

Исследование фазовой модуляции аналогового сигнала от температуры в одномодовом волокне

Б. К. Резников*

*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
факультет инфокоммуникационных сетей и систем,
кафедра оптических и квантовых систем связи
Россия, 193232, Санкт-Петербург, Большевикова пр., 22, к 1
(Поступила в редакцию 16.06.2025; подписана в печать 05.08.2025)*

В статье рассмотрены особенности функционирования волоконно-оптических телекоммуникационных систем при эксплуатации в условиях нестабильных температурных режимов, характерных для горных районов и Крайнего Севера. Проведён анализ влияния легирования сердцевины оптического волокна оксидом германия (GeO_2) на уровень оптических потерь, обусловленных рэлеевским рассеянием. Показано, что при высоких концентрациях GeO_2 потери существенно возрастают при снижении температуры, что ограничивает длину линии передачи без усилителей. Приведены результаты экспериментальных исследований зависимости коэффициента потерь α_{pp} от температуры и относительного изменения показателя преломления α для волокон, изготовленных по методам VAD и MCVD. Разработана и реализована методика измерения температурной зависимости α_{pp} с использованием климатической камеры и двухканальной схемы измерений. Полученные результаты позволяют установить допустимые уровни легирования сердцевины волокна для эксплуатации систем передачи данных без термостабилизации в холодных климатических условиях. Также намечены направления дальнейших исследований, связанных с фазовыми искажениями модулированных сигналов в аналоговых системах связи при колебаниях температуры.

PACS: 42.79.Sz, 07.60.Vg

УДК: 004.7:621.391.81:621.382:681.7.068.

Ключевые слова: фазовая модуляция, аналоговый сигнал, температура, одномодовое волокно, волоконно-оптическая линия связи, измерение, оптический датчик, интерференция, модуляция сигнала, оптические характеристики.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире, вследствие ухудшения экологической обстановки, изменения климата, а также роста плотности размещения систем связи различного назначения, возникают трудности в их эксплуатации [1–4]. Телекоммуникационные системы не являются исключением. Особенно остро эти вопросы встают при передаче различных сигналов на большие расстояния в условиях значительного изменения температурного градиента.

Следует отметить, что обеспечить стабильный температурный режим на протяженных линиях связи крайне затруднительно, особенно в горной местности и в условиях Крайнего Севера [5, 6].

1. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В инфокоммуникационном пространстве для передачи аналоговых сигналов на большие расстояния широко применяются одномодовые магистральные волокна

[5–8]. Такие волокна изготавливаются по двум основным технологиям: VAD и MCVD, подробно описанным в работах [10, 11].

Для снижения себестоимости производства сердцевины волокна легируют оксидом германия (GeO_2) [12, 13]. Однако увеличение его концентрации приводит к росту оптических потерь α вследствие усиления рассеяния света. Таким образом, при проектировании телекоммуникационных систем необходимо находить оптимальный баланс между типом волокна и общей стоимостью системы.

Высокие концентрации GeO_2 в сердцевине возможно реализовать только при использовании технологии MCVD. Несмотря на более высокую стоимость по сравнению с методом VAD, MCVD обеспечивает высокую чистоту оптического канала и сниженные потери.

Основные потери в передаче оптического сигнала связаны с рэлеевским рассеянием (PP), обусловленным статистическими флуктуациями плотности стекла при его охлаждении, а также неоднородностями, возникающими при легировании сердцевины волокна.

Для оценки PP-потерь α_{pp} используется следующее соотношение [14, 15]:

$$\alpha_{\text{pp}} = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} (n^2 - 1) \beta k T_f, \quad (1)$$

где λ — длина волны света, n — показатель преломления стекла, k — постоянная Больцмана, β — изо-

* rznkfi@net.sut.ru

термическая сжимаемость при фиктивной температуре T_f (температуре, при которой «замерзают» флуктуации в стекле).

