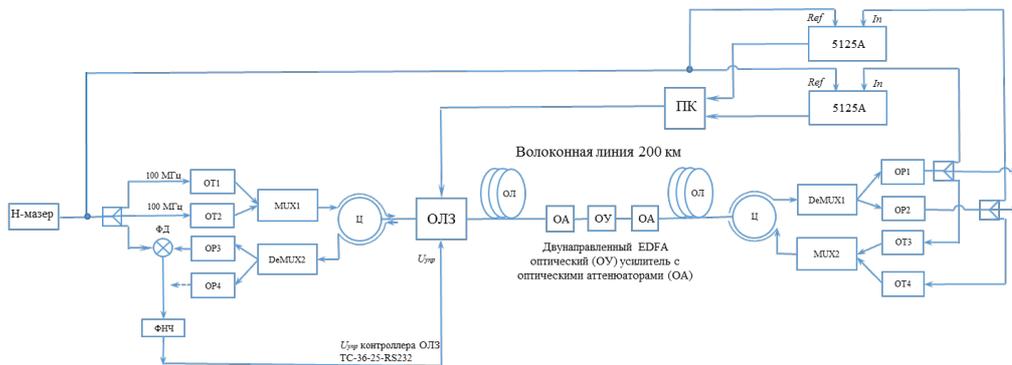


Рис. 2. Упрощённая схема системы передачи с оптоэлектронной компенсацией ЭСЧ 100 МГц на двух оптических каналах в 200-км линии: Н-мазер — водородный хранитель (ВХ); OT1...OT4 — оптические передатчики (на основе DFB-лазеров); OP1...OP4 — оптические приёмники (фотоприёмники с усилителем); Ц — оптические циркуляторы; ОЛЗ — управляемая оптическая линия задержки; ОА — оптический аттенуатор; ОУ — двунаправленный оптический EDFA усилитель с оптическими аттенуаторами (ОА); ОЛ — лабораторные катушки оптического волокна по 100 км; ПК — персональный компьютер; 5125A — измерители нестабильности/анализаторы фазовых шумов Microsemi 5125A; ФД — фазовый детектор; ФНЧ — фильтр нижних частот; MUX 1 и 2 — оптические мультиплексоры; DeMUX 1 и 2 — оптические демультиплексоры

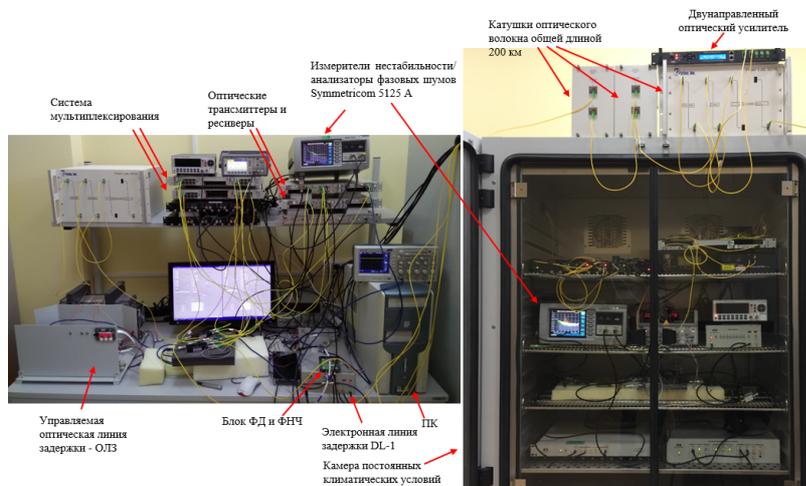


Рис. 3. Внешний вид системы передачи с оптоэлектронной компенсацией ЭСЧ 100 МГц на двух оптических каналах в 200-км линии

Ключевым элементом в схеме, реализующей оптоэлектронную компенсацию, является оптическая управляемая линия задержки (ОЛЗ). Её внешний вид представлен на рис. 4.



