

УДК 621315+006.92

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ФАЗОСТАБИЛЬНЫХ КОАКСИАЛЬНЫХ И ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ОБ ЭТАЛОННОМ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЕ

Р.И. Балаев, Д.М. Шиббаева, А.Н. Малимон, А.Ф. Курчанов

ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, Московская обл.

balaev@vniiftri.ru

*В статье показано, что основным физическим фактором, определяющим погрешность передачи эталонных сигналов частоты и времени в оптических или коаксиальных линиях длиной до 1 км, является температура окружающей среды. Получены теоретические выражения для расчета погрешности передачи по кабелям эталонных сигналов при вариациях температуры. Представлены температурные коэффициенты задержки сигнала в коаксиальных и оптических кабелях различного типа, а также результаты измерений вариаций температуры в местах прокладки подземных кабелей. Даны теоретические оценки погрешности передачи эталонных сигналов на удаленный конец различных линий длиной в 1 км. Освещены последние технологические достижения по созданию новых типов фазостабильных оптических волокон, которые даже без использования специальных систем активной компенсации возмущений, вносимых линией, могут обеспечить высокоточную передачу эталонных сигналов частоты и времени, а потому в будущем должны найти широкое применение.*

*Ключевые слова: передача сигналов частоты и времени, фазостабильные оптические и коаксиальные кабели.*

### Введение

В последнее десятилетие точность эталонов частоты и времени была значительно повышена. Вместе с этим возникла проблема сравнения на более высоком уровне точности шкал времени и частот удаленных друг от друга новых более совершенных эталонов и стандартов частоты. Высокая точность эталонов требует для их сравнения новых более совершенных каналов и методов передачи эталонных сигналов частоты и времени (ЭСЧВ), которые бы не ограничивали точностные характеристики сигналов, генерируемых новыми эталонами.

Существуют различные методы и средства проведения высоко-

точных сравнений частот и шкал времени территориально разнесенных стандартов и эталонов. Исторически первым был метод, использующий перевозимые квантовые часы, которые сличались с одним эталоном, а затем после транспортировки их автомобилем либо самолетом сличались с другим эталоном. Сейчас для находящихся на больших глобальных расстояниях стандартов широко применяются спутниковые методы, использующие сигналы космических аппаратов навигационных систем или специальные спутники связи, обеспечивающие реализацию дуплексного метода сличений. На расстояниях от нескольких метров до нескольких километров

*Альманах современной метрологии, 2015, №2*

для передачи ЭСЧВ повсеместно применяются радиочастотные кабели. В последние годы для сравнения стандартов удаленных друг от друга на расстояния от нескольких сотен метров до нескольких сотен километров разрабатываются и исследуются методы передачи ЭСЧВ по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС).

Следует отметить, что при реализации всех этих методов всегда необходимо применять короткие или длинные линии передачи на основе коаксиальных или оптических кабелей. Так, например, при реализации спутникового метода сигнал, несущий в закодированном виде информацию об эталонном времени и частоте, должен доставляться по кабелю к антенне космической связи, удаленной от эталона. И длина этого кабеля, подверженного прямому воздействию окружающей среды, может составлять сотни метров, а в отдельных случаях достигать километра. Возмущения фазы передаваемого по такому кабелю сигнала, в основном связанные с температурой вариацией задержки сигнала в кабеле, будут давать вклад в погрешность сравнений шкал времени и частот эталонов, выполняемых по спутниковому каналу.

Анализ физических характеристик кабелей говорит о том, что в связи с возросшей точностью эталонов на погрешность результатов выполняемых сравнений эталонных частот и шкал времени могут оказать существенное влияние характеристики используемых кабелей и

изменения температуры окружающей их среды даже в том случае, если их длина составляет несколько десятков метров. Поэтому важно рассмотреть характеристики кабелей для правильного учета вносимых ими погрешностей и выбора тех из них, которые предпочтительно использовать в ходе высокоточных сличений и сравнений ЭСЧВ эталонов.

