



УДК 535.327

## ИСКАЖЕНИЯ СИНХРОНИЗАЦИОННОГО СИГНАЛА В СИСТЕМАХ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА НА БОКОВЫХ ЧАСТОТАХ МОДУЛИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.Д. Дубровская<sup>а</sup>, С.А. Чивилихин<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация  
Адрес для переписки: vddubrovskaja@gmail.com

### Информация о статье

Поступила в редакцию 02.05.17, принята к печати 13.06.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-599-604

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Дубровская В.Д., Чивилихин С.А. Искажения синхронизационного сигнала в системах квантового распределения ключа на боковых частотах модулированного излучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 4. С. 599–604. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-599-604

### Аннотация

**Предмет исследования.** Исследована зависимость параметров сигнала синхронизации от температурных эффектов в оптоволоконном кабеле для системы квантовой связи на поднесущих частотах. Рассматриваются две основные причины искажения сигнала: изменение показателя преломления в зависимости от среднесуточной температуры и дисперсионные эффекты в оптическом волокне, по которому передается сигнал в системе. **Метод.** Для учета указанных эффектов создана температурная модель. Рассчитана задержка сигнала в результате внешних воздействий в системе, работающей со стандартным оптоволоконным кабелем. Учтены реальные эксплуатационные условия, включая условия прокладки кабеля, среднесуточную температуру и скорость ветра. **Основные результаты.** Моделирование проведено на стандартном одномодовом оптоволокне ITU-T G.652D. Экспериментально получено, что максимальное расчетное рассогласование фазы сигнала синхронизации для системы, работающей с длиной волокна 100 км, соответствует временной задержке сигнала 1,7 пс. Рассчитаны максимальные интервалы работы системы без использования фазовой регулировки. Полученные результаты использованы для улучшения параметров системы квантовой связи на поднесущих частотах. Определено, что изменение показателя преломления в волокне вызывает значительное искажение сигнала. Показано, что стабильная работа возможна при подстройке каждые 158 мс. Дополнительная задержка фазы, возникающая в результате дисперсионных эффектов, должна корректироваться каждые 2,3 часа. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют оптимизировать параметры системы квантового распределения ключа на боковых частотах и увеличить общую скорость генерации ключа.

### Ключевые слова

квантовые коммуникации, синхронизация, температурные воздействия на сигнал, хроматическая дисперсия, квантовое распределение ключа

### Благодарности

Исследование проведено при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (074-U01) и Министерства образования и науки Российской Федерации, грант #14.578.21.0112 (RFMEFI57815X0112), контракт №02.G25.31.0229.

## SYNCHRONIZATION SIGNAL DISTORTION IN SUBCARRIER WAVE QUANTUM KEY DISTRIBUTION SYSTEMS

V.D. Dubrovskaja<sup>а</sup>, S.A. Chivilikhin<sup>а</sup>

<sup>а</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation  
Corresponding author: vddubrovskaja@gmail.com

### Article info

Received 02.05.17, accepted 13.06.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-599-604

Article in Russian

**For citation:** Dubrovskaja V.D., Chivilikhin S.A. Synchronization signal distortion in subcarrier wave quantum key distribution systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 599–604 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-599-604

**Abstract**

**Subject of Research.** The paper deals with temperature effects dependence of the synchronization signal parameters in an optical fiber cable for a subcarrier wave quantum communication system. Two main causes of signal distortion are considered: the change in the refractive index as a function of the average daily temperature and the dispersion effects in the optical fiber, over which the signal is transmitted in the system. **Method.** To account for these effects, a temperature model has been created. The signal delay is calculated as a result of external influences in the system working with a standard fiber-optic cable. Real operational conditions are taken into account, including cable laying conditions, average daily temperature and wind speed. **Main Results.** The simulations were carried out on the standard single-mode fiber ITU-T G.652D. It was experimentally obtained that the maximum calculated phase mismatch of the synchronization signal for a system operating at a 100 km fiber length corresponds to a 1.7 ps signal time delay. The maximum operating intervals of the system without the use of phase adjustment are calculated. The obtained results are used to improve the parameters of the subcarrier wave quantum communication system. It is determined that the change in the refractive index in the fiber causes significant distortion of the signal. It is shown that stable operation is possible with adjustment every 158 ms. The additional phase delay resulting from the dispersion effects should be adjusted every 2.3 hours. **Practical Relevance.** The obtained results enable to optimize the parameters of the subcarrier wave quantum key distribution system to increase the overall key generation rate.