Рис. 4. Внешний вид управляемой оптической линии задержки

ОЛЗ состоит из катушки оптического волокна длиной $\sim 7,6$ км, намотанного на алюминиевый цилиндрический каркас, на торцах которого размещены две мощные платы Пельтье. При изменении температуры катушки изменяется длина волокна и, соответственно, изменяется фаза сигнала на выходе из катушки. Температурой плат Пельтье управляет контроллер. У плат Пельтье температура пропорциональна поступающему с блока «ФД и ФНЧ» сигналу ошибки $U_{упр}$, который подаётся на входы контроллера.

Блок выработки сигнала ошибки (блок «ФД и ФНЧ») — это узел, в котором вырабатывается сигнал ошибки фазовым детектором (ФД) и с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ) осуществляются фильтрация и усиление сигнала ошибки. Вырабатываемый блоком сигнал ошибки $U_{упр}$ поступает на контроллер ОЛЗ, который управляет температурой её катушки, а, следовательно, и фазой 100 МГц ЭСЧ, который распространяется на оптической несущей в волокне катушки ОЛЗ.

В экспериментальной установке были использованы две системы CWDM мультиплексирования, которые имели по восемь каналов с шириной пропускания 20 нм, в числе которых использовались два канала 1550 ± 10 нм и 1530 ± 10 нм. Это позволило в оптических трансмиттерах ОТ использовать DFB-лазеры, которые имели длины волн соответственно для ОТ1 и ОТ3 $\lambda_1 = 1551$ нм и для ОТ2 и ОТ4 $\lambda_2 = 1534$ нм, что соответствует номерам оптических каналов спектрального диапазона С (1530...1565 нм) 55 и 53 соответственно. Как видно на рис. 2 на концах длинной оптической линии ОЛ устанавливались системы оптического мультиплексирования (MUX 1 и 2) и демупльтиплексирования

(DeMUX 1 и 2), что обеспечивало перед подачей в волокно объединять излучения лазеров OT1 и OT2 (OT3 и OT4) с разной длиной волны и выполнять разделение излучений перед последующим отдельным детектированием их на противоположных концах линии фотоприёмниками OP1 и OP2 (OP3 и OP4).

Из-за затуханий оптической несущей в длинной ВОЛС она ослабляется. Из-за этого трудно получить необходимый уровень оптического сигнала при длине линии более 100 км. Для обеспечения работы в более длинных линиях необходимо использовать промежуточные волоконно-оптические усилители на оптическом волокне, легированном ионами эрбия (оптические EDFA-усилители), которые имеют низкий уровень шумов. Так как в системе применяется двунаправленная передача ЭСЧ по ВОЛС, этим вызвана необходимость использования двунаправленного оптического EDFA-усилителя, особенностью которого является то, что он усиливает сигналы, которые распространяются в одном волокне как в одну сторону, так и в обратную. Он имеет два основных оптических разъёма, с помощью которых он включается примерно посередине длинной многокилометровой оптической линии.

На экспериментальной установке были выполнены измерения СКДО переданного сигнала 100 МГц на конец 200 км линии относительно выходного сигнала водородного хранителя, который подавался на оптические трансмиттеры OT1 и OT2, работающие соответственно на каналах 55 ($\lambda_1 = 1551$ нм) и 53 ($\lambda_2 = 1534$ нм). Измерения выполнялись как при выключенной, так и при включенной компенсации в канале 55 ($\lambda_1 = 1551$ нм).

Результаты измерений погрешности передачи эталонных 100 МГц сигналов по 200-км волоконной линии

При экспериментальных исследованиях активной оптоэлектронной схемы компенсации были применены два измерителя нестабильности частоты Symmetricom 5125A. В качестве опорного сигнала для них использовался эталонный сигнал 100 МГц с выхода водородного хранителя. С помощью двух Symmetricom 5125A одновременно измерялись на разных интервалах усреднения СКДО частот сигналов 100 МГц на выходе 200 км ВОЛС, переданных от водородного хранителя по двум оптическим каналам (рис. 5–7).

На рис. 5 представлено СКДО сигнала, переданного на удалённый конец 200-км линии при выключенной компенсации.