### **1. Факторы, определяющие погрешность передачи ЭСЧВ в линиях длиной до 1 км**

Для коаксиальных и волоконно-оптических кабелей важен фактор влияния температуры окружающей среды. При вариациях температуры изменяется длина линии передачи ЭСЧВ, а также показатель преломления  $n$  диэлектрического материала кабеля. Это приводит к вариации задержки сигнала в линии. В волоконно-оптической линии вариации задержки в основном определяются изменением геометрической длины линии, а влияние фактора температурного изменения показателя преломления волокна незначительна. В коаксиальных линиях более существенное влияние на величину задержки сигнала оказывает фактор температурного изменения показателя преломления диэлектрического материала кабеля. С ростом температуры длина коаксиального кабеля увеличивается, а показатель преломления падает, что приводит к противоположным знакам величины задержки сигнала. В специальных, так называемых фазостабильных коаксиальных кабелях, используется

диэлектрический материал с температурным коэффициентом изменения показателя преломления таким, что он компенсирует линейное расширение длины кабеля. Это дает возможность более чем на порядок снизить температурный коэффици-

ент задержки (ТКЗ) у фазостабильных коаксиальных кабелей.

Зависимость изменения от температуры задержки передаваемого сигнала в 30-метровых отрезках различных типов коаксиальных кабелей показана на рис.1 [1].

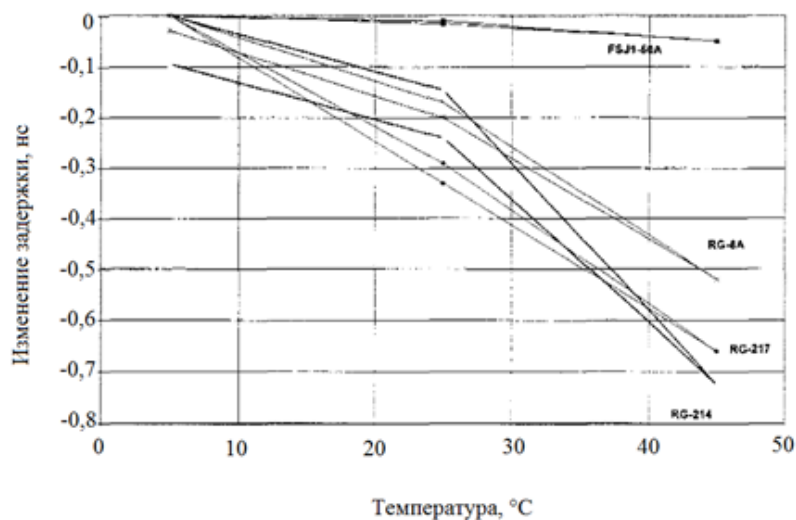


Рис. 1. Зависимость изменения от температуры задержки передаваемого сигнала в 30- метровых отрезках различных типов коаксиальных кабелей [1]

Из представленных на рис.1 кабелей наименьшую величину изменения задержки от температуры имеет фазостабильный кабель FSJ1-50A. Его ТКЗ для километрового отрезка кабеля имеет величину, меньшую 30 пс/(км·°C).

Характеристики нескольких типов коаксиальных кабелей - затухания передаваемого сигнала в 30-метровом отрезке кабеля и температурного коэффициента задержки  $\alpha_{ТКЗ}$  представлены в табл. 1 [1].

Таблица 1

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

Величина коэффициента  $\alpha_{\text{ТКЗ}}$  и погонного затухания сигнала в различных типах оптического волокна, используемого в оптических кабелях, представлена в табл. 2 [2].

Таблица 2

Тип волокна	Длина волны, нм	Коэфф. $\alpha_{\text{ТКЗ}}$ пс/(км·°С)	Затухание, дБ/км
SMF-28	1550	36.80	0,20
SMF-28	1310	37.97	0,36
SMF-DS	1550	38.67	0,25
LEAF	1550	37.97	0,25

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

В настоящее время разработаны также специальные типы фазостабильных оптических волокон, которые имеют на порядок меньший коэффициент  $\alpha_{\text{ТКЗ}}$ , чем у стандартного волокна SMF-28. Физические принципы, лежащие в основе реализации такого нового типа волокна, изложены в разделе 5.

