

II. Координатно-временные измерения

УДК 535.8

**АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ ЭФФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ
ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ
КВАНТОВОГО НИВЕЛИРА, ОБУСЛОВЛЕННЫХ
ИЗМЕНЕНИЯМИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ВОЛС****О.В. Колмогоров**

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

Аннотация. Рассмотрены основные факторы, влияющие на фазу модулированных оптических сигналов, передаваемых по волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) с целью обеспечения возможности сравнения частот удалённых стандартов частоты и времени, входящих в состав квантового нивелира. Представлены результаты расчётов изменений фазы сигналов на выходе ВОЛС, вызванных изменениями внешних воздействий (температуры и давления) с учётом возможных вариаций оптических и механических свойств оптических волокон.

Ключевые слова: волоконно-оптическая линия связи, стандарт частоты и времени, сравнение частот, квантовый нивелир, разность фаз.

**ANALYSIS OF PHASE EFFECTS ARISING DURING
THE TRANSMISSION OF OPTICAL SIGNALS
OF A QUANTUM LEVEL DUE TO CHANGES
IN EXTERNAL INFLUENCES
ON THE FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINE****O.V. Kolmogorov**

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
kolmogorov@vniiftri.ru

Abstract. The main factors affecting the phase of modulated optical signals transmitted over a fiber-optic communication line (FOCL) are considered in order to provide the possibility of comparing the frequencies of remote frequency and time standards that are part of the quantum level. The results of calculations of changes in the phase of signals at the FOCL output caused by changes in external influences (temperature and pressure) are presented, taking into account possible variations in the optical and mechanical properties of single-mode fibers.

Keywords: fiber-optic communication line, frequency and time standard, frequency comparison, quantum level, phase difference.

Введение

Повышение точности существующей в Российской Федерации системы высот на протяжении всей её территории, проведение работ по реализации Международной системы отсчёта высот (IHRS) предусматривают измерения разности гравитационных потенциалов в исследуемых точках поверхности Земли с целью определения разности ортометрических высот этих точек.

Альманах современной метрологии, 2022, № 1 (29)

Согласно общей теории относительности, с разностью гравитационных потенциалов связаны такие эффекты, как гравитационное смещение частоты и гравитационное замедление времени. Для измерений этих эффектов предложено использовать квантовый нивелир [1–3]. Он представляет собой комплекс средств, включающий два разнесённых в пространстве стандарта частоты и времени (пару взаимосвязанных атомных часов), а также систему измерений расхождения их шкал времени или систему измерений разности их частот. Требования к точности сравнения шкал времени СЧВ предусматривают погрешность менее 1 пс, а к точности сравнения частот — относительную погрешность не более $10^{-17} \dots 10^{-19}$ с [4]. Один из основных вариантов построения такой системы предполагает использование ВОЛС для передачи сигналов между пунктами размещения этих стандартов частоты и времени (СЧВ) с модуляцией оптической несущей сигналами от СЧВ.

Оптическое волокно, как среда, в которой распространяются сигналы, оказывает влияние на их параметры, особенно это характерно для ВОЛС длиной десятки километров и более, где сказываются такие факторы, как ослабление сигнала, хроматическая и поляризационная модовая дисперсии [5–6]. К этим процессам также относятся изменения задержки сигнала в волокне из-за вариаций температуры и давления окружающей среды [7]. Поэтому нестабильность внешних воздействий на ВОЛС является одним из факторов, ограничивающих точность квантового нивелира.

Целью настоящей работы является исследование влияния нестабильности внешних воздействий на ВОЛС (изменения температуры и давления) на временные и фазовые характеристики передаваемых по ВОЛС сигналов от стандартов частоты и времени, входящих в состав квантового нивелира.

Анализ влияния нестабильности температуры на фазовые характеристики сигналов, передаваемых по ВОЛС

Задержка распространения сигнала в оптическом волокне определяется длиной волокна и групповым показателем преломления волокна. В свою очередь, длина волокна и его показатель преломления зависят от внешних воздействий: температуры, давления, а также механических напряжений в волокне, возникающих при изгибах, натяжении и других деформациях [7, 8]. Перечисленные факторы влияют на временные характеристики сигналов, передаваемых по ВОЛС: фазу выходного сигнала и время его задержки (запаздывания). При исследованиях по созданию квантового нивелира возникает задача оценить границы возможных вариаций фазы выходного сигнала и задержки его распространения при изменении внешних условий и возможных отличиях характеристик реальных оптических волокон от типовых справочных значений.