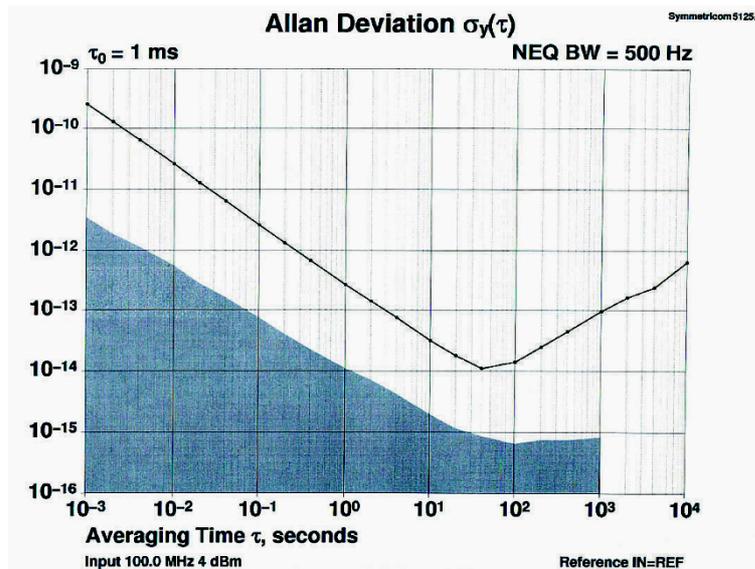


Рис. 5. СКДО сигнала, принимаемого на конце волоконно-оптической линии с выключенной компенсацией, относительно эталонного сигнала ВХ на разных интервалах усреднения (оптическая несущая 1551 нм)

На рис. 6 и 7 представлены СКДО сигналов, переданных на удалённый конец 200-км линии при включенной компенсации. Следует отметить, что компенсация осуществлялась устройством компенсации на основании сравнения фаз сигнала, передаваемого по одному из каналов с $\lambda_1 = 1551$ нм.

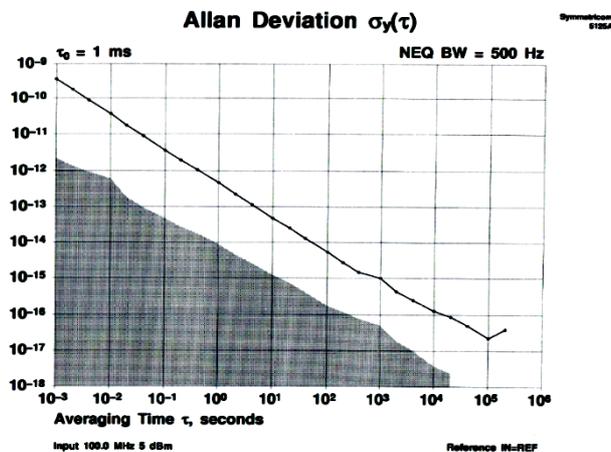


Рис. 6. СКДО сигнала, принимаемого на конце 200-км волоконно-оптической линии, относительно эталонного сигнала ВХ на разных интервалах усреднения (оптическая несущая 1551 нм)

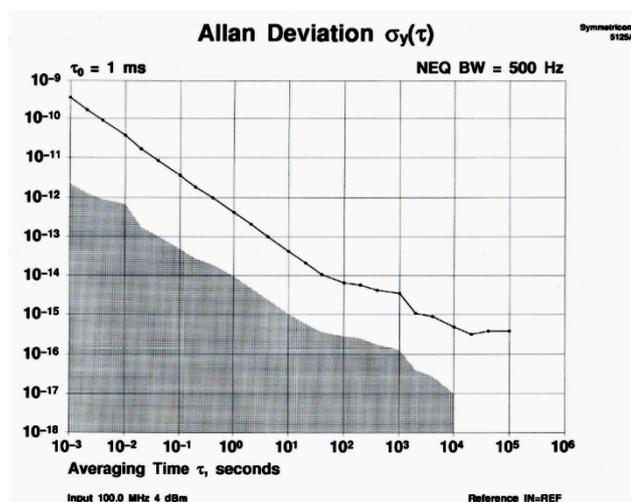


Рис. 7. СКДО сигнала, принимаемого на конце 200-км волоконно-оптической линии, относительно эталонного сигнала ВХ на разных интервалах усреднения (оптическая несущая 1534 нм)

В таблицу сведены для сравнения данные о погрешности передачи эталонного сигнала 100 МГц на удалённый конец волоконной линии при выключенном и работающем в одном из каналов устройстве компенсации.