Следует отметить, что коаксиальные кабели имеют примерно на два порядка большее погонное затухание, чем волоконно-оптические кабели. Кроме того, погонное затухание коаксиальных кабелей значительно увеличивается по мере роста частоты передаваемого эталонного сигнала, что приводит к искажению фронта импульсного сигнала, несущего информацию об эталонном времени. Но в относительно коротких линиях роль фактора затухания сигнала в коаксиальных кабелях, а

тем более в волоконно-оптических кабелях, не играет большой роли. Для линий длиной менее 1 км наиболее существенным является изменение оптической или электрической длины кабеля из-за непостоянства температуры окружающей среды.

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

Рассмотрим элементарное уравнение для времени распространения  $\tau$  сигнала в коаксиальной или оптической линии:

$$\tau = L \cdot n/c, \quad (1)$$

где  $L$  – длина линии,  $n$  – коэффициент преломления диэлектрика и  $c$  – скорость света в вакууме. Изменения температуры среды, окружающей кабель, будут варьировать задержку сигнала в нем.

В случае передачи сигнала эталонного времени возникает дополнительная погрешность  $\Delta\tau$ , которая пропорциональна длине линии и изменению  $\Delta T$  её температуры. Вариации

цию  $\Delta\tau$  задержки эталонного сигнала в линии можно записать в виде:

$$\Delta\tau = \alpha_{\text{ткз}} \cdot \Delta T \cdot L \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что для уменьшения  $\Delta\tau$  необходимо выбирать для передачи эталонных сигналов кабели с малым коэффициентом  $\alpha_{\text{ткз}}$  и ограничивать пределы изменения температуры линии.

В случае передачи эталонной радиочастоты передаваемый по кабелю эталонный сигнал будет приобретать дополнительные медленные вариации фазы, вызванные медленной периодической температурной волной, действующей на кабель из-за работы системы кондиционирования, либо из-за суточных или сезонных изменений температуры. Это будет вносить дополнительную погрешность в значение частоты сигнала, принимаемого на удаленном конце кабеля, и эта погрешность будет пропорциональна длине линии и скорости изменения ее температуры.

Теоретически подтвердим такой вывод, учитывая то обстоятельство, что получаемый на выходе из линии сигнал представляет собой промодулированный по фазе эталонный сигнал. Будем считать, что модуляция осуществляется синусоидальной температурной волной. Тогда долговременную нестабильность  $\sigma_y(\tau)$  (СКДО - дисперсию Аллана) сигнала, подвергающегося фазовой модуляции, на выходе кабеля, из-за действия медленной синусоидальной температурной волны, можно

оценить на основании следующего выражения:

$$\sigma_y(\tau) = \Delta T \cdot \frac{K_{\text{ткз}} \cdot n \cdot L}{c} \cdot \frac{\sin^2(\pi\tau\nu_0)}{\tau}, \quad (3)$$

где  $\Delta T$  – полная амплитуда (размах) температурной волны в градусах,  $K_{\text{ткз}} = \alpha_{\text{ткз}}$  (с/н) – температурный коэффициент временной задержки сигнала в волокне,  $\alpha_{\text{ткз}} = 38$  пс/(км·°С),  $n = 1,465$  – показатель преломления волокна,  $L$  – длина оптического кабеля,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\tau$  – время усреднения в секундах,  $\nu_0$  – частота температурной волны.

Выражение (3) достигает локального максимума, например, когда аргумент синуса равен  $\pi/2$ . Это соответствует тому, что при температурной волне, например, с периодом в сутки на интервале усреднения  $\tau = 1/2$  суток будет максимум для дисперсии Аллана  $\sigma_y(\tau)$ .

Рассмотрим два характерных для практики примера воздействия на оптический кабель температурных волн. Для упрощения будем также считать, что волны близки к синусоидальной форме.

1. Пусть из-за периодического включения системы кондиционирования на волоконную линию длиной 50 метров, находящуюся в помещении, действует синусоидальная температурная волна амплитудой 1,2 °С и периодом 1000 с. Для такого воздействия на линию, по которой передается эталонный сигнал, на основании выражения (3) можно полу-

чить следующую оценку. Дисперсия Аллана у эталонного сигнала на выходе 50-метрового отрезка фазостабилизированного коаксиального кабеля или оптического кабеля с волокном SMF-28 будет составлять  $\sim 4 \cdot 10^{-15}$  на 500-секундном интервале усреднения из-за вариации температуры в помещении в пределах  $1,2 \text{ }^\circ\text{C}$  при работе кондиционера.

