

Данный текст является русскоязычной версией опубликованной на английском языке статьи и представлен в авторской редакции только на данном сайте!

UDC 004.772

Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-1-15-20

For citation: Lvova A. P. Development of method for increasing sensitivity in wireless optical data transmission channels in visible wavelength range. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020, Vol. 21, No. 1, P. 15–20. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-1-15-20

Для цитирования: Львова А. П. Разработка способа повышения чувствительности в беспроводных оптических каналах передачи данных в видимом диапазоне световых волн // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т. 21, № 1. С. 15–20. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-1-15-20

DEVELOPMENT OF METHOD FOR INCREASING SENSITIVITY IN WIRELESS OPTICAL DATA TRANSMISSION CHANNELS IN VISIBLE WAVELENGTH RANGE

A. P. Lvova

North-Caucasus Federal University
2, Kulakova Av., Stavropol, 355029, Russian Federation
E-mail: lvova.ap@gmail.com

The original method for encoding binary data streams based on QPSK quadrature phase shift keying in a wireless optical communication channel in the visible range is suggested. The algorithm for analyzing signals in the receiving tract is presented. It allows to analyze the presence of two or three pulses of different colors at the input, which will signal the presence of interference or the occurrence of "illumination". In addition, the algorithm provides a possibility of dynamic compensation of external "illumination" by changing the gain of the photodetectors and adjusting the brightness of emitting LEDs. The functional scheme of the device for realization of the offered coding method in the wireless channel on the basis of optical radiation has been developed. Given that most photodiodes are sufficiently wide-band in the visible range of light waves, to increase sensitivity of each color channel and selectivity of the receiving tract it is necessary to apply optical filters for each color channel. The most effective are interference filters made of optically transparent materials with different physical characteristics. The approach for calculating optical filters has been presented.

Keywords: wireless data transmission, optical data transmission channel in the visible wavelength range, encoding based on quadrature phase shift keying, color channel, Li-Fi.

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ В БЕСПРОВОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛАХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ СВЕТОВЫХ ВОЛН

А. П. Львова

Предложен способ кодирования двоичного потока данных на основе квадратурной фазовой манипуляции QPSK, обладающий высокой скоростью и контролем наличия ошибок в канале передачи данных. Представлен алгоритм анализа сигналов в приемном тракте, позволяющий анализировать присутствие двух или трех импульсов разных цветов на входе, что сигнализирует о наличии помехи или возникновении «засветки». Кроме того, алгоритм обеспечивает возможность динамической компенсации внешней «засветки» путем изменения коэффициента усиления фотоприемников и регулировки яркости излучающих светодиодов. Разработана функциональная схема устройства для реализации предлагаемого способа кодирования в беспроводном канале на основе оптического излучения. Учитывая, что большинство светодиодов являются достаточно широкополосными в видимом диапазоне световых волн, для повышения чувствительности каждого цветового канала и селективности приемного тракта, предложено использовать оптические фильтры для каждого цветового канала. Наиболее эффективными являются интерференционные фильтры из оптически прозрачных материалов с различными физическими характеристиками. Представлен подход для расчета оптических фильтров.

Ключевые слова: беспроводная передача данных, оптический канал передачи данных в видимом диапазоне длин волн, кодирование на основе квадратурных фазовых манипуляций, цветовой канал, Li-Fi.

Введение. В целях организации безопасной передачи данных предлагается построение беспроводного оптического канала на основе трехкомпонентных (RGB) светодиодов для освещения помещения и передачи информации.

Известно [1], что человеческий глаз не способен детектировать пульсации светового потока с частотой выше 100 Гц. Таким образом, использование импульсной модуляции на частотах от 100 кГц – 10 МГц позволит обеспечить передачу данных и освещение помещения без вреда здоровью. Дополнительно передача информации по беспроводному оптическому каналу позволяет весьма точно определить периметр защищаемой зоны для обеспечения конфиденциальности передаваемых данных [2].