Выведем соотношения для оценки временных и фазовых характеристик оптических сигналов на выходе ВОЛС, рассматривая модуляцию интенсивности излучения лазерных источников гармоническим радиочастотным сигналом (в частности, сигналом эталонной частоты, поступающим от СЧВ, входящего в состав квантового нивелира). Примем допущение, что спектр излучения источников достаточно узкий и влияние хроматической и поляризационной модовой дисперсий на параметры сигнала пренебрежимо мало.

Представим сигнал на входе ВОЛС в виде:

$$S_{\text{вх}} = A_{\text{вх}} \cdot \sin(\omega_{\Gamma} \cdot t + \varphi_0), \quad (1)$$

где $A_{\text{вх}}$ — амплитуда; ω_{Γ} — циклическая частота модулирующего колебания ($\omega_{\Gamma} = 2\pi f_{\Gamma}$, где f_{Γ} — частота сигнала, поступающего с СЧВ); φ_0 — начальная фаза.

Сигнал на выходе ВОЛС:

$$S_{\text{вых}} = A_{\text{вых}} \cdot \sin(\omega_{\Gamma} \cdot t + \varphi_0 - \varphi_{\text{ов}}), \quad (2)$$

где $A_{\text{вых}}$ — амплитуда; $\varphi_{\text{ов}}$ — сдвиг фазы сигнала, вносимый оптоволоконном ($\varphi_{\text{ов}} = \omega_{\Gamma} \cdot \tau_{\text{ов}}$, $\tau_{\text{ов}}$ — задержка распространения сигнала в оптоволокне).

Задержка распространения сигнала в оптическом волокне с показателем преломления n :

$$\tau_{\text{ов}} = L_{\text{ов}} \cdot n/c, \quad (3)$$

где $L_{\text{ов}}$ — геометрическая длина волокна; c — скорость света в вакууме.

Задержка $\tau_{\text{ов}}$ зависит от длины оптоволоконна, показателя преломления n , который в свою очередь зависит от температуры, механических напряжений, длины волны излучения. Сдвиг фазы сигнала, вносимый оптоволоконном, с учётом выражения для задержки (3) запишем в виде:

$$\varphi = \omega_{\Gamma} \cdot L_{\text{ов}} \cdot n/c. \quad (4)$$

Найдём приращение фазы при изменении параметров волокна от температуры

$$\frac{d\varphi}{dT} = \frac{d}{dT} [\omega_{\Gamma} \cdot L_{\text{ов}}(T) \cdot n(T) / c] \quad (5)$$

и приведём его к виду, удобному для проведения расчётов:

$$\frac{d\varphi}{dT} = \frac{\omega_{\Gamma}}{c} \cdot L \cdot \left[\frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{dT} \cdot n + \frac{dn}{dT} \right]. \quad (6)$$

Для проведения вычислений приращений фазы используем данные о значениях температурных коэффициентов: $\frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{dT} = 5,6 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$ — коэффициент температурного расширения кварца [9]; $\frac{dn}{dT} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$ — температурный коэффициент изменения показателя преломления для одномодового волокна на длине волны 1550 нм [9].

Помимо изменений температуры, волокна в оптическом кабеле также могут подвергаться и механическим воздействиям: перепадам давления и деформациям, которые влияют на задержку распространения сигнала в ВОЛС и фазу сигнала на выходе. Проведём численную оценку влияния этих воздействий.