II. Пусть на кабель длиной 1 км, проложенный в подземных коммуникациях, воздействует суточная температурная волна полной амплитудой  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  с периодом 1 сутки. В этом случае в соответствии с (3) воздействие такой температурной вариации на оптический кабель конвертируется в нестабильность (СКДО) эталонного сигнала на вы-

ходе кабеля  $\sim 4 \cdot 10^{-16}$  на интервале усреднения в половину суток.

### 3. Результаты измерений вариаций температуры в местах прокладки кабелей

Вызванные вариациями температуры изменения задержки распространения сигнала в оптическом кабеле длиной  $\sim 6 \text{ км}$ , протянутом в подземном телекоммуникационном канале, представлены на рис. 2 [2].

Данные, представленные на рис. 2, говорят о том, что изменения температуры воздуха над поверхностью земли в течение суток почти не проявляются в виде суточных «быстрых» изменений задержки в подземном кабеле, но медленный сезонный ход изменения температуры в течение двух месяцев отчетливо виден.

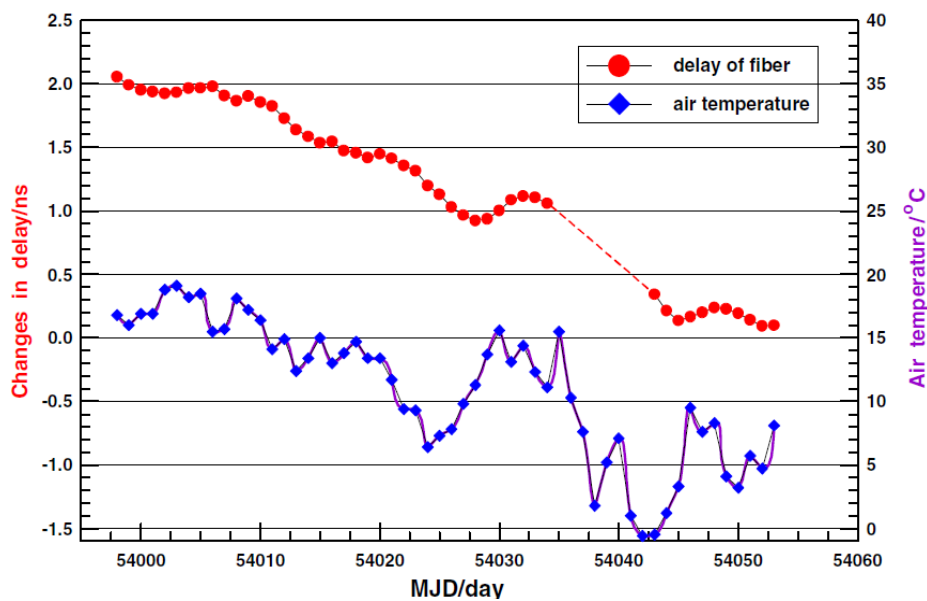


Рис. 2. Зависимость изменения задержки в нс распространения сигнала в оптоволокне (верхняя кривая) и изменение температуры воздуха в градусах  $^\circ\text{C}$  (нижняя кривая) на протяжении  $\sim 60$  дней [2]

На территории приемо–передающего комплекса дальней космической связи NASA в Голдстоуне (Калифорния) были проведены исследования сезонного изменения температуры на различной глубине от поверхности земли [3,4].