Способ кодирования на основе фазовых манипуляций. Для осуществления безопасной передачи данных по беспроводному оптическому каналу связи разработан способ кодирования информации на основе квадратурных фазовых манипуляций. Процесс кодирования представлен на рис. 1. Последовательный поток входных бит данных $I(t)$ преобразуется в последовательность N битных блоков $(b_N, b_{N-1}, \dots, b_1, b_0)$, каждый из которых кодируется пакетом RGB импульсов. Пакет импульсов представлен в виде совокупности импульсов по каждому из цветовых каналов за период опорного сигнала. Кодирование происходит на основе квадратурных фазовых манипуляций с четырьмя возможными состояниями фазы относительно опорного сигнала ($45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$) [3]. Таким образом, число цветовых каналов $CC = 3$, количество возможных фазовых состояний $FC = 4$, общее количество уникальных комбинаций в соответствии с правилами комбинаторики [4] $M = CC^{FC} = 3^4 = 81$ состояние.

$b_3 b_2 = \langle 00 \rangle$ $\varphi_R = 45^\circ$	для $b_1 = \langle 0 \rangle$ $f_1 = \varphi_G(\varphi_R) = 90 - \varphi_R$	для $b_0 = \langle 0 \rangle$ $f_3 = f_1 - 90$	} F_1	
		для $b_0 = \langle 1 \rangle$ $f_3 = f_1 + 90$		
	для $b_1 = \langle 1 \rangle$ $f_2 = \varphi_G(\varphi_R) = 180 - \varphi_R$	для $b_0 = \langle 0 \rangle$ $f_3 = f_2 - 180$		} F_2
		для $b_0 = \langle 1 \rangle$ $f_3 = f_2 - 90$		
$b_3 b_2 = \langle 01 \rangle$ $\varphi_R = 135^\circ$	f_1	для $b_0 = \langle 0 \rangle$ $f_3 = f_1 + 90$	} F_2	
		для $b_0 = \langle 1 \rangle$ $f_3 = f_1 - 90$		
	f_2	для $b_0 = \langle 0 \rangle$ $f_3 = f_2 + 180$		} F_2
		для $b_0 = \langle 1 \rangle$ $f_3 = f_2 - 90$		
$b_3 b_2 = \langle 10 \rangle$ $\varphi_R = 225^\circ$	f_1	F_1	} F_2	
f_2				
$b_3 b_2 = \langle 11 \rangle$ $\varphi_R = 315^\circ$	f_1	F_2		
	f_2			

Рис. 1. Таблица фазовых состояний кодирования информации на основе фазовых манипуляций в канале со спектральным разделением

Fig. 1. The table of phase states of information encoding based on phase manipulations in a channel with spectral division

В качестве дополнительного ограничения определим, что за один период опорного сигнала каждый цветовой канал формирует не более одного импульса, а также то, что в одном периоде не может быть двух и более импульсов с одинаковой фазой. Таким образом, число уникальных фазовых состояний определим, как

$$M = \prod_{j=0}^{CC-1} (FC - j) = 4 \cdot 3 \cdot 2 = 24. \quad (1)$$

При кодировании двоичных сигналов число бит, передаваемых за период опорного сигнала, определяется выражением

$$M_2 = \text{div} \left[\log_2 \prod_{j=0}^{CC-1} (FC - j) \right] = 4. \quad (2)$$

В соответствии с (2) в случае бинарного входного потока данных $I(t)$ число бит в каждом передаваемом блоке равно 4.

Оставшиеся 8 состояний можно использовать для передачи служебных сообщений, таких как начало и конец передачи, наличие ошибок и управление потоком данных.

На рис. 2 представлена диаграмма кодирования одного из возможных состояний для каждого из каналов. На диаграмме пунктирной линией показана возможность широтно-импульсной модуляции (ШИМ) интенсивности светового потока, что позволяет обеспечить регулировку яркости приборов освещения для создания комфортных условий работы или выполнить адаптивную подстройку уровня светового потока от источника света с учетом изменения освещенности в помещении. Аналогичная технология предлагается в [5].