**Keywords**

quantum communications, clock synchronization, temperature dependence on the signal, chromatic dispersion, quantum key distribution

**Acknowledgements**

The research has been carried out with the financial support of the Government of the Russian Federation (074-U01) and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under grant agreement #14.578.21.0112 (RFMEFI57815X0112) and contract No 02.G25.31.0229.

**Введение**

Стремительное развитие квантовых технологий открывает новые перспективы в использовании квантовых алгоритмов, создании и моделировании сложных физических, биологических систем, новые методы передачи и обработки информации. Для поддержания прогресса в этих областях необходимо задуматься о возможности интеграции квантовых технологий и особенно систем квантовой коммуникации (КК) в существующие системы связи [1–3].

Для передачи информации на дальние расстояния при помощи систем квантовой коммуникации (КК) используются оптические сигналы, передающиеся по волокнам. В настоящей работе рассмотрена система квантовой рассылки ключа на поднесущих частотах (КРКПЧ) модулированного излучения, разработанная для практических приложений [4]. Одной из особенностей практических систем квантовой связи является наличие сигнала, передаваемого по отдельному каналу и синхронизирующего модули передатчика и приемника. Для безотказной работы системы следует разработать механизмы компенсации негативных эффектов, искажающих этот сигнал [5, 6].

Временная задержка синхронизационного сигнала может возникать в результате внешних воздействий, таких как температура окружающей среды [7]. В ходе исследования была создана температурная модель оптического кабеля с учетом реальных условий эксплуатации системы КРКПЧ [8].

В настоящей работе представлена разработанная температурная модель, учитывающая условия прокладки кабеля, среднесуточную температуру и скорость ветра, а также дисперсионные эффекты, возникающие из-за указанных факторов. На основе этого была рассчитана возникающая задержка сигнала, приводящая к ухудшению сигнала, и улучшены соответствующие параметры системы.

**Моделирование процесса**

В системе квантовой связи на боковых частотах согласование по фазе между передатчиком и приемником определяется тактовыми сигналами соответствующих генераторов, управляемых напряжением. Таким образом, проблема синхронизации системы сводится к точной настройке генераторов передатчика и приемника. Подробное описание фазовой модуляции в системе КРКПЧ приведено в [9, 10].

Основные характеристики систем КК определяет QBER – отношение между ошибочными битами и общим количеством принятых квантовых битов [1]. QBER зависит от двух основных величин: видности сигнала в квантовом канале и темновых отсчетов детектора. Так как значение видности представляет собой вероятность несинфазного детектирования фотона, оно зависит от качества фазового согласования модуляторов передатчика и приемника, используемых для кодирования кубитов. Для современных практических систем КК значение видности обычно составляет 98–99%. Как показано в [8], минимальное допустимое значение видности в системе КРКПЧ соответствует максимальному рассогласованию фаз сигнала  $\Delta\varphi = 0,043$ .

Соотношение между фазовой  $\Delta\varphi$  и временной задержкой  $\Delta t$  сигнала с частотой  $\Omega$  определяется по формуле

$$\Delta t = \Delta\varphi/\Omega.$$

Значение  $\Omega$  обычно составляет несколько гигагерц для систем КРКПЧ [3, 11], в расчетах было использовано значение 4 ГГц. Таким образом, максимальная допустимая временная задержка сигнала синхронизации составляет 1,7 пс.

Температурная модель, разработанная в [8], предназначена для учета влияния нагрева кабеля на возникающую оптическую задержку сигнала. Она была создана с учетом типичного дневного температурного профиля и параметров стандартного оптического кабеля с использованием одномодового оптического волокна ITU-T. G.652D. Уравнение теплопроводности с новыми условиями границ было решено с учетом скорости ветра.