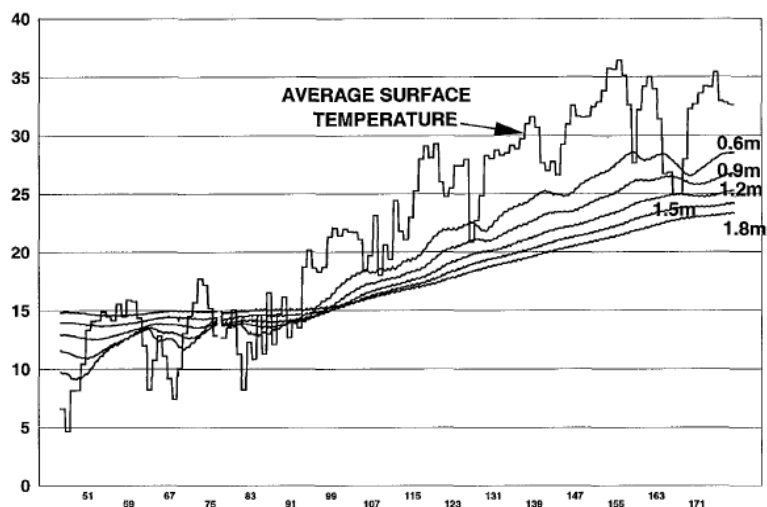


Рис. 3. Сезонное изменение температуры воздуха и температуры под землей на различной глубине на территории комплекса дальней космической связи в районе Голдстоуна (Калифорния) за ~180 дней [3,4].

Исследования позволили сделать вывод о том, что суточное изменение температуры воздуха также мало отражается на температуре под землей в независимости от глубины (см. рис. 3). По данным других исследователей суточные вариации температуры кабеля на глубине ~ 0,7 метра от поверхности земли обычно не превышают 0,5 °С [5,6].

Из данных, представленных на рис. 3, следует, что изменение средней температуры воздуха в районе Голдстоуна на 30 °С за полгода привело к изменению температуры под землей на глубине 0,6 метра на ~20 °С, а на глубине 1,8 метра на ~ 8 °С. Следует отметить, что в Голдстоуне на территории комплекса NASA

волоконные кабели, которые предназначены для передачи ЭСЧВ, разместили на глубине 1,5 метра.

Подобный же размах изменения температур ~20 °С на глубине 0,6 метра под землей в течение полугода характерен для московского региона и для российских широт в целом (см. рис. 4) [7].

Результаты измерений, представленных на рисунках 2, 3 и 4, говорят о том, что поверхностный слой земли, обладающий большой теплоемкостью и относительно малой теплопроводностью, выполняет роль пассивного термостата, сглаживающего под землей изменения температуры над ее поверхностью.

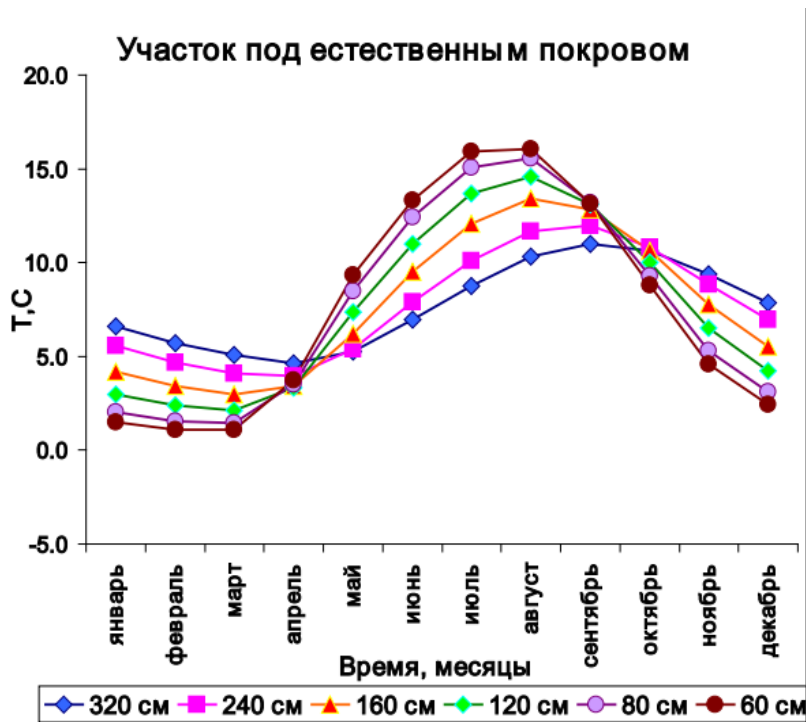


Рис. 4. Годовой ход температуры грунта на разных глубинах в московском регионе [7]

Из графика на рис. 4 следует, что сезонное изменение температуры грунта на глубине 3,2 м составляет около 7 °С. Таким образом, даже при прокладывании ВОЛС на больших глубинах снижение сезонных колебаний температуры снижается только в несколько раз.