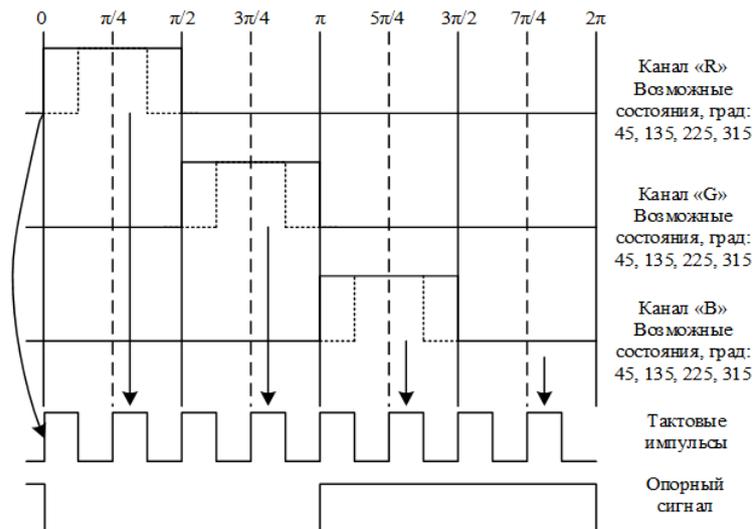


Рис. 2. Диаграмма кодирования информации на основе фазовых манипуляций в канале со спектральным разделением

Fig. 2. The diagram of information encoding based on phase manipulations in a channel with spectral division

Регулировка мощности излучения при использовании в качестве передатчиков светодиодных источников освещения имеет свои ограничения, связанные с созданием требуемой освещенности или компенсации внешней засветки [6; 7]. Автоматическая регулировка чувствительности фотоприемников имеет приоритет перед регулировкой мощности источников света, поскольку позволяет независимо подстроиться под величину общей освещенности и скомпенсировать постоянную составляющую от дополнительных источников света.

Контроль наличия ошибок в канале передачи данных. Способ кодирования предполагает, что за один период опорного сигнала каждый цветовой канал сформирует один импульс равной длительности и все три цветовых компонента будут иметь разные фазы. Одновременное присутствие двух или трех импульсов разных цветов на входе будет сигнализировать о наличии помехи или возникновении «засветки» – изменении интенсивности дополнительного естественного или искусственного освещения [8]. Здесь необходимо различать кратковременные импульсы $\tau \sim 10^{-8} \div 10^{-6}$ с ($\tau \sim 10^{-8} \div 10^{-6}$ с) в трех цветовых каналах, которые распознаются как ошибка в активной фазе передачи данных или используются для синхронизации тактовых генераторов приемника и передатчика между пакетами данных, и медленно изменяемый сигнал ($\tau \sim 10^{-3} \div 10^1$ с) на входе приемника, характерный для засветки естественным или искусственным светом [9; 10]. При формировании синхроимпульсов предлагается наличие одновременных импульсов на всех цветовых каналах для фазового состояния $\varphi = 45^\circ$. На рис. 3 представлена блок-схема алгоритма анализа сигналов в приемном тракте.