Запишем выражение для приращения фазы сигнала на выходе оптического волокна при механических воздействиях на волокно (давлении, растяжении), где σ — механическое напряжение в волокне:

$$\frac{d\varphi}{d\sigma} = \frac{d}{d\sigma} [\omega_r \cdot L_{\text{ов}}(\sigma) \cdot n(\sigma) / c], \quad (7)$$

и приведём его к виду, включающему коэффициенты для учёта растяжения волокна и изменения его показателя преломления при деформации:

$$\frac{d\varphi}{d\sigma} = \frac{\omega_r}{c} \cdot L \cdot \left[\frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{d\sigma} \cdot n + \frac{dn}{d\sigma} \right]. \quad (8)$$

Для указанных коэффициентов используем при расчётах следующие значения [9]: $\left[\frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{d\sigma} \right]^{-1} = 7,2 \cdot 10^{10}$ Па; $\frac{dn}{d\sigma} = -3,4 \cdot 10^{-12}$ 1/Па.

Заметим, что приведённые выше численные значения коэффициентов получены на основе справочных данных об оптических материалах (кварце) и об исследованных отдельных образцах оптических волокон. Однако большинство выпускаемых в настоящее время световодов имеют многослойную структуру (пример такой структуры световода приведён на рис. 1). Световод состоит из сердцевины, оболочки и защитного покрытия, которое, в свою очередь, может состоять из нескольких слоёв. Перечисленные слои имеют различающиеся коэффициенты температурного расширения и разные упругие свойства, поэтому значения результирующих коэффициентов, характеризующих температурные и упругие свойства оптических кабелей различных марок, будут несколько отличаться от указанных в источниках [7–9] приближительных значений.

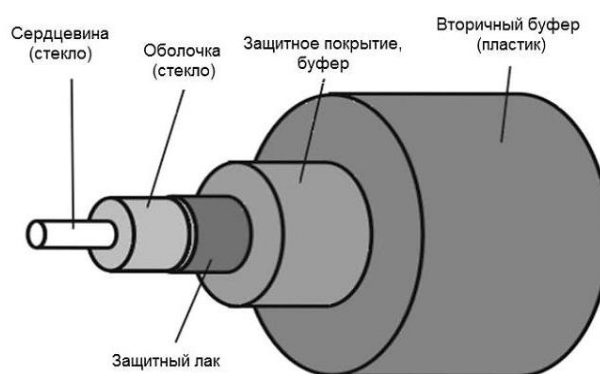


Рис. 1. Структура световода

Используя выражения (6) и (8) проведём расчёт изменений временных и фазовых характеристик оптических сигналов на выходе ВОЛС различной длины в условиях изменения внешних воздействующих факторов (температуры и давления) и возможных отклонений от типовых справочных значений коэффициентов, характеризующих свойства оптического волокна.

Результаты расчётов изменений характеристик оптических сигналов, передаваемых по ВОЛС длиной 50 и 100 км, при изменении температуры на 1°C для частоты модуляции 10 МГц приведены в таблицах 1 и 2, а для частоты модуляции 100 МГц — в таблицах 3 и 4.

Таблица 1
Результаты расчётов для ВОЛС длиной 50 км и частоты 10 МГц

Исходные данные: частота — 10 МГц; показатель преломления — 1,466; длина ВОЛС — 50 км					
Температурный коэффициент показателя преломления, $1/^\circ\text{C}$	Температурный коэффициент удлинения световода, $1/^\circ\text{C}$	Температурный коэффициент фазового сдвига, $\text{рад}/^\circ\text{C}$	Температурный коэффициент фазового сдвига, $\text{град}/^\circ\text{C}$	Абсолютное изменение задержки, с	Температурный коэффициент задержки, $\text{с}/(\text{км} \cdot ^\circ\text{C})$
$1,1 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	0,124	7,09	$1,97 \cdot 10^{-9}$	$3,94 \cdot 10^{-11}$
	$6,6 \cdot 10^{-7}$	0,125	7,18	$1,99 \cdot 10^{-9}$	$3,99 \cdot 10^{-11}$
	$7,6 \cdot 10^{-7}$	0,127	7,27	$2,02 \cdot 10^{-9}$	$4,04 \cdot 10^{-11}$
$1,2 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	0,134	7,69	$2,14 \cdot 10^{-9}$	$4,27 \cdot 10^{-11}$
	$6,6 \cdot 10^{-7}$	0,136	7,78	$2,16 \cdot 10^{-9}$	$4,32 \cdot 10^{-11}$
	$7,6 \cdot 10^{-7}$	0,137	7,87	$2,19 \cdot 10^{-9}$	$4,37 \cdot 10^{-11}$
$1,3 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	0,145	8,29	$2,30 \cdot 10^{-9}$	$4,61 \cdot 10^{-11}$
	$6,6 \cdot 10^{-7}$	0,146	8,38	$2,33 \cdot 10^{-9}$	$4,66 \cdot 10^{-11}$
	$7,6 \cdot 10^{-7}$	0,148	8,47	$2,35 \cdot 10^{-9}$	$4,70 \cdot 10^{-11}$