Двумерное уравнение теплопроводности для кабеля можно записать следующим образом:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность;  $\rho$  – плотность;  $c$  – теплоемкость,  $x, y$  – пространственные координаты, а граничные условия – следующим образом:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha(t)(T_a(t) - T|_{r=R}),$$

где  $r, R$  – радиальная координата и радиус кабеля;  $T_a$  – температура окружающей среды;  $T$  – температура на границе кабеля. Коэффициент конвективного теплообмена  $\alpha$  зависит от числа Нуссельта  $Nu$  и диаметра кабеля  $D$  [9]:

$$\alpha = \frac{\lambda Nu}{D}.$$

Число Нуссельта зависит от экспериментальных коэффициентов  $C, m$  и числа Рейнольдса  $Re$ :

$$Nu = CRe^m.$$

Число Рейнольдса, рассчитанное по скорости ветра  $V$  и кинематической вязкости  $\eta$ , равно

$$Re = \frac{DV}{\eta}.$$

Учитываем, что скорость ветра периодически изменяется в зависимости от времени  $V = V_0 + V \cos(\omega t)$ , где  $\omega$  – частота.

Для волокон в кабеле изменение температуры будет уменьшаться с увеличением расстояния от внешней оболочки кабеля до сердечника волокон [12]:

$$T = T_0 + \delta T e^{-\frac{\alpha r}{h^2}} \cos(\alpha t),$$

где  $T_0$  – средняя суточная температура;  $\delta T$  – изменение температуры;  $h$  – расстояние между наружной оболочкой кабеля и сердечником волокна;  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности;  $\tau$  – время в секундах. Начальная (средняя) температура окружающей среды  $T$  выбирается равной 15 °С, с амплитудой колебаний  $\delta T = 10$  К в течение 24 ч.

С использованием созданной температурной модели можно оценить температурную зависимость фазы синхронизационного сигнала. Вклад дисперсии и изменения показателя преломления в задержку сигнала синхронизации находится на основании численного решения уравнений.

### Зависимость задержки сигнала от изменения показателя преломления волокна

Для определения частоты подстройки системы необходимо узнать задержку сигнала, при которой система перестает работать корректно. Задержка зависит от длины кабеля  $L$  и изменения коэффициента преломления в волокне  $\Delta n$ :

$$\Delta t = \frac{L \Delta n}{c}.$$

В свою очередь, показатель преломления в волокне связан с изменением температуры сердечника волокна, а также с деформацией изгиба:

$$\Delta n = \left[ \left( \frac{dn}{dT} \right)_T + \left( \frac{dn}{dT} \right)_R \right] \Delta T.$$

Как показано в [13], для используемого в системе стандартного волокна SMF-28, относящегося к категории ITU-T.G652, эти коэффициенты равны

$$\left( \frac{dn}{dT} \right)_T = 6,8 \cdot 10^{-5} \text{ К},$$

$$\left( \frac{dn}{dT} \right)_R = 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}.$$

соответственно. Таким образом, для кабеля длиной 100 км задержка, выраженная в секундах, будет составлять

$$\Delta t = 2,53 \cdot 10^{-8} \Delta T.$$

### Зависимость задержки сигнала от хроматической дисперсии

Чтобы проанализировать влияние дисперсии на сигнал синхронизации, рассмотрим полную хроматическую дисперсию, описываемую уравнением Селлмейера третьего порядка [14]. Для выбранного оптического волокна его можно смоделировать следующим образом:

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left( \lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right), \tag{2}$$

где  $\lambda_0$  – длина волны нулевой дисперсии;  $S_0$  – наклон хроматической дисперсии при  $\lambda_0$ . Предполагая, что оба параметра зависят от температуры, возьмем производную уравнения (2) по температуре:

$$\frac{dD}{dT} = \frac{1}{4} \left( \lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right) \frac{dS_0}{dT} - \frac{S_0 \lambda_0^3}{\lambda^3} \frac{d\lambda_0}{dT},$$

откуда видно, что  $\frac{dS_0}{dT}$  и  $\frac{d\lambda_0}{dT}$  значительно влияют на  $\frac{dD}{dT}$  при заданной длине волны. Это может привести к неправильной работе системы КК. Следовательно, необходимо учесть данный эффект при расчетах параметров подстройки.