Снижение же суточных колебаний температуры в глубине грунта многократно больше в связи с тем, что тепловая волна с суточным циклом ослабляется с ростом глубины экспоненциально. При теплопроводности мокрого песка  $7 \times 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с [8] характерная длина тепловой волны с суточным периодом составляет 0,25 м, то есть каждый полуметровый слой грунта должен ослаблять суточное колебание тем-

пературы воздуха над его поверхностью на порядок. Малая амплитуда температурной суточной волны у кабеля под землей дает возможность с помощью медленной петли обратной связи, в специально создаваемых системах передачи ЭСЧВ с активной компенсацией, эффективно компенсировать суточные вариации временной задержки эталонного сигнала даже в длинных 100 км ВОЛС.

Представленные результаты в разделах 2 и 3 позволяют сделать вывод о том, что необходимо стремиться прокладывать кабели для передачи ЭСЧВ под землей и избегать использования кабелей, протянутых между опорами на открытом воздухе, так как в этом случае они будут



подвергаться очень быстрому нагреву прямым солнечным излучением.

#### 4. Теоретические оценки погрешности передачи ЭСЧВ в оптических и коаксиальных кабелях длиной 1 км

Как показано в разделе 2, проникающая к подземному кабелю медленная периодическая волна дневного повышения температуры приводит к модуляции фазы эталонного сигнала, получаемого на выходе из кабеля. Это приводит к ухудшению долговременной стабильности эталонного сигнала на выходе волоконно-оптического или коаксиального кабеля. В наибольшей степени это скажется на значении долговременной стабильности эталонного сигнала на интервалах усреднения, близких к значению полупериода температурной волны. Соответственно из-за суточной температурной волны нестабильность частоты сигнала на выходе из длинной линии будет дополнительно возрастать на интервале усреднения в половину суток.

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

Таблица 3

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

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

### 5. Фазостабильное оптическое волокно

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

Температурный коэффициент задержки  $\alpha_{\text{ТКЗ}}$  волокна может быть рассчитан по формуле:

$$\alpha_{\text{ТКЗ}} = \frac{1}{c} \left[ N_g K + \frac{dNg}{dT} + \frac{dNg}{d\sigma} E_f (K - k_f) \right], \quad (4)$$

$$K = \frac{A_f E_f k_f + A_j E_j k_j}{A_f E_f + A_j E_j} \quad (5)$$

где  $c$  - скорость света в вакууме,  $N_g = 1,4682$  показатель преломления,  $T$  - температура,  $\frac{dNg}{dT}$  - термооптический коэффициент,  $\sigma$  - напряжение в волокне,  $\frac{dNg}{d\sigma} = -4,27 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$  групповой коэффициент зависимости напряжения волокна,  $E_f, E_j$  - модуль Юнга,  $K, k_f, k_j$  - коэффициенты теплового расширения,  $A_f, A_j$  - площади поперечного сечения (индексы  $f$  и  $j$  относятся к волокну и оболочке соответственно) [9].

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

Волокно с жидкокристаллическим покрытием имеет высокую стоимость. Она составляет десятки долларов за метр. Ранее такое волокно изготавливала только японская фирма Furukawa [10]. Но в 2012 году появились сообщения фирмы Linden Photonics (Германия) [11] о том, что ею отработана технология изготовления фазостабильного волокна с жидкокристаллическим покрытием, и в результате цена его была снижена в несколько раз, став экономически приемлемой для линий длиной до одного километра.

