



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-6-37-44>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382

ОБНАРУЖЕНИЕ КАНАЛА УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ ИЗ МНОГОМОДОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ПРИ ПОМОЩИ КРЕМНИЕВОГО ФОТОУМНОЖИТЕЛЯ

И.Р. ГУЛАКОВ, А.О. ЗЕНЕВИЧ, О.В. КОЧЕРГИНА, Т.А. МАТКОВСКАЯ

Белорусская государственная академия связи (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 10 мая 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. В настоящее время для передачи данных широко используют волоконно-оптические линии связи. Несмотря на то, что информационный сигнал распространяется внутри оптического волокна, покрытого защитной оболочкой, существуют различные методы формирования каналов утечки информации из таких волокон. Одним из наиболее распространенных способов обнаружения канала утечки информации является контроль мощности информационных сигналов, транслируемых по оптическому волокну. В данной работе определены параметры волоконно-оптической линии связи на основе многомодовых оптических волокон, для которых можно использовать кремниевые фотоумножители для обнаружения каналов утечки информации. Представлены зависимости ответвляемой мощности от диаметра изгиба волокна. Получено, что увеличение диаметра изгиба приводит к уменьшению ответвляемой мощности и снижению способности обнаружения фотоприемником потери мощности на оптоволокне. Величина ответвляемой мощности оптического излучения с длиной волны 850 нм больше, чем для 650 нм при всех исследуемых диаметрах изгиба. Установлено, что увеличение вводимой в волокно мощности оптического излучения до 10 мВт позволяет обеспечить обнаружение потери мощности до $-0,005$ дБ для длины волны оптического излучения 850 нм и $-0,142$ дБ для длины волны 650 нм. Результаты этой статьи могут найти применение в системах защиты информации, передаваемой по волоконно-оптическим линиям связи.

Ключевые слова: информационная безопасность, канал утечки информации, многомодовое оптическое волокно, контроль мощности информационных сигналов, волоконно-оптические линии связи.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Кочергина О.В., Матковская Т.А. Обнаружение канала утечки информации из многомодового оптического волокна при помощи кремниевого фотоумножителя. Доклады БГУИР. 2022; 20(6): 37-44.

DETECTION OF THE INFORMATION LEAKAGE CHANNEL FROM MULTIMODE OPTICAL FIBER USING A SILICONE PHOTOMULTIPLIER

IVAN R. GULAKOV, ANDREY O. ZENEVICH, OLGA V. KOCHERGINA,
TATIANA A. MATKOVSKAIA

Belarusian State Academy of Communications (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 10 May 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. Currently, fiber-optic communication lines are widely used for data transmission. Despite the fact that the information signal propagates inside the optical fiber, covered with a protective shell, there are various ways to form information leakage channels from such fibers. The power control of the information signals transmitted over an optical fiber is one of the most common ways to detect an information leakage channel. This paper determines the parameters of a fiber-optic communication line based on multimode optical fibers for which silicon photomultipliers to detect information leakage channels can be used. The dependences of the branched power on the fiber bending diameter are presented. It has been found that the bending diameter increase leads to the branched power decrease and a decrease in the ability of the photodetector to detect power loss in the optical fiber. The value of the branched power of optical radiation with a wavelength of 850 nm is greater than for 650 nm for all studied bending diameters. It has been established that an increase in the optical radiation power introduced into the fiber to 10 mW makes it possible to detect power loss up to -0.005 dB for an optical radiation wavelength of 850 nm, and -0.142 dB for a wavelength of 650 nm. The results of this article can be used in systems for protecting information transmitted over fiber-optic communication lines.

Keywords: information security, information leakage channel, multimode optical fiber, information signal power control, fiber-optic communication lines.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Gulakov I.R., Zenevich A.O., Kochergina O.V., Matkovskaia T.A. Detection of the Information Leakage Channel from Multimode Optical Fiber Using a Silicone Photomultiplier. *Doklady BGUIR*. 2022; 20(6): 37-44.

Введение

Для передачи данных в настоящее время находят широкое применение волоконно-оптические линии связи, в которых оптические информационные сигналы распространяются внутри оптического волокна, покрытого защитной оболочкой [1–3]. Несмотря на защитную оболочку известны различные способы формирования каналов утечки информации [4]. Поэтому обеспечение информационной безопасности волоконно-оптических линий связи является актуальной задачей. Для решения этой задачи необходимо разрабатывать способы, позволяющие обеспечивать защиту информации, транслируемой по таким линиям связи. Одним из наиболее распространенных способов обнаружения канала утечки информации является контроль мощности информационных сигналов, транслируемых по оптическому волокну [5, 6]. Следует отметить, что большинство известных методов используется для защиты одномодовых оптических волокон [7], однако для передачи данных используются и многомодовые оптические волокна. При передаче данных в многомодовых оптических волокнах применяется длина волны излучения 850 нм [8]. Поэтому для обнаружения каналов утечки информации в многомодовых оптических волокнах возможно использование кремниевых фотоприемников, которые по сравнению с другими фотоприемниками обладают высокой чувствительностью к излучению с такой длиной волны и низким темновым током. Наиболее перспективными среди кремниевых фотоприемников являются кремниевые многоэлементные лавинные фотоприемники, которые получили название кремниевые фотоумножители (Si-ФЭУ). Это обусловлено тем, что Si-ФЭУ обладают достаточно большими коэффициентами усиления ($\geq 10^5$) и имеют большие площади

фоточувствительной площадки (до $6 \times 6 \text{ мм}^2$) по сравнению с другими типами лавинных фотоприемников [9].