Соотношение 1 обеспечивает адекватные результаты только для волокон с однородной (однокомпонентной) сердцевиной. Это связано с тем, что фиктивная температура T_f в таких волокнах может существенно отличаться от температуры стеклования, особенно при сложном химическом составе заготовки. Кроме того, значение T_f зависит от «температурной предыстории» материала, то есть от условий его термической обработки в процессе производства.

В связи с этим производители оптических волокон проводят измерения коэффициента потерь на рэлеевское рассеяние $\alpha_{рр}$ при температуре $T = 293 \pm 1$ К и указывают эти значения в техническом паспорте изделия с учетом длины волны передаваемого оптического сигнала.

Таким образом, задача изучения температурных режимов эксплуатации оптических волокон с различной степенью легирования и изготовленных по разным технологическим методам (например, VAD и MCVD) является актуальной для разработчиков протяженных телекоммуникационных систем связи.

Важным параметром при таких исследованиях выступает профиль показателя преломления (ППП) сердцевины волокна. На рис. 1 представлены результаты исследований зависимости коэффициента $\alpha_{рр}$ от относительного изменения показателя преломления Δ для волокон, вытянутых при температуре 1860°C .

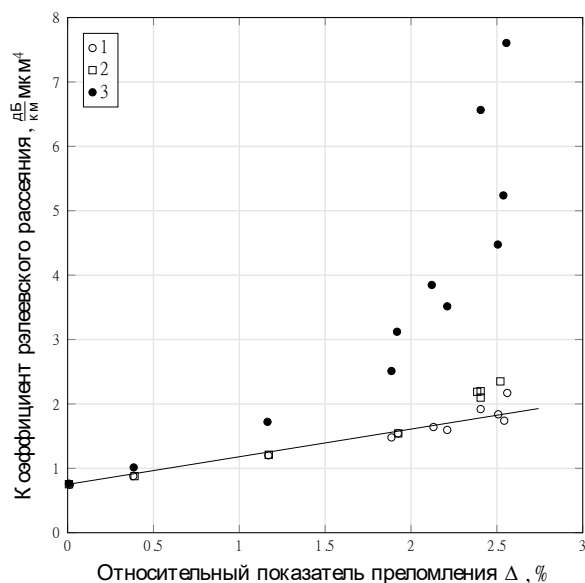


Рис. 1. Зависимость $\alpha_{рр}$ от Δ . Обозначениям 1 соответствуют волокна с градиентным ППП, легированные GeO_2 ; 2 — со ступенчатым ППП, легированные GeO_2 ; 3 — коэффициент Δ , полученные в [6]. Прямая линия — аппроксимация коэффициентов $\alpha_{рр}$ линейной зависимостью от концентрации

Анализ полученных зависимостей показывает наличие различий в значениях коэффициента потерь на рэ-

леевское рассеяние ($\alpha_{рр}$), что при передаче оптического сигнала на большие расстояния существенно влияет на уровень потерь и допустимую длину оптической линии связи с устойчивым приемом без использования усилителей.

Необходимо отметить, что линейная аппроксимация экспериментальных данных позволяет получить аналитическую зависимость коэффициента $\alpha_{рр}$ от относительного показателя преломления Δ , которую можно представить в виде следующей формулы:

$$A_{\text{рэл}} = 0.75 \cdot (1 + (0.58 \pm 0.05) \Delta), \left[\frac{\text{дБ} \cdot \text{мкм}^4}{\text{км}} \right] \quad (2)$$

В соотношении 2 величина относительного показателя преломления Δ выражается в процентах. Данная зависимость, в пределах погрешности измерений, согласуется с результатами других исследований [15, 16].

С учетом этого результата для исследования зависимости коэффициента потерь на рэлеевское рассеяние $\alpha_{рр}$ от температуры T была собрана соответствующая экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 2.