Таблица 2
Результаты расчётов для ВОЛС длиной 100 км и частоты 10 МГц

Исходные данные: частота — 10 МГц; показатель преломления — 1,466; длина ВОЛС — 100 км					
Температурный коэффициент показателя преломления, $1/^\circ\text{C}$	Температурный коэффициент удлинения световода, $1/^\circ\text{C}$	Температурный коэффициент фазового сдвига, $\text{рад}/^\circ\text{C}$	Температурный коэффициент фазового сдвига, $\text{град}/^\circ\text{C}$	Абсолютное изменение задержки, с	Температурный коэффициент задержки, $\text{с}/(\text{км} \cdot ^\circ\text{C})$
$1,1 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	0,247	14,2	$3,94 \cdot 10^{-9}$	$3,94 \cdot 10^{-11}$
	$6,6 \cdot 10^{-7}$	0,251	14,4	$3,99 \cdot 10^{-9}$	$3,99 \cdot 10^{-11}$
	$7,6 \cdot 10^{-7}$	0,254	14,5	$4,04 \cdot 10^{-9}$	$4,04 \cdot 10^{-11}$
$1,2 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	0,268	15,4	$4,27 \cdot 10^{-9}$	$4,27 \cdot 10^{-11}$
	$6,6 \cdot 10^{-7}$	0,271	15,6	$4,32 \cdot 10^{-9}$	$4,32 \cdot 10^{-11}$
	$7,6 \cdot 10^{-7}$	0,275	15,7	$4,37 \cdot 10^{-9}$	$4,37 \cdot 10^{-11}$
$1,3 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	0,290	16,6	$4,61 \cdot 10^{-9}$	$4,61 \cdot 10^{-11}$
	$6,6 \cdot 10^{-7}$	0,290	16,8	$4,66 \cdot 10^{-9}$	$4,66 \cdot 10^{-11}$
	$7,6 \cdot 10^{-7}$	0,300	16,9	$4,70 \cdot 10^{-9}$	$4,70 \cdot 10^{-11}$

Таблица 3
 Результаты расчётов для ВОЛС длиной 50 км и частоты 100 МГц

Исходные данные: частота — 100 МГц; показатель преломления — 1,466					
Температурный коэффициент показателя преломления, 1/°C	Температурный коэффициент удлинения световода, 1/°C	Температурный коэффициент фазового сдвига, рад/°C	Температурный коэффициент фазового сдвига, град/°C	Абсолютное изменение задержки, с	Температурный коэффициент задержки, с/(км · °C)
$1,1 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	1,24	70,9	$1,97 \cdot 10^{-9}$	$3,94 \cdot 10^{-11}$
	$6,6 \cdot 10^{-7}$	1,25	71,8	$1,99 \cdot 10^{-9}$	$3,99 \cdot 10^{-11}$
	$7,6 \cdot 10^{-7}$	1,27	72,7	$2,02 \cdot 10^{-9}$	$4,04 \cdot 10^{-11}$
$1,2 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	1,34	76,9	$2,14 \cdot 10^{-9}$	$4,27 \cdot 10^{-11}$
	$6,6 \cdot 10^{-7}$	1,36	77,8	$2,16 \cdot 10^{-9}$	$4,32 \cdot 10^{-11}$
	$7,6 \cdot 10^{-7}$	1,37	78,7	$2,19 \cdot 10^{-9}$	$4,37 \cdot 10^{-11}$
$1,3 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	1,45	82,9	$2,30 \cdot 10^{-9}$	$4,61 \cdot 10^{-11}$
	$6,6 \cdot 10^{-7}$	1,46	83,8	$2,33 \cdot 10^{-9}$	$4,66 \cdot 10^{-11}$
	$7,6 \cdot 10^{-7}$	1,48	84,7	$2,35 \cdot 10^{-9}$	$4,70 \cdot 10^{-11}$