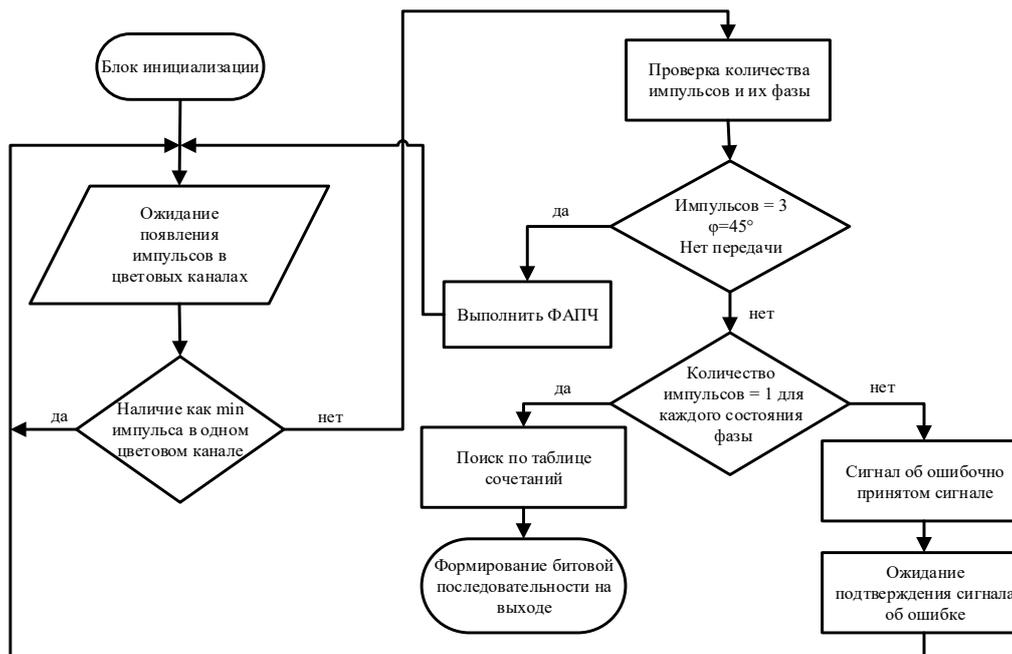


Рис. 3. Алгоритм анализа сигналов в приемном тракте

Fig. 3. The algorithm of signal analysis in the receiving tract

Такой способ обеспечивает контроль и возможность динамической компенсации внешней «засветки» путем изменения коэффициента усиления фотоприемников и регулировки яркости излучающих светодиодов.

Функциональная схема устройства стационарного и мобильного приемопередатчика. На рис. 4 представлена функциональная схема устройства для реализации предлагаемого способа кодирования в беспроводном канале на основе оптического излучения. Входной поток данных бинарной последовательности $I(t)$ подается на вход устройства цифровой обработки данных (УЦОД) [11]. Функциями блока УЦОД являются формирование последовательности прямоугольных импульсов для синхронизации с источником данных, буферизация входных данных и управление потоком, а также преобразование последовательности бит в последовательность четырехбитных блоков. Сигнал синхронизации поступает на вход тактового генератора для обеспечения фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [12; 13], выходной поток данных поступает на вход устройства последовательного кодирования (УПК). Алгоритм функционирования УПК реализует таблицу фазовых состояний, представленную на рис. 1.

полуволновую пленку. Например, если слегка заштрихованный диэлектрик обладает низким показателем преломления, а сильно заштрихованный – высоким, то фильтр, состоящий из множества диэлектрических пленок может быть представлен последовательностью $HLHLLHLH$. Если окружающие диэлектрики обозначить символом G (glass – стекло), то полную структуру можно представить последовательностью $GHLHLLHLHG$.

Более узкую область пропускания и более сильное подавление боковых длин волн можно достигнуть за счет использования более чем трех четвертьволновых пленок [15]. Например, фильтр, описываемый последовательностью $G(HL)^9 HLL(HL)^9 HG$. Обозначение $(HL)^k$ соответствует последовательности $HLHL...HL$ (k раз).

Использование множества полостей приводит к более плоской полосе пропускания и резкому спаду по краям. Оба эффекта показаны на рис. 5, на котором функция пропускания около центральной длины волны λ_0 , изображена для одно-, двух- и трехполостного диэлектрического тонкопленочного фильтра.