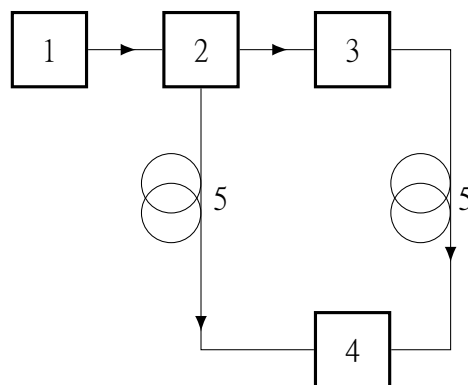


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки для исследования процессов эксплуатации оптических волокон в различных температурных режимах. На схеме: 1 — источник излучения, 2 — оптический сплиттер, 3 — климатическая камера со специальными термовыводами, в камере 10 км исследуемого оптического волокна, 4 — спектроанализатор, 5 — оптическое волокно

На рис. 3 представлены внешний вид термокамеры и рабочая зона (внутреннее пространство камеры) — герметично изолированная область, в которой размещаются исследуемые объекты. Как правило, дверь камеры оснащается смотровыми окнами, а внутри предусмотрено освещение для наблюдения за образцами.

В рабочей зоне камеры размещалась бухта оптического волокна длиной 10 км. Для исследования $\alpha_{рр}$ использовалось лазерное излучение с длиной волны $\lambda = 1550$ нм. При использовании других длин волн принципиальных изменений в эксперименте



Рис. 3. Климатическая камера: а — внешний вид климатической камеры; б — внутреннее пространство камеры

не происходит — будут отличаться лишь получаемые зависимости.

Для измерения изменения значений α_{pp} при различных температурах была предложена методика с применением двух оптических каналов. Использование двух каналов необходимо для калибровки, связанной с изменением температурного градиента при выходе волокна из термокамеры. Мощность лазерного излучения, подаваемого в оптическое волокно, составляла $P_1 = 10$ мВт. Для регистрации оптического излучения применялся спектроанализатор Yokogawa AQ6370D-22-L1-F/FC/RFC (Япония).

Методика измерения α_{pp} следующая. Первоначально измеряется уровень оптической мощности, поступающей от источника излучения к приемному устройству через первый оптический канал, не содержащий климатической камеры.

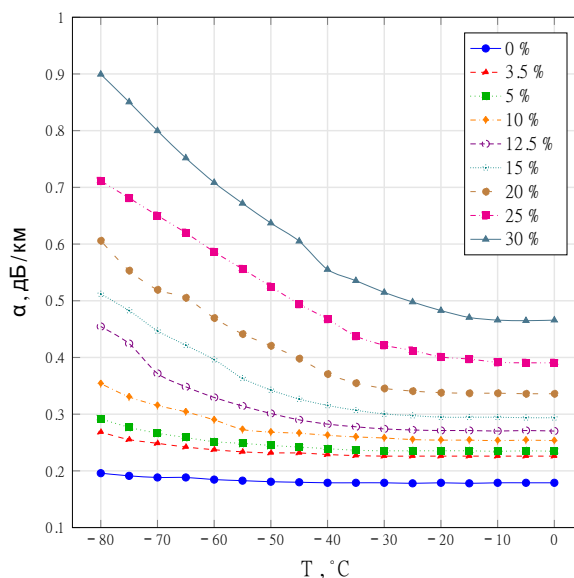
Затем производится измерение уровня оптической мощности при передаче сигнала от источника к приемнику через оптическое волокно длиной 10 км, размещённую в климатической камере, а также через участок волокна длиной 1 км, находящийся вне зоны камеры.

После получения измеренных значений производится расчет оптических потерь в линии передачи в соответствии со следующим соотношением:

$$\alpha_{pp}(\lambda) = \frac{10 \lg \frac{P_2(\lambda)}{P_1(\lambda)}}{L}. \quad (3)$$

На разработанной экспериментальной установке были проведены исследования оптических волокон с градиентным профилем показателя преломления (ППП), изготовленных методом VAD. Результаты исследований представлены на рис. 4.

Анализ проведенных исследований показывает, что

Рис. 4. Зависимость изменения α_{pp} от для $\lambda = 1550$ нм при различных концентрациях оксида германия GeO_2 в сердцевине

оптические потери при снижении температуры до сверхнизких значений существенно возрастают с увеличением уровня легирования сердцевины оксидом германия в диапазоне от 5 до 30 мол.%. В случае легирования сердцевины оптического волокна на уровне 3.5 и 5 мол.% значения α_{pp} позволяют обеспечить передачу данных на большие расстояния без использования усилителей.