Таблица 4
 Результаты расчётов для ВОЛС длиной 100 км и частоты 100 МГц

Исходные данные: частота — 100 МГц; показатель преломления — 1,466					
Температурный коэффициент показателя преломления, 1/°C	Температурный коэффициент удлинения световода, 1/°C	Температурный коэффициент фазового сдвига, рад/°C	Температурный коэффициент фазового сдвига, град/°C	Абсолютное изменение задержки, с	Температурный коэффициент задержки, с/(км · °C)
$1,1 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	2,47	$1,42 \cdot 10^2$	$3,94 \cdot 10^{-9}$	$3,94 \cdot 10^{-11}$
	$6,6 \cdot 10^{-7}$	2,51	$1,44 \cdot 10^2$	$3,99 \cdot 10^{-9}$	$3,99 \cdot 10^{-11}$
	$7,6 \cdot 10^{-7}$	2,54	$1,45 \cdot 10^2$	$4,04 \cdot 10^{-9}$	$4,04 \cdot 10^{-11}$
$1,2 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	2,68	$1,54 \cdot 10^2$	$4,27 \cdot 10^{-9}$	$4,27 \cdot 10^{-11}$
	$6,6 \cdot 10^{-7}$	2,71	$1,56 \cdot 10^2$	$4,32 \cdot 10^{-9}$	$4,32 \cdot 10^{-11}$
	$7,6 \cdot 10^{-7}$	2,75	$1,57 \cdot 10^2$	$4,37 \cdot 10^{-9}$	$4,37 \cdot 10^{-11}$
$1,3 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	2,89	$1,66 \cdot 10^2$	$4,61 \cdot 10^{-9}$	$4,61 \cdot 10^{-11}$
	$6,6 \cdot 10^{-7}$	2,92	$1,68 \cdot 10^2$	$4,66 \cdot 10^{-9}$	$4,66 \cdot 10^{-11}$
	$7,6 \cdot 10^{-7}$	2,95	$1,69 \cdot 10^2$	$4,70 \cdot 10^{-9}$	$4,70 \cdot 10^{-11}$

Полученные результаты показали, что для ВОЛС длиной 50 км различия температурных коэффициентов фазового сдвига при вариациях значений температурных коэффициентов световодов составляют $2,4 \cdot 10^{-2}$ рад/°C (для 10 МГц) и 0,24 рад/°C (для 100 МГц), а для ВОЛС длиной 100 км — 0,05 рад/°C (для 10 МГц) и 0,5 рад/°C (для 100 МГц).

Различия температурных коэффициентов задержки сигнала при вариациях значений температурных коэффициентов световодов составят примерно $8 \text{ пс}/(\text{км} \cdot ^\circ\text{C})$. Различие абсолютных приращений задержки сигнала в рассматриваемых световодах составит 380 пс для ВОЛС длиной 50 км и 760 пс для ВОЛС длиной 100 км.

Также по результатам проведённых исследований установлено, что различия значений показателя преломления волокон разных типов (составляющих от 1,466 до 1,468 для длины волны 1550 нм), заданных для нормальных условий, слабо влияют на величину температурных приращений задержки и фазы передаваемого по ВОЛС сигнала.

Для оценки влияния изменений давления на временные характеристики сигналов, передаваемых по ВОЛС, проведены расчёты с использованием соотношения (8). Результаты расчётов для ВОЛС длиной 50 и 100 км приведены в таблицах 5 и 6. Представленные результаты получены для сигнала частотой 100 МГц, фаза которого более чувствительна к внешним воздействиям, по сравнению с сигналом 10 МГц.