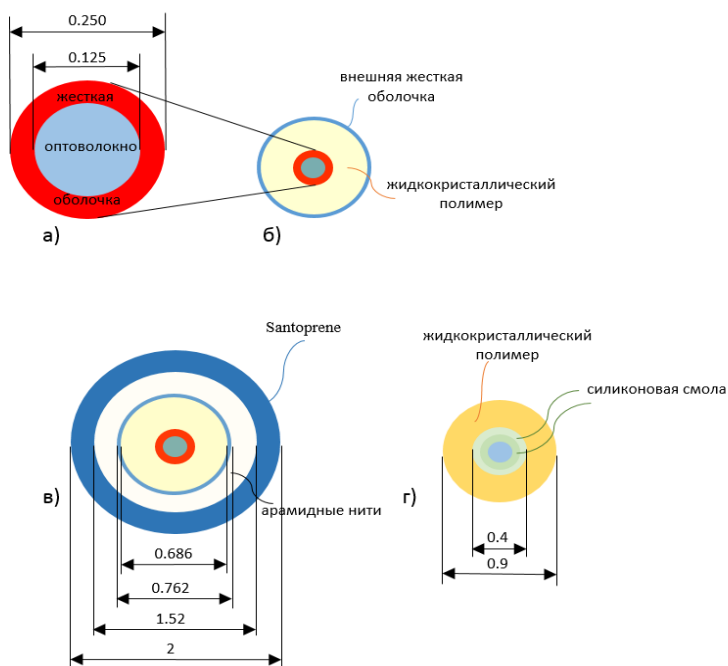


Рис. 5. Исследованные типы специальных кабелей (б, в и г) с жилой из оптического одномодового волокна, покрытого жидкокристаллическим полимером [9]:

а) стандартное 250 мкм волокно с плотной оболочкой, б) STFOC фирмы Linden Photonics, в) Non-Kink STFOC фирмы Linden Photonics, г) PSOF фирмы Furukawa

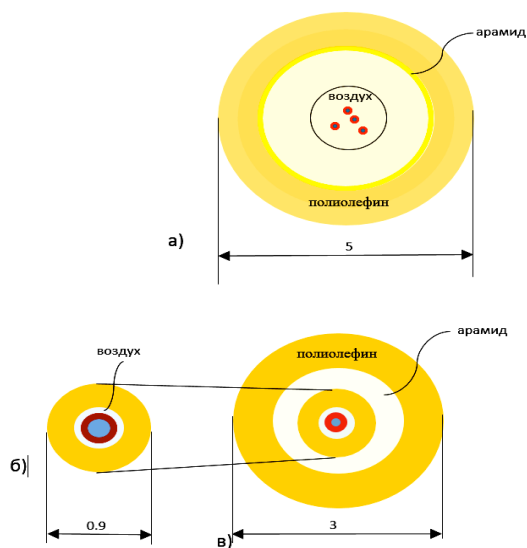


Рис. 6. Исследованные стандартные типы кабелей [9]: а) модульной конструкции (волокна в свободной общей трубке), б) 900 мкм полужесткий, в) 3 мм полужесткий

Группой независимых исследователей были проведены расчеты в соответствии с (4), а также экспериментально измерены температур-

ные коэффициенты задержки различных типов оптических кабелей - специальных, использующих волокно с жидкокристаллическим покрытием, и стандартных [9]. Внутренняя структура этих оптических кабелей

представлена на рис. 5 и 6. В специальных кабелях использовалось фазостабильное волокно с жидкокристаллическим покрытием Linden Photonics и Furukawa.

Таблица 4

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

Полученные результаты расчетов и измерений представлены в табл. 4, где можно увидеть оценку величины среднего значения температурного коэффициента задержки оптических кабелей. Результаты измерений подтвердили, что температурный коэффициент задержки  $\alpha_{\text{ТКЗ}}$  фазостабильных кабелей на основе оптического волокна, покрытого жидкокристаллическим полимером, лежит в пределах от +3,7 до -12 пс/(°С·км).