Хотя во время работы системы уже учтен коэффициент дисперсии волокна  $D(T_0)$ , но отклонение от стандартного значения может сильно повлиять на задержку сигнала. Следовательно, этот компонент также должен быть рассмотрен при расчетах параметров подстройки.

Таким образом, суммарная задержка сигнала из-за температурного эффекта может быть представлена как

$$\Delta t = \frac{dD}{dT} (T - T_0) \Delta \lambda L,$$

где  $L$  – длина кабеля;  $\Delta \lambda$  – спектральная ширина.

### Результаты и обсуждение

В ходе исследования была создана температурная модель оптоволоконного кабеля. На основе модели определена временная задержка сигнала синхронизации из-за изменения показателя преломления и хроматической дисперсии в результате температурных воздействий в системе КРКПЧ с длиной кабеля 100 км. Созданная модель учитывает размер и теплопроводность различных элементов кабелей и волокон. Для расчетов было выбрано волокно, расположенное ближе всего к поверхности кабеля, для учета критических эффектов. Разность индексов между сердечником и оболочкой поддерживалась постоянной, а температура менялась. При расчетах были взяты следующие значения коэффициентов описанного кабеля [15]:

$$\begin{aligned} \frac{dS_0}{dT} &= -0,4 \cdot 10^{-6} \text{ пс}/(\text{нм} \cdot \text{км} \cdot \text{К}) \\ \frac{d\lambda_0}{dT} &= 0,26 \text{ нм}/\text{К}. \end{aligned}$$

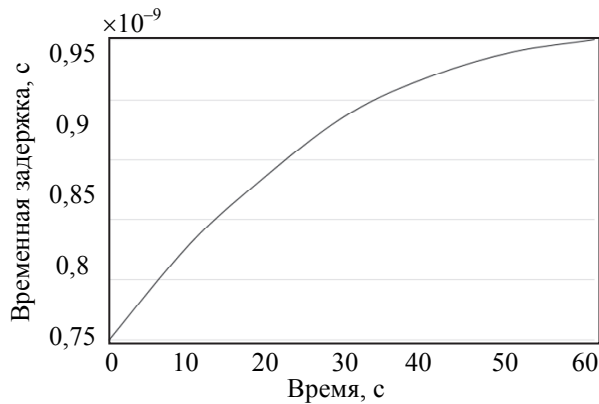


Рис. 1. Зависимость задержки сигнала от изменения показателя преломления волокна

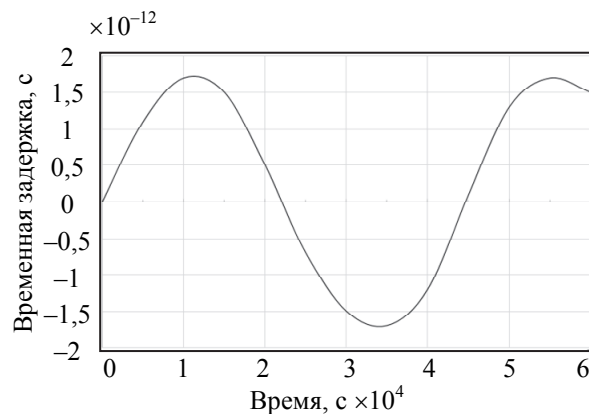


Рис. 2. Зависимость задержки сигнала от хроматической дисперсии

Решая уравнение (1) для выбранных условий, мы рассчитали временную задержку, поскольку временная задержка и изменение температуры связаны линейно. На рис. 1 показана зависимость временной задержки сигнала синхронизации, вызванной нагревом кабеля, из-за ежедневных колебаний температуры в результате изменения показателя преломления. Данная зависимость позволяет установить, что температура, вызывающая максимальную переносимую временную задержку 1,7 пс, накапливается каждые 158 мс.