Таблица 5

Результаты расчётов для ВОЛС длиной 50 км и частоты 100 МГц

Исходные данные: частота — 100 МГц; показатель преломления — 1,466; длина ВОЛС — 50 км					
Величина, обратная модулю Юнга (1/E), 1/Па	Коэффициент изменения показателя преломления при механическом напряжении, 1/Па	Коэффициент фазового сдвига, рад/кПа	Коэффициент фазового сдвига, град/кПа	Абсолютное изменение задержки, с	Коэффициент задержки, с/(км·кПа)
$6,2 \cdot 10^{-10}$	$-3,3 \cdot 10^{-12}$	$2,13 \cdot 10^{-3}$	0,122	$3,39 \cdot 10^{-12}$	$6,78 \cdot 10^{-14}$
	$-3,4 \cdot 10^{-12}$	$2,12 \cdot 10^{-3}$	0,121	$3,37 \cdot 10^{-12}$	$6,75 \cdot 10^{-14}$
	$-3,5 \cdot 10^{-12}$	$2,11 \cdot 10^{-3}$	0,121	$3,36 \cdot 10^{-12}$	$6,72 \cdot 10^{-14}$
$7,2 \cdot 10^{-10}$	$-3,3 \cdot 10^{-12}$	$1,78 \cdot 10^{-3}$	0,102	$2,84 \cdot 10^{-12}$	$5,69 \cdot 10^{-14}$
	$-3,4 \cdot 10^{-12}$	$1,77 \cdot 10^{-3}$	0,102	$2,83 \cdot 10^{-12}$	$5,65 \cdot 10^{-14}$
	$-3,5 \cdot 10^{-12}$	$1,77 \cdot 10^{-3}$	0,101	$2,81 \cdot 10^{-12}$	$5,62 \cdot 10^{-14}$
$8,2 \cdot 10^{-10}$	$-3,3 \cdot 10^{-12}$	$1,53 \cdot 10^{-3}$	0,087	$2,43 \cdot 10^{-12}$	$4,86 \cdot 10^{-14}$
	$-3,4 \cdot 10^{-12}$	$1,52 \cdot 10^{-3}$	0,087	$2,41 \cdot 10^{-12}$	$4,83 \cdot 10^{-14}$
	$-3,5 \cdot 10^{-12}$	$1,51 \cdot 10^{-3}$	0,086	$2,40 \cdot 10^{-12}$	$4,79 \cdot 10^{-14}$

Таблица 6

Результаты расчётов для ВОЛС длиной 100 км и частоты 100 МГц

Исходные данные: частота — 100 МГц; показатель преломления — 1,466; длина ВОЛС — 100 км					
Величина, обратная модулю Юнга (1/E), 1/Па	Коэффициент изменения показателя преломления при механическом напряжении, 1/Па	Коэффициент фазового сдвига, рад/кПа	Коэффи- циент фазового сдвига, град/кПа	Абсолютное изменение задержки, с	Коэффициент задержки, с/(км · кПа)
$6,2 \cdot 10^{-10}$	$-3,3 \cdot 10^{-12}$	$4,26 \cdot 10^{-3}$	0,244	$6,78 \cdot 10^{-12}$	$6,78 \cdot 10^{-14}$
	$-3,4 \cdot 10^{-12}$	$4,24 \cdot 10^{-3}$	0,243	$6,75 \cdot 10^{-12}$	$6,75 \cdot 10^{-14}$
	$-3,5 \cdot 10^{-12}$	$4,22 \cdot 10^{-3}$	0,242	$6,72 \cdot 10^{-12}$	$6,72 \cdot 10^{-14}$
$7,2 \cdot 10^{-10}$	$-3,3 \cdot 10^{-12}$	$3,57 \cdot 10^{-3}$	0,205	$5,69 \cdot 10^{-12}$	$5,69 \cdot 10^{-14}$
	$-3,4 \cdot 10^{-12}$	$3,55 \cdot 10^{-3}$	0,203	$5,65 \cdot 10^{-12}$	$5,65 \cdot 10^{-14}$
	$-3,5 \cdot 10^{-12}$	$3,53 \cdot 10^{-3}$	0,202	$5,62 \cdot 10^{-12}$	$5,62 \cdot 10^{-14}$
$8,2 \cdot 10^{-10}$	$-3,3 \cdot 10^{-12}$	$3,05 \cdot 10^{-3}$	0,175	$4,86 \cdot 10^{-12}$	$4,86 \cdot 10^{-14}$
	$-3,4 \cdot 10^{-12}$	$3,03 \cdot 10^{-3}$	0,174	$4,83 \cdot 10^{-12}$	$4,83 \cdot 10^{-14}$
	$-3,5 \cdot 10^{-12}$	$3,01 \cdot 10^{-3}$	0,173	$4,79 \cdot 10^{-12}$	$4,79 \cdot 10^{-14}$