Таблица
Результаты измерений СКДО при передаче по двум оптическим каналам ЭСЧ ВХ 100 МГц на конец 200-км ВОЛС

Время усреднения, с	СКДО ЭСЧ 100 МГц, переданных по 200-км ВОЛС			
	С выключенной компенсацией		С компенсацией, работающей в канале с $\lambda_1 = 1551$ нм	
	$\lambda_1 = 1551$ нм	$\lambda_2 = 1534$ нм	$\lambda_1 = 1551$ нм	$\lambda_2 = 1534$ нм
1	2	3	4	5
1	$4,5 \cdot 10^{-13}$	$4,6 \cdot 10^{-13}$	$4,5 \cdot 10^{-13}$	$4,3 \cdot 10^{-13}$
10	$4,9 \cdot 10^{-14}$	$4,7 \cdot 10^{-14}$	$4,8 \cdot 10^{-14}$	$4,1 \cdot 10^{-14}$
100	$1,5 \cdot 10^{-14}$	$1,6 \cdot 10^{-14}$	$5,3 \cdot 10^{-15}$	$6,4 \cdot 10^{-15}$
1000	$1,0 \cdot 10^{-13}$	$0,9 \cdot 10^{-13}$	$9,9 \cdot 10^{-16}$	$3,5 \cdot 10^{-15}$
10000	$7,0 \cdot 10^{-13}$	$7,0 \cdot 10^{-13}$	$1,2 \cdot 10^{-16}$	$4,8 \cdot 10^{-16}$
100000	—	$1,0 \cdot 10^{-12}$	$2,3 \cdot 10^{-17}$	$3,8 \cdot 10^{-16}$
200000	—	—	$3,8 \cdot 10^{-17}$	—

При включённой компенсации точность передачи ЭСЧ по длинной ВОЛС существенно возрастает на интервалах измерения больше 100 с. Отметим, что нестабильность частоты сигналов на выходе линии при выключенной компенсации велика по причине медленных с периодом от нескольких часов до суток вариаций температуры в лаборатории. Включение устройства компенсации в основном канале ($\lambda_1 = 1551$ нм) обеспечивает компенсацию возмущений, вызванных температурными вариациями, и для сигналов, передаваемых в других каналах в волоконной линии. Но точность компенсации в этих других каналах обеспечивается с меньшей эффективностью.

Так, при включённом устройстве компенсации в основном канале ($\lambda_1 = 1551$ нм) нестабильность частоты переданного по нему сигнала на суточном интервале усреднения улучшается в $\sim 40\,000$ раз, и в канале с $\lambda_2 = 1534$ нм в 2600 раз. Тот факт, что компенсация в других каналах менее эффективна можно объяснить тем, что температурный коэффициент хроматической дисперсии имеет отличающиеся значения для разных каналов. Но в то же время необходимо отметить, что погрешность передачи ЭСЧ ВХ переданного по другим каналам 200-км линии невелика по сравнению с собственной нестабильностью частоты лучших образцов водородных хранителей, которая составляет $3 \cdot 10^{-16}$ на суточном интервале усреднения.

Заключение

Рассмотренная система передачи ЭСЧ с оптоэлектронной компенсацией может быть использована для решения задач, стоящих в области метрологии времени и частоты — при передаче эталонных сигналов для сравнения частот и шкал времени территориально удалённых стандартов и эталонов. Система передачи ЭСЧ с оптоэлектронной компенсацией имеет важное преимущество по сравнению с системами с электронной компенсацией, которые используют предварительную корректировку фазы сигнала перед отправкой его в линию. Использование описанной выше системы с оптоэлектронной компенсацией с управляемой ОЛЗ позволяет при коррекции передачи сигнала в одном волоконном канале обеспечивать одновременно достаточно эффективную компенсацию возмущений сигналов, передаваемых по другим каналам в этом же оптическом волокне. Такая система передачи с оптоэлектронной компенсацией открывает перспективы проведения по одной волоконной линии высокоточных сравнений частот нескольких территориально разнесённых водородных хранителей, которые, например, входят в состав групповых эталонов времени и частоты.