Таким образом, целью данной работы является определение возможности использования кремниевых фотоумножителей для обнаружения каналов утечки информации из многомодового оптического волокна.

Экспериментальная установка и методика измерений

В качестве объектов исследований использовались серийно выпускаемые многомодовые оптические волокна G651. Данные оптические волокна были выбраны для исследований, поскольку они достаточно часто используются в оптических кабелях. Также в качестве объекта исследований использовались кремниевые фотоумножители производства ОАО «Интеграл» КОФ5-1035. Для проведения измерений из партии в 10 штук случайным образом были отобраны три Si-ФЭУ.

Экспериментальная установка функционирует следующим образом (рис. 1): от источника излучения ИО в волокно ОВ вводится оптическое излучение с длиной волны 650 или 850 нм. Эти длины волн соответствуют области спектральной чувствительности Si-ФЭУ. Излучение с длиной волны 850 нм используется для передачи данных по многомодовому оптическому волокну, а с длиной волны 650 нм применяется для визуального поиска дефектов в оптическом волокне. Мощность вводимого в волокно оптического излучения могла изменяться в пределах от 0,5 до 10 мВт. К выходу волокна ОВ подключен измеритель ИМ для определения мощности излучения на выходе из волокна. Длина оптического волокна ОВ составляла 550 м, что соответствует максимальной длине оптического волокна, которая используется для реализации технологий Ethernet [10] для объектовых линий связи. Отметим, что эти технологии в настоящее время широко используются для передачи данных. Вблизи выхода волокна ОВ формируется изгиб, представляющий собой окружность. Диаметр этого изгиба можно изменять в пределах от 5 до 30 мм. Отметим, что при диаметре изгиба d меньшем 5 мм может произойти излом оптического волокна, а при $d > 30$ мм затухание мощности на изгибе оптического волокна мало и им можно пренебречь.

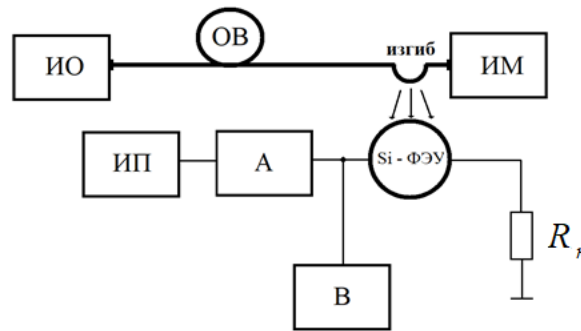
В области изгиба оптического волокна происходит выход транслируемого оптического излучения за пределы волокна ОВ. Это излучение регистрируется при помощи Si-ФЭУ.

На Si-ФЭУ подается напряжение обратного смещения U_n от источника постоянного напряжения ИП, общее для всех его элементов. Для работы кремниевого фотоумножителя используются напряжения питания, превышающие напряжения пробоя p - n -перехода [9, 11]. В этом случае происходит лавинное усиление первичных свободных носителей заряда (самогасящийся лавинный процесс), возникающих внутри области пространственного заряда отдельного элемента при поглощении оптического излучения или в результате тепловой генерации носителей, и появление электрического сигнала на выходе Si-ФЭУ. Протекание электрического тока через резистор R_n вызывает падение напряжения на сработавшем фоточувствительном элементе, что приводит к гашению лавинного процесса и локализации его в пределах засвеченных элементов, при этом остальная часть элементов остается в рабочем состоянии, готовом к регистрации излучения. Через время τ , зависящее от конструкции Si-ФЭУ, напряжение на сработавшем элементе восстанавливается до первоначального значения, и элемент снова становится чувствительным к оптическому излучению. Вклад в электрический сигнал на выходе Si-ФЭУ вносит каждый сработавший элемент.

Величина напряжения питания контролируется при помощи вольтметра В. Амперметр А используется для определения электрического тока I , протекающего через Si-ФЭУ.

Для ограничения величины тока I применяется резистор нагрузки R_n , который включен последовательно с Si-ФЭУ. Величина сопротивления резистора нагрузки $R_n = 1 \text{ кОм}$.

При проведении исследований определяется фототок I_ϕ . Для этого измеряются величины электрического тока I_m и I , протекающего через Si-ФЭУ в отсутствии оптического излучения в волокне и при его наличии соответственно. После чего фототок вычисляется по формуле $I_\phi = I - I_m$. По величине фототока определялась мощность оптического излучения, поступающего на Si-ФЭУ, $P_\phi = S \cdot I_\phi$, где S – чувствительность Si-ФЭУ.