Из представленных в таблицах 5 и 6 результатов расчётов следует, что при изменении давления на 1 кПа приращение задержки распространения сигнала в ВОЛС длиной 50 км составит примерно 2–4 пс, а в ВОЛС длиной 100 км это приращение составит уже около 4–7 пс.

Анализ полученных результатов показал, что на временные характеристики передаваемых по ВОЛС сигналов (фазу сигнала на выходе ВОЛС и задержку распространения сигнала) в значительно большей степени влияет нестабильность температуры окружающей среды: изменения температуры на 1 °C приводят к изменению фазы сигнала частотой 100 МГц на 0,12–0,15 рад в ВОЛС длиной 50 км, а в ВОЛС длиной 100 км — на 0,25–0,30 рад; для сигнала с частотой 100 МГц эти изменения составят 1,2–1,5 и 2,5–3,0 рад соответственно. Приращение задержек при таком же изменении температуры составит 1,97–2,35 нс для ВОЛС длиной 50 км и 3,94–4,70 нс для ВОЛС длиной 100 км. Эти воздействия на передаваемые оптические сигналы по своей величине значительно больше, чем измеряемые квантовым нивелиром гравитационные эффекты, проявляющиеся в смещениях частоты и шкалы времени разнесённых в пространстве СЧВ. Поэтому указанные воздействия на ВОЛС необходимо либо учитывать с высоким уровнем точности, либо предотвращать путём применения специальных конструктивных мер при создании линий связи.

Кроме того, следует учитывать, что для ВОЛС большой протяжённости (от нескольких десятков километров) нестабильность давления также становится значимым фактором, вносящим дополнительную погрешность (на уровне нескольких пикосекунд) в результаты измерений, проводимых с помощью квантового нивелира.

Рекомендации по уменьшению влияния нестабильности факторов, воздействующих на ВОЛС квантового нивелира

Из количественных оценок изменений фазы сигналов и приращений задержек распространения сигналов в ВОЛС, с учётом возможных разбросов этих оценок, вызванных отличиями параметров оптических волокон от типичных усреднённых значений, следует, что использование типовых значений температурных и механических параметров оптических волокон не позволяет с достаточной точностью (с субпикосекундным уровнем погрешности) вычислять поправки для учёта этих эффектов для конкретных оптических волокон ВОЛС квантового нивелира.

Альтернативным путём учёта воздействий на ВОЛС рассмотренных внешних факторов, который рекомендуется использовать для ВОЛС квантового нивелира, является проведение непрерывного мониторинга ВОЛС во время передачи сигналов с целью контроля изменений задержки распространения сигналов по ВОЛС, возникающих при нестабильности температуры и давления на трассе ВОЛС. Для такого мониторинга можно рекомендовать использовать методы рефлектометрии в частотной области [8, 10], интерферометрии обратно рассеянного оптического излучения [11], имеющие высокое разрешение и позволяющие регистрировать малые удлинения волокон. Контроль механических воздействий на волокно может осуществляться методом бриллюэновской рефлектометрии [10] для своевременного обнаружения изменений состояния волокон, по которым передаются сигналы квантового нивелира. Такой мониторинг рекомендуется проводить в отдельном спектральном канале, реализованном в контролируемом оптическом волокне квантового нивелира, с использованием соответствующих спектральных фильтров для разделения измерительных сигналов и контрольных сигналов системы мониторинга. Выбор метода мониторинга и схемы системы мониторинга целесообразно проводить на основе данных об используемой ВОЛС (типа оптического волокна, длины ВОЛС и ослабления сигнала в ней, диапазонов возможных воздействий на ВОЛС).