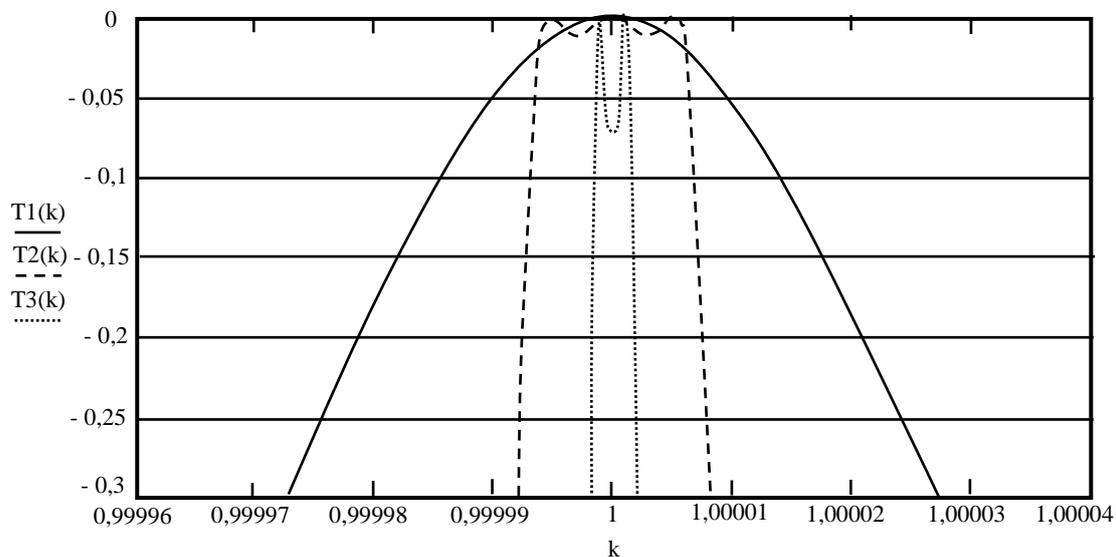


Рис. 5. Сравнение одно-, двух- и трехполостного фильтров

Fig. 5. Comparison of one-, two- and threeband filters

Однополостной фильтр такой же, как и описанный выше. Двухполостной фильтр описывается последовательностью

$$G(HL)^{12} HLL(HL)^{24} HLL(HL)^{12} HG.$$

Трехполостной фильтр описывается последовательностью

$$G(HL)^{10} HLL(HL)^{21} HLL(HL)^{21} HLL(HL)^{10} HG.$$

Заключение. Преимуществами предлагаемого подхода являются увеличение скорости передачи информации в беспроводных каналах на основе технологии VLC, улучшение помехозащищенности за счет используемой технологии кодирования и алгоритма компенсации изменения светового потока внешнего источника освещения («засветки»), большая защищенность канала от несанкционированного доступа к информации, реализуемая посредством распределенного спектрального кодирования и возможности более эффективной фильтрации светового потока от VLC передатчика в красном и синем цветовом диапазонах

Таким образом, разработан способ кодирования данных в беспроводных оптических каналах связи, обладающий повышенной помехозащищенностью.

Для повышения чувствительности каждого цветового канала и селективности приемного тракта предложено использовать оптические фильтры для каждого цветового канала. Наиболее эффективными являются интерференционные фильтры из оптически прозрачных материалов с различными физическими характеристиками.

References

1. Nikiforov S. D. [Physical Aspects of Semiconductor Light Perception by the Human Eye]. *Komponenty i tekhnologii*. 2008, No. 89, P. 84–94 (In Russ.).
2. Zaocheng Wang, Qi Wang, Wei Huang, Zhengyang. Visible Light Communications: Modulation and Signal Processing. 2017, Wiley-IEEE Press, 368 p.
3. Elgala H., Mesleh R., Haas H., Pricope B. OFDM visible light wireless communication based on white LEDs. In *IEEE 65th Vehicular Technology Conference*. Dublin, Ireland, 22–25 April 2007, VTC2007-Spring, P. 2185–2189.
4. Korn G. Korn T. *Spravochnik po matematike* [Handbook of mathematics]. 1974, Moscow, Nauka Pub., 831 p.
5. Zhao S., Xu J., Trescases O. A dimmable LED driver for visible light communication (VLC) based on LLC resonant dc-dc converter operating in burst mode. IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC), Long Beach, USA, March 2013, P. 2144–2150.
6. Aliaberi A., Sofotasios P., Muhaidat S. Modulation Schemes for Visible Light Communications. COMMNET 1–10, 2019.
7. Dmitrov S., Haas H. Principles of LED Light Communications: Towards Networked Li-Fi. 2015, United Kingdom, Cambridge: Cambridge University Press, 207 p.
8. Malsugenov O., Chipiga A., Lvova A. Improving the Efficiency of Wireless Optical Transmission Channel in the Visible Wavelength Range. *Proceedings of the 7th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent decision making Support (ITIDS 2019) – advances in Intelligent Systems Research*. 2019, Vol. 166, P. 246–250.
9. Jamieson I. Visible Light Communication (VLC) Systems. July 14, 2010. Available at: <http://www.bemri.org/component/content/article/3-home/18-visible-lightcommunication-vlc-systems.html> (accessed 20.12.2019).
10. O'Brien, D., Kang, T.-G., and Matsumura, T. Visible Light Communication: Tutorial. 2010. Available at: http://www.ieee802.org/802_tutorials/2008-03/15-08-0114-02-0000-LC_Tutorial_MCSamsung-VLCC-Oxford_2008-03-17.pdf. In IEEE 802.15-<08/0114-02> (accessed 20.12.2019).
11. Gauer J. *Opticheskie sistemy svyazi* [Optical communication systems]. 1989, Moscow, Radio i svyaz Publ., 504 p.
12. Sklyar B. *Cifrovaya svyaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye* [Digital communication. Theoretical foundations and practical application]. 2007, Moscow, Williams Publ., 1104 p.
13. Sultanov A. H., Usmanov R. G., Sharifgaleev I. A., Vinogradova I. L. *Volonno-opticheskie sistemy peredachi: voprosy ochenki rabotosposobnosti* [Fiber-optic transmission systems: performance assessment issues]. 2005, Moscow, Radio i svyaz Publ., 373 p.
14. Varjel S. V. *Volonnyye breggovskie reshetki* [Fiber Bragg gratings]. 2015, St. Petersburg, Universitet ITMO Publ., 65 p.
15. Nureev I. I. [Modeling of spectral characteristics of phased fiber Bragg gratings as sensors of sensor systems]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015, No. 1-1, P. 350–350 (In Russ.).