Дополнительно была найдена временная задержка, вызванная эффектами дисперсии (рис. 2). Для рассматриваемой системы ее вклад оказался небольшим, задержка возникает каждые 2,3 ч. Тем не менее, для систем КРКПЧ необходимо выполнить дополнительную подстройку сигнала, чтобы избежать влияния приведенного коэффициента дисперсии.

### Заключение

В ходе работы была найдена зависимость задержки сигнала синхронизации в волоконно-оптических кабелях от температурных эффектов. Рассмотрена температурная зависимость показателя преломления волокна, длины волны нулевой дисперсии и наклона хроматической дисперсии. Создана температурная модель, с помощью которой рассчитана задержка сигнала в результате внешних воздействий в синхронизации системы квантовой связи на поднесущих частотах модулированного излучения, работающей со стандартным оптическим кабелем. Показано, что температурные эффекты вызывают максимально допустимую задержку сигнала 1,7 пс из-за изменения показателя преломления каждые 158 мс, из-за эффектов дисперсии – каждые 2,3 часа. Эти данные были использованы для улучшения параметров подстройки системы.

### Литература

1. Scarani V., Bechmann-Pasquinucci H., Cerf N.J. et al. The security of practical quantum key distribution // *Reviews of Modern Physics*. 2009. V. 81. P. 1301–1350. doi: 10.1103/RevModPhys.81.1301
2. Bennett C., Brassard G. Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing // *Theoretical Computer Science*. 2014. V. 560. P. 7–11. doi: 10.1016/j.tcs.2014.05.025
3. Agrawal G.P. *Fiber-Optic Communication Systems*. 3<sup>rd</sup> ed. John Wiley & Sons, 2002. 530 p.
4. Merolla J.M., Mazurenko Y. et al. Phase-modulation transmission system for quantum cryptography // *Optics Letters*. 1999. V. 24. N 2. P. 104–106.
5. Korzh B., Wen Lim C.C. et al. Provably secure and practical quantum key distribution over 307km of optical fibre // *Nature Photonics*. 2015. V. 9. N 3. P. 163–168. doi: 10.1038/nphoton.2014.327
6. Wang S., Chen W., Guo J.F. et al. 2 GHz clock quantum key distribution over 260 km of standard telecom fiber // *Optics Letters*. 2012. V. 37. N 6. P. 1008–1010. doi: 10.1364/OL.37.001008
7. Kovalenko A.N. High-temperature superconductivity: from macro- to nanoscale structures // *Наносистемы: физика, химия, математика*. 2016. Т. 7. № 6. С. 941–970. doi: 10.17586/2220-8054-2016-7-6-941-970
8. Dubrovskaja V.D., Chivilikhin S.A. Temperature dependence of the optical fiber cable parameters in subcarrier wave quantum communication systems // *Наносистемы: физика, химия, математика*. 2016. Т. 7. №2. С. 371–377. doi: 10.17586/2220-8054-2016-7-2-371-377
9. Gleim A.V., Egorov V.I., Nazarov Y.V. et al. Secure polarization-independent subcarrier quantum key distribution in optical fiber channel using BB84 protocol with a strong reference // *Optics Express*. 2016. V. 24. N 3. P. 2619–2633. doi: 10.1364/OE.24.002619
10. Gleim A., Egorov V., Nazarov Y.V. et al. Polarization insensitive 100 MHz clock subcarrier quantum key distribution over a 45 dB loss optical fiber channel // *CLEO: QELS Fundamental Science*. 2015. P. 1551p. doi: 10.1364/CLEO\_QELS.2015.FF1A.5
11. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. 5е изд. Л.: Атомиздат, 1979. 417 с.
12. Carslaw H.S., Jaeger J.C. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press, 1959, 510 p.
13. Glojm A.V., Anisimov A.A., Asnis L.N. et al. Quantum key distribution in an optical fiber at distances of up to 200 km and a bit rate of 180 bit // *Bulletin of the Russian Academy of*