При проведении экспериментальных исследований по созданию квантового нивелира, предполагающих использование ВОЛС на основе лазерного передатчика, фотоприёмника и катушек оптического волокна, для контроля изменений задержек сигнала в катушках рекомендуется использовать опорный канал передачи лазерного излучения на основе короткого отрезка оптического волокна (длиной не более нескольких метров) между лазерным передатчиком и фотоприёмником. Направляя часть излучения от лазера в опорный канал, можно проводить сравнение фаз сигналов на выходе катушки волокна и на выходе опорного канала, таким образом регистрируя изменения задержки в катушке под влиянием внешних факторов и учитывая полученные данные при обработке результатов измерений.

Заключение

В ходе проведённого анализа влияния изменений внешних воздействующих факторов (температуры и давления) на временные характеристики сигналов, передаваемых по ВОЛС квантового нивелира, оценены диапазоны возможных изменений фазы сигналов на выходе ВОЛС и задержек распространения сигналов по ВОЛС с учётом возможных отклонений характеристик оптических волокон от типичных справочных значений. Вычислены коэффициенты, характеризующие фазовые сдвиги сигналов от СЧВ с частотами 10 и 100 МГц, передаваемых по ВОЛС на оптической несущей, при единичных приращениях температуры и давления. Установлено, что влияние нестабильности температуры на свойства ВОЛС и фазовые характеристики передаваемых по ВОЛС сигналов значительно больше, чем влияние нестабильности давления. Однако для ВОЛС, используемых квантовым нивелиром, необходимо учитывать оба этих эффекта, чтобы обеспечить достаточную точность сравнений частот и шкал времени разнесённых СЧВ.

Для регистрации нестабильности параметров внешних воздействий на ВОЛС во время передачи сигналов квантового нивелира и учёта полученных данных при обработке результатов измерений рекомендуется применять методы и средства мониторинга оптических волокон (при использовании протяжённых ВОЛС) или дополнительные каналы для передачи сигнала с опорной фазой (при использовании катушек оптического волокна). Полученные результаты рекомендуется использовать при проведении исследований по созданию квантовых нивелиров, а также других средств для измерений параметров гравитационного поля, использующих ВОЛС.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-11023.

Список литературы

1. Рыбаков Е.А., Фатеев В.Ф., Жариков А.И., Сысоев В.П., Смирнов Ф.Р. Измерение разности гравитационных потенциалов и ортометрических высот двух разнесённых точек на поверхности Земли // Материалы VIII Международного симпозиума «Метрология времени и пространства». 14–16 сентября 2016 г., Санкт-Петербург. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2016. — С. 189–192.
2. Фатеев В.Ф., Рыбаков Е.А. Экспериментальные исследования квантового нивелира // Тезисы докладов II НТК «Навигация по гравитационному и магнитному полям Земли. Новые технологии». 29–31 октября 2019 г. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2019. — С. 81.

3. Фатеев В.Ф. Релятивистская теория и применение квантового нивелира и сети «Квантовый футшток» // Альманах современной метрологии. — 2020. — № 3 (23). — С. 11–52.
4. Фатеев В.Ф., Щипунов А.Н. Направления развития эталонной базы гравиметрии // Измерительная техника. — 2018. — № 5. — С. 5–9.
5. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика: пер. с англ. — М.: Мир, 1996. — 324 с.
6. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи: пер. с англ. — М.: Техносфера, 2007. — 512 с.
7. Окоси Т., Окамото К., Оцу М., Нисихара Х., Кюма К., Хакатэ К. Волоконно-оптические датчики: пер. с япон. / под ред. Т. Окоси. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1990. — 256 с.
8. Волоконно-оптические датчики: пер. с англ. / под ред. У. Эдда. — М.: Техносфера, 2008. — 520 с.
9. Урик В.Дж.-мл., МакКинни Д.Д., Вилльямс К.Дж. Основы микроволновой фотоники: пер. с англ. — М.: Техносфера, 2016. — 376 с.
10. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. — М.: ЛЕСАРарт, 2005. — 208 с.
11. Шаталин С.В., Паркер Т.Р., Фархадироушан М. Рубежи применения распределённых волоконных датчиков // Фотон-Экспресс-Наука. — 2021. — № 6. — С. 18–19.

Статья поступила в редакцию: 19.10.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 13.01.2022 г.

Статья принята в работу: 19.01.2022 г.