Результаты измерений также показали, что широко используемый для изготовления оптических патч-кордов 3-мм полужесткий оптический кабель со стандартным оптиче-

ским волокном имеет  $\alpha_{\text{ТКЗ}} \sim 130$  пс/(°С·км), что в три раза больше, чем  $\alpha_{\text{ТКЗ}}$  используемого в данном кабеле стандартного 250 мкм волокна с плотной оболочкой. Это можно объяснить тем, что в кабеле оболочечные покрытия из полиолефина и арамидных нитей, имеющие большой коэффициент линейного расширения, плотно прилегают к жиле оптического волокна и тем самым приводят к увеличению  $\alpha_{\text{ТКЗ}}$  кабеля. Из данных табл. 4 следует, что у фазостабильного Non-Kink STFOC кабеля  $\alpha_{\text{ТКЗ}}$  отрицателен, а у фазостабильного STFOC положителен. Если вдоль всей линии температура изменяется одинаково, то выполнив ли-

нию частично из STFOC и частично из Non-Kink STFOC кабелей, можно получить коэффициент  $\alpha_{\text{ткз}}$  линии, близкий к нулю. Поэтому наиболее перспективным вариантом компенсации температурных изменений линии представляется комбинирование полной длины линии из Non-Kink STFOC и STFOC кабелей.

### Заключение

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

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

использовать кабели с малым температурным коэффициентом задержки сигнала.

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

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

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

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

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

### Литература

1. Edward Powers, Paul Wheeler, David Judge, Demetrios Matsakis. Hardware delay measurements and sensitivities in carrier phase time transfer. Proceedings of 30th Annual PreciseTime and Time Interval (PTTI) Meeting, p. 293, 1998.
2. Sliwczynski L., Krehlik P. and Lipinski M. Optical fibers in time and frequency transfer. Measurement Science and Technology. 21. p.1, 2010 (075302).
3. Calhoun M., Wang R., Kirk A., Diener W., Dick J. and Tjoelker R.L. Stabilized reference frequency distribution for radio science with the cassini spacecraft and the deep space network. 32 nd Annual PTTI Meeting 2000, <http://tycho.usno.navy.mil/ptti/ptti2000/paper25.pdf>.
4. Huang S., Calhoun M., Tjoelker R. Optical Links and RF Distribution for Antenna Arrays. Proceedings of the 2006 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition. <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/40275/1/06-2522.pdf>.
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. arXiv.org.
6. Daussy C., Lopez O., Amy-Klein A., Goncharov A., Guinet M., Chardonnet C., Narbonneau F., Lours M., Chamon D., Bize S., Clairon A., Santarelli G., Tobar M.E. and Luiten A.N. Long-distance frequency dissemination with a resolution of 10<sup>-17</sup>. Phys. Rev. Lett, 94, 203904, 2005.
7. Корнева И.А., Локощенко М.А. Многолетние изменения температуры грунта на разных глубинах в Москве. 16-я Международная конф. молодых ученых «САТЭП – 2012». Тезисы, с. 93, 28 мая – 1 июня 2012 г., Звенигород, [www.ifaran.ru/science/conferences.satep2012/presentations/29\\_05/Korneva.pdf](http://www.ifaran.ru/science/conferences.satep2012/presentations/29_05/Korneva.pdf).
8. Житомирский И.С. Температурный скин-слой земной коры и

вечная мерзлота. [http://is-zhitomirsky.narod.ru/R\\_Temperature\\_Skin\\_Layer.htm](http://is-zhitomirsky.narod.ru/R_Temperature_Skin_Layer.htm).

9. Linden Photonics, Inc. Phase Stabilized STFOC.

[www.lindenphotonics.com/documents/2013/Phase%20Stabilized%20STFOC.pdf](http://www.lindenphotonics.com/documents/2013/Phase%20Stabilized%20STFOC.pdf).

10. Bousonville M., Bock M. K., Felber M., Ladwig T., Lamb T.,

Schlarb H., Schulz S., Sydlo C., Hunziker S., Kownacki P., Jablonski S. New phase stable optical Fiber Proceedings of BIW2012, Newport News, VA USA. (MOPG033), 2012. p.p. 101-103.

11. Furukawa electric. Phased Stabilized Optical Fiber Cable (PSOF). [www.specialtyphotonics.com/images/pdf/brochures/PSOF%20Brochure.pdf](http://www.specialtyphotonics.com/images/pdf/brochures/PSOF%20Brochure.pdf).