Следует также отметить, что значение α_{pp} при снижении температуры до $T = -15^\circ\text{C}$ остается неизменным (см. рис. 4). Это указывает на то, что в климати-

ческих зонах с такой температурой реализация режима термостабилизации в оптических телекоммуникационных системах не реализуется.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФАЗЫ МОДУЛЯЦИИ АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМАХ ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В системах управления запорными конструкциями, например дверями подвижных объектов или элементами сканирования в антенных решетках, важным параметром является сдвиг фазы аналогового сигнала, особенно в случае использования последовательности командных кодов. Следует отметить, что в классическом температурном диапазоне от -10 до $+25^{\circ}\text{C}$ сдвиг фазы можно рассчитать, зная длину оптического волокна.

При изменении температуры в более широких пределах, особенно в сторону отрицательных значений, в оптических волокнах происходят структурные изменения: материал сжимается, изменяется показатель преломления, что приводит к изменению скорости распространения оптического сигнала и, как следствие, к изменению фазовой задержки по времени. Эти процессы крайне редко учитываются, поскольку аналоговые сигналы, как правило, передаются на короткие расстояния, и сдвиг фазы в таких условиях незначителен.

В ряде задач проектирование инфокоммуникационных систем сдвиг фазы необходимо учитывать. На рис. 5 представлена структурная схема экспериментальной установки для исследования фазового сдвига $\Delta\varphi$.

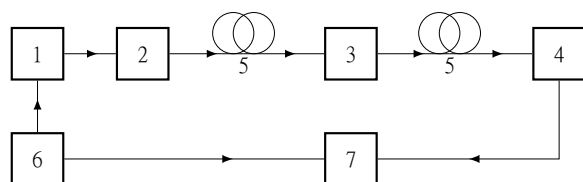


Рис. 5. Структурная схема экспериментальной установки. На схеме: 1 — лазерный передающий модуль, 2 — оптический изолятор, 3 — климатическая камера с термоклапанами, 4 — приемный модуль, 5 — оптическое волокно, 6 — генератор Agilent E82570, 7 — анализатор цепей

В исследованиях фазового сдвига $\Delta\varphi$ лазерное излучение с длиной волны $\lambda = 1310$ нм в передающем модуле 1 модулировалось СВЧ-сигналом, поступающим от генератора Agilent E8257D. Этот же сигнал подавался на один из входов векторного анализатора цепей Agilent PNA-L N5230C. Исследования проводились при температурах до -50°C (ниже этой температуры опуститься не позволяет защитная оболочка волокна, использованного в данной конструкции телекоммуникационной системы). Оптический сигнал пе-

редавался по волокну на второй вход анализатора цепей, где производилось сравнение фаз. Исследования проводились для различных частот модуляции, а также различных типов оптических волокон, сердцевина которых была легирована оксидом германия (GeO_2) в разной концентрации. На рис. 6 и 7 приведены примеры полученных результатов.

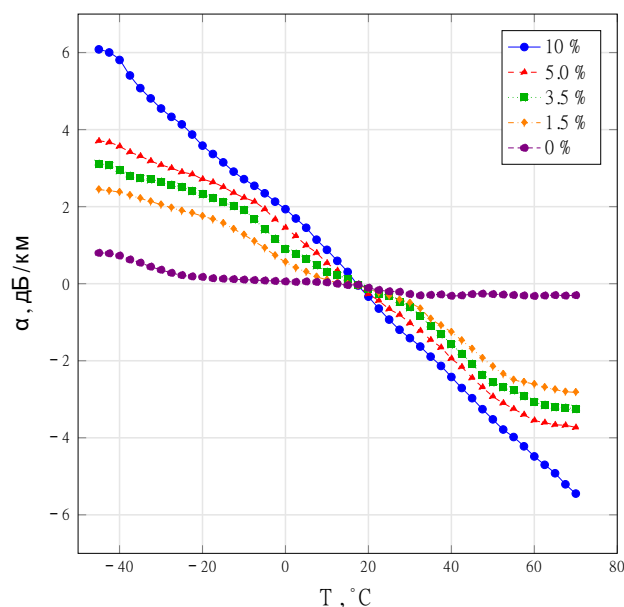


Рис. 6. Исследование сдвига фазы модуляции $\Delta\varphi$ от температуры для частоты модуляции 12 ГГц при разных концентрациях оксида германия GeO_2