Библиографические ссылки

1. Никифоров С. Д. Физические аспекты восприятия полупроводникового света человеческим глазом // Компоненты и технологии. 2008. № 89. С. 84–94.
2. Zaocheng Wang, Qi Wang, Wei Huang, Zhengyang. Visible Light Communications: Modulation and Signal Processing. 2017, Wiley-IEEE Press, 368 p.
3. Elgala H., Mesleh R., Haas H., Pricope B. OFDM visible light wireless communication based on white LEDs. In IEEE 65th Vehicular Technology Conference. Dublin, Ireland, 22–25 April 2007, VTC2007-Spring, P. 2185–2189.
4. Корн Г. Корн Т. Справочник по математике. М. : Наука, 1974. 831 с.
5. Zhao S., Xu J., Trescases O. A dimmable LED driver for visible light communication (VLC) based on LLC resonant dc-dc converter operating in burst mode. IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC), Long Beach, USA, March 2013. P. 2144–2150.
6. Aliaberi A., Sofotasios P., Muhaidat S. Modulation Schemes for Visible Light Communications. COMMNET 1-10, 2019.
7. Dmitrov S., Haas H. Principles of LED Light Communications: Towards Networked Li-Fi. 2015, United Kingdom, Cambridge: Cambridge University Press, 207 p.
8. Malsugenov O., Chipiga A., Lvova A. Improving the Efficiency of Wireless Optical Transmission Channel in the Visible Wavelength Range // Proceedings of the 7th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent decision making Support (ITIDS 2019) – advances in Intelligent Systems Research. 2019. Vol. 166. P. 246–250.
9. Jamieson I. Visible Light Communication (VLC) Systems. July 14, 2010 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bemri.org/component/content/article/3-home/18-visible-light-communication-vlc-systems.html> (accessed 20.12.2019).
10. O'Brien D., Kang T.-G., Matsumura T. Visible Light Communication: Tutorial. 2010. [Электронный ресурс]. URL: http://www.ieee802.org/802_tutorials/2008-03/15-08-0114-02-0000-LC_Tutorial_MCSamsungVLCC-Oxford_2008-03-17.pdf. In IEEE 802.15-<08/0114-02> (accessed 20.12.2019).
11. Гауэр Дж. Оптические системы связи : пер. с англ. М. : Радио и связь, 1989. 504 с.
12. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М. : Вильямс, 2007. С. 1104.
13. Волоконно-оптические системы передачи: вопросы оценки работоспособности / А. Х. Султанов, Р. Г. Усманов, И. А. Шарифгалиев, И. Л. Виноградова. М. : Радио и связь, 2005. 373 с.
14. Варжель С. В. Волоконные брэгговские решетки. СПб. : Университет ИТМО, 2015. 65 с.
15. Нуреев И. И. Моделирование спектральных характеристик фазированных волоконных

решеток Брэгга как датчиков сенсорных систем // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 350–350.

©Lvova A. P., 2020

Lvova Anna Pavlovna – PhD student, assistant lecturer, department of information security of automated systems, North-Caucasus Federal University, Institute of information technologies and telecommunications. E-mail: lvova.ap@gmail.com.

Львова Анна Павловна – аспирант, ассистент кафедры информационной безопасности автоматизированных систем; Северо-Кавказский федеральный университет, Институт информационных технологий и телекоммуникаций. E-mail: lvova.ap@gmail.com.