### References

1. Scarani V., Bechmann-Pasquinucci H., Cerf N.J. et al. The security of practical quantum key distribution. *Reviews of Modern Physics*, 2009, vol. 81, pp. 1301–1350. doi: 10.1103/RevModPhys.81.1301
2. Bennett C., Brassard G. Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing. *Theoretical Computer Science*, 2014, vol. 560, pp. 7–11. doi: 10.1016/j.tcs.2014.05.025
3. Agrawal G.P. *Fiber-Optic Communication Systems*. 3<sup>rd</sup> ed. John Wiley & Sons, 2002, 530 p.
4. Merolla J.M., Mazurenko Y. et al. Phase-modulation transmission system for quantum cryptography. *Optics Letters*, 1999, vol. 24, no. 2, pp. 104–106. doi:
5. Korzh B., Wen Lim C.C. et al. Provably secure and practical quantum key distribution over 307km of optical fibre. *Nature Photonics*, 2015, vol. 9, no. 3, pp. 163–168. doi: 10.1038/nphoton.2014.327
6. Wang S., Chen W., Guo J.F. et al. 2 GHz clock quantum key distribution over 260 km of standard telecom fiber. *Optics Letters*, 2012, vol. 37, no. 6, pp. 1008–1010. doi: 10.1364/OL.37.001008
7. Kovalenko A.N. High-temperature superconductivity: from macro- to nanoscale structures. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2016, vol. 7, no. 6, pp. 941–970. doi: 10.17586/2220-8054-2016-7-6-941-970
8. Dubrovskaja V.D., Chivilikhin S.A. Temperature dependence of the optical fiber cable parameters in subcarrier wave quantum communication systems. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 371–377. doi: 10.17586/2220-8054-2016-7-2-371-377
9. Gleim A.V., Egorov V.I., Nazarov Y.V. et al. Secure polarization-independent subcarrier quantum key distribution in optical fiber channel using BB84 protocol with a strong reference. *Optics Express*, 2016, vol. 24, no. 3, pp. 2619–2633. doi: 10.1364/OE.24.002619
10. Gleim A., Egorov V., Nazarov Y.V. et al. Polarization insensitive 100 MHz clock subcarrier quantum key distribution over a 45 dB loss optical fiber channel. *CLEO: QELS Fundamental Science*, 2015, p. 1551p. doi: 10.1364/CLEO\_QELS.2015.FF1A.5
11. Kutateladze S.S. *Fundamentals of the Heat Transfer Theory*. 5<sup>th</sup> ed. Leningrad, Atomizdat Publ., 1979, 417 p.
12. Carslaw H.S., Jaeger J.C. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press, 1959, 510 p.
13. Glojm A.V., Anisimov A.A., Asnis L.N. et al. Quantum key distribution in an optical fiber at distances of up to 200 km and a bit rate of 180 bit. *Bulletin of the Russian Academy of*

- Sciences: Physics, 2014, V. 78, N 3, P. 171–175. doi: 10.3103/S1062873814030095
14. Kato T., Koyano Y., Nishimura M. Temperature dependence of chromatic dispersion in various types of optical fiber // *Optics Letters*. 2000. V. 25. N 16. P. 1156–1158.
15. Hamp M.J., Wright J., Hubbard M., Brimacombe B. Investigation into the temperature dependence of chromatic dispersion in optical fiber // *IEEE Photonics Technology Letters*. V. 14. N 11. P. 1524–1526. doi: 10.1109/LPT.2002.803902
- Sciences: Physics*, 2014, vol. 78, no. 3, pp. 171–175. doi: 10.3103/S1062873814030095
14. Kato T., Koyano Y., Nishimura M. Temperature dependence of chromatic dispersion in various types of optical fiber. *Optics Letters*, 2000, vol. 25, no. 16, pp. 1156–1158.
15. Hamp M.J., Wright J., Hubbard M., Brimacombe B. Investigation into the temperature dependence of chromatic dispersion in optical fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, no. 11, pp. 1524–1526. doi: 10.1109/LPT.2002.803902

**Авторы**

*Дубровская Варвара Дмитриевна* – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, vddubrovskaya@gmail.com

*Чивилихин Сергей Анатольевич* – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sergey.chivilikhin@gmail.com

**Authors**

*Varvara D. Dubrovskaya* – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, vddubrovskaya@gmail.com

*Sergey A. Chivilikhin* – PhD, Senior scientific researcher, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sergey.chivilikhin@gmail.com