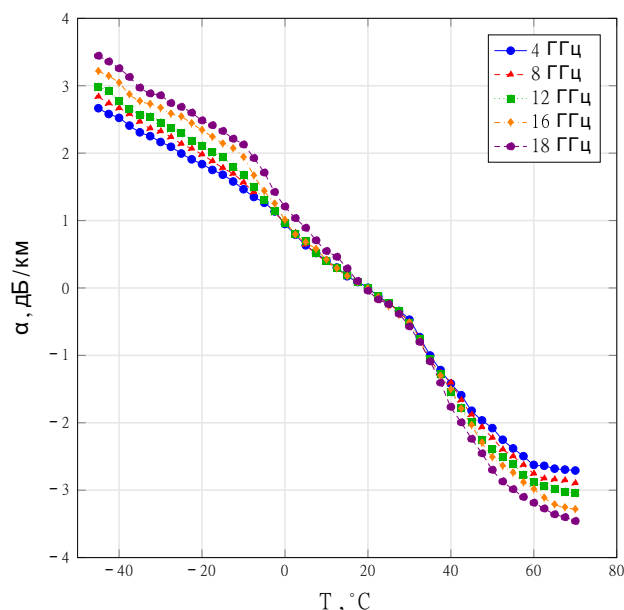


Рис. 7. Исследование сдвига фазы модуляции $\Delta\varphi$ от температуры для концентрации оксида германия в сердцевине 3.5% при разных частотах модуляции

В таких характеристиках в качестве «нулевой» точки отсчета принимается значение фазового сдвига $\Delta\varphi$ при комнатной температуре.

Анализ полученных результатов показал, что при изменении частоты модуляции разница между значениями фазового сдвига $\Delta\varphi$ составляет менее 2° , что не является существенным для передачи аналоговых сигналов в телекоммуникационных системах. Существенное влияние на изменение фазового сдвига $\Delta\varphi$ оказала концентрация оксида германия (GeO_2) в сердцевине оптического волокна в предельных температурах эксперимента.

Так, при концентрации оксида германия 3.5 мол.% изменение фазового сдвига достигает 6° , что является критичным при передаче информации на большие расстояния в диапазоне СВЧ.

На более низких частотах модуляции изменение $\Delta\varphi$ не превышает 4° , что допустимо для надежной передачи аналоговых сигналов на значительные расстояния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что при проектировании различных конструкций телекоммуникационных систем, предназначенных для передачи аналоговых сигналов, необходимо учитывать температурную зависимость фазового сдвига $\Delta\varphi$ для различных типов используемых оптических волокон.

В ряде случаев данный фактор становится определяющим при выборе волокон с сердцевиной из чистого кварца для построения аналоговых волоконно-оптических телекоммуникационных систем (АВОТС). Несмотря на их высокую стоимость, такие волокна обладают значительно большей устойчивостью к внешним воздействиям, в том числе температурным, что обеспечивает надежность и стабильность параметров передачи.