Помимо области метрологии времени и частоты использование системы передачи ЭСЧ по ВОЛС с активной оптоэлектронной компенсацией может найти применение в сфере телекоммуникации, например, для организации

непрерывных сличений по выделенным волоконно-оптическим линиям водородных хранителей из состава эталонной базы Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ) с источниками синхронизации сетей связи. К такому оборудованию можно отнести первичные эталонные источники (ПЭИ), первичные эталонные генераторы (ПЭГ), вторичные задающие генераторы (ВЗГ), первичные эталоны времени и частоты ПЭВЧ (и модернизированные уПЭВЧ), модернизированные ПЭИ — источники сигналов синхронизации ИСС (и модернизированные уИСС) [6].

Организация высокоточных сличений по ВОЛС будет важным звеном работ по созданию системы формирования прецизионной шкалы времени национальной сети связи [7]. Но для выполнения прецизионных сличений по ВОЛС возникнет необходимость использования активных систем компенсации возмущений, вносимых волоконными линиями. Проведение по выделенным волоконно-оптическим линиям высокоточных сличений нового поколения источников синхронизации сетей связи с водородными хранителями эталонной базы ГСВЧ позволит обеспечить прослеживаемость формируемой шкалы времени национальной сети связи к национальной шкале времени РФ UTC (SU) и достижение требуемых метрологических характеристик частотно-временного обеспечения источников синхронизации сетей связи [8, 9].

Список литературы

1. Балаев Р.И., Федорова Д.М., Малимон А.Н., Курчанов А.Ф., Бакулинская В.В. Методы передачи эталонных сигналов частоты и времени по волоконно-оптическим линиям с компенсацией возмущений, вносимых линией // Мир измерений. — 2018. — № 1. — С. 16–22.
2. Балаев Р.И., Донченко С.И., Блинов И.Ю., Малимон А.Н., Колмогоров О.В., Воронин В.А. Обеспечение потребителей эталонными сигналами времени и частоты // Автоматика, связь, информатика. — 2019. — № 3. — С. 12–15.
3. Балаев Р.И., Шибеева Д.М., Малимон А.Н., Курчанов А.Ф. Характеристики фазостабильных коаксиальных и оптических кабелей, используемых для передачи информации об эталонном времени и частоте // Альманах современной метрологии. — 2015. — № 2. — С. 165–179.
4. Huang S., Calhoun M., Tjoelker R. Optical Links and RF Distribution for Antenna Arrays // Proc. IEEE Intern. Frequency Control Symp. and Expos. Miami, USA. — 2006. — P. 637–641. — URL: <https://trs.jpl.nasa.gov/bitstream/handle/2014/40275/06-2522.pdf?sequence=1>.

5. Lopez O., Amy-Klein A., Lours M., Chardonnet C., and Santarelli G. High-resolution microwave frequency dissemination on an 86-km urban optical link // Applied Physics B. — 2010 — V. 98. — P. 723–727. — URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00340-009-3832-1.pdf>.
6. Колтунов М.Н., Шварц М.Л. Актуальные вопросы применения оборудования частотно-временного обеспечения на ЕСЭ России // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. — 2018. — Т. 9. — № 2. — С 113–120.
7. Рыжков А.В., Шварц М.Л. Пути формирования прецизионной шкалы времени национальной сети связи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2020. — Т. 14. — № 2. — С. 17–24.
8. ГОСТ 8.567–2014. Измерения времени и частоты. Термины и определения. ГСИ.
9. Балаев Р.И., Блинов И.Ю., Малимон А.Н., Шварц М.Л. Метрологическое обеспечение сетей связи нового поколения 5G // Измерительная техника. — 2019. — № 11. — С. 36–42.

Статья поступила в редакцию: 31.05.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 2021 г.

Статья принята в работу: 01.07.2021 г.