- [1] Davydov R., Logunov S., Nikolaev D. et al. // *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*. Springer International Publishing, 2022. P. 221–229
- [2] Rud' V., Melebaev D., Krasnoshchekov V., et al. // *Energies*. **16**, № 5. 2319 (2023).
- [3] Поповский Н.И., Давыдов В.В. // *Электросвязь*. № 8. 44 (2024).
- [4] Isaenko D., Reznikov B., Rodin S. // *2022 VIII International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*. IEEE. 1 (2022).
- [5] Шагако С.А., Давыдов В.В., Наумова В.В. Особенности контроля положения оси лазерного излучения с использованием управляемых электрооптических систем в атмосферных оптических линиях связи. / Сборник научных трудов. Гл. 5. 2025.
- [6] Нестеров В.Г., Давыдов В.В., Наумова В.В. Исследование работы волоконно-оптической линии связи при экстремально низком температурном режиме. / Сборник научных трудов. Гл. 6. 2025.
- [7] Zhumazhanov B., Zhetpisbayeva A., Zhetpisbayev K. et al. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. **1**, N 5 (115) 6 (2022).
- [8] Nagase R. *Fiber-optic interconnect technologies* 02.2020. P. 12
- [9] Савельев А.О., Комагоров В.П., Михалевич С.С. // Известия Томского политехнического университета. № 2. (2019).
- [10] Potkay E., Clark H.R., Smyth I. et al. // *Journal of lightwave technology*. **6**, N 8. 1338 (2002).
- [11] Гурьянов А. Волоконные световоды на основе высокочистого кварцевого стекла // Высокочистые вещества и материалы. Получение, анализ, применение. XVI Всероссийская конференция и IX Школа молодых ученых, посвященные 100-летию академика ГГ Девятовых Тезисы докладов XVI конференции, Нижний Новгород, 28–31 мая 2018 г. /Под ред. академика РАН МФ Чурбанова. Нижний Новгород, 2018, С. 56.
- [12] Pylaev V.E., Andreeva E.I. // *St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics*. **75**, N 3. 243 (2024).
- [13] Bourdine A.V., Dashkov M.V., Demidov V.V. et al. // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. **51**, Suppl 4. S274 (2024).
- [14] Гауэр Д. Оптические системы связи. М.: Радио и связь, 1989.
- [15] Трещиков В.Н., Листвин В.Н. DWDM-системы. М.: Техносфера, 2024. С. 476.
- [16] Zhang Q., Chen X., Li X. et al. // *Appl. Opt.* **64**, N 9. 2261 (2025).

Investigation of Phase Modulation of an Analogue Temperature Signal in a Single-Mode Fibre

B. K. Reznikov

Department of Optical and Quantum Communication Systems, Faculty of Infocommunication Networks and Systems,
The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunication
Saint Petersburg 193232, Russia
E-mail: rznkff@net.sut.ru

This article investigates the influence of temperature fluctuations on the performance of optical fibre communication systems. In the context of climate change, increasing environmental challenges, and the rising density of

communication infrastructure, maintaining optimal system parameters—especially over long distances in harsh climates such as mountainous terrain or the Far North—poses significant difficulties. The research focuses on the characterisation of Rayleigh scattering losses (α_{RS}) in single-mode optical fibres fabricated by different technological methods (VAD and MCVD), with varying germanium dioxide (GeO_2) doping concentrations. A linear empirical relationship between α_{RS} and the relative refractive index difference (Δ) was established based on experimental data. A dedicated experimental setup was developed to study the effect of temperature on scattering losses using a 10 km length of fibre exposed to controlled temperature conditions. Measurements demonstrated that α_{RS} increases significantly with higher GeO_2 concentrations at sub-zero temperatures. However, in fibres with 3.5–5 mol % GeO_2 , the losses remain low enough to ensure long-distance data transmission without amplification. The findings suggest that thermal stabilisation may be unnecessary for systems operating in moderate cold climates. The article also discusses the influence of temperature variations on the phase modulation of analogue signals in fibre-optic communication lines.

PACS: 42.79.Sz, 07.60.Vg

Keywords: phase modulation, analogue signal, temperature, single-mode fibre, fibre-optic communication line, measurement, optical sensor, interference, signal modulation, optical characteristics.

Received 16 June 2025.

Сведения об авторе

Резников Богдан Константинович — аспирант, ст. преподаватель кафедры оптических и квантовых систем связи; тел.: (812) 305-12-56, доб. 2076, e-mail: rznkff@net.sut.ru.