ИО – источник оптического излучения; ИМ – измеритель мощности; ИП – источник постоянного напряжения; А – амперметр; В – вольтметр; R_n – резистор нагрузки; Si-ФЭУ – кремниевый фотоумножитель
ИО – optical power source; ИМ – power optical measurer; ИП – constant voltage source; А – ammeter; В – voltmeter; R_n – load resistor; Si-ФЭУ – silicon photomultiplier

Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки
Fig. 1. Block diagram of the experimental setup

Чувствительность фотоприемника S определяется по методике, описанной в ГОСТ 17772, на линейном участке зависимости мощности оптического излучения P_ϕ от тока I_ϕ . Для получения этой зависимости на Si-ФЭУ подается оптическое излучение заданной мощности с выхода волокна ОВ. Оптическое излучение заданной мощности создавалось за счет изменения диаметра изгиба. Перед направлением оптического излучения с выхода волокна ОВ на Si-ФЭУ, мощность этого излучения определялась измерителем мощности ИМ.

Исследования были выполнены при комнатной температуре окружающей среды $T = 293$ К. При проведении экспериментальных исследований определялась потеря мощности излучения на изгибе оптического волокна D_n . Для этого использовалась следующая формула:

$$D_n = 10 \lg \left(\frac{P_\epsilon}{P} \right), \quad (1)$$

где P – мощность оптического излучения, поступающая на ИМ без изгиба оптического волокна; P_ϵ – мощность оптического излучения, поступающая на ИМ при наличии изгиба оптического волокна.

Также в процессе исследования определялась величина D_ϵ ответвления мощности оптического излучения с изгиба (см. рис. 1). Эта величина вычисляется на основании выражения

$$D_\epsilon = 10 \lg \left(\frac{SI_\phi}{P} \right). \quad (2)$$

При проведении исследований определялась способность обнаружения дополнительных потерь мощности в оптическом волокне D_o . Под величиной D_o понимается минимальное значение дополнительных потерь мощности оптического излучения, вносимых подключением несанкционированного пользователя к волокну, которое возможно зарегистрировать. На основании работы [10] для определения D_o можно предложить следующую формулу:

$$D_o = 10 \lg \left(1 - \frac{P_n 10^{-0,1(D_n + \alpha L)}}{P_0} \right), \quad (3)$$

где P_n – пороговая мощность фотоприемного устройства; P_0 – мощность оптического излучения, поступающая на вход оптического волокна; α – коэффициент затухания оптического излучения в волокне; L – расстояние от входа оптического волокна до места формирования изгиба (изгиб формировался в конце ОВ).

Отметим, что для случая, когда $\frac{P_n 10^{-0,1(D_n + \alpha L)}}{P_0} \geq 1$, обнаружить дополнительные потери мощности оптического излучения, вносимые подключением несанкционированного пользователя к волокну, не представляется возможным.

Результаты измерений и их обсуждение

В процессе проведения исследований были определены напряжения питания Si-ФЭУ, при которых чувствительность максимальна, и характеристики фотоприемников при указанных напряжениях. Полученные характеристики Si-ФЭУ для данного напряжения представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики кремниевого фотоумножителя
Table 1. Characteristics of a silicon photomultiplier

Тип Si-ФЭУ Si-PMT type	Напряжение питания, В Supply voltage, V	Длина волны, нм Wavelength, nm	Чувствительность, А/Вт Sensitivity, A/W	Пороговая мощность, Вт Threshold power, W
КОФ5-1035	31,0	650	0,08	$5,1 \cdot 10^{-9}$
		850	0,01	$13,0 \cdot 10^{-9}$

Как следует из представленных зависимостей, уменьшение диаметра изгиба d приводило к уменьшению величины D_n . Отметим, что для длины волны оптического излучения 650 нм величина D_n была больше, чем для длины волны 850 нм при всех исследуемых диаметрах изгиба. Это подтверждается зависимостью коэффициента затухания от длины волны для оптических волокон, приведенной в работе [12]. Данные о коэффициентах затухания оптического излучения представлены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры оптического волокна
Table 2. Optical fiber parameters

Оптическое волокно Optical fiber	Длина волны, нм Wavelength, nm	Коэффициент затухания, дБ/км Attenuation coefficient, dB/km
G651	650	-3,5
	850	-3,0

На рис. 2, *a* представлены зависимости потери мощности излучения на изгибе оптического волокна D_n от диаметра изгиба d . Как следует из представленных зависимостей, уменьшение диаметра изгиба d приводило к уменьшению величины D_n . Отметим, что для длины волны оптического излучения 650 нм величина D_n была больше, чем для длины волны 850 нм при всех исследуемых диаметрах изгиба.

На рис. 2, *b* показаны полученные зависимости величины D_b ответвления мощности оптического излучения с изгиба от диаметра изгиба d . Как следует из полученных результатов, увеличение диаметра изгиба приводит к уменьшению величины D_b . Для длины волны оптического излучения 650 нм значение D_b было меньше, чем для длины волны 850 нм при всех исследуемых диаметрах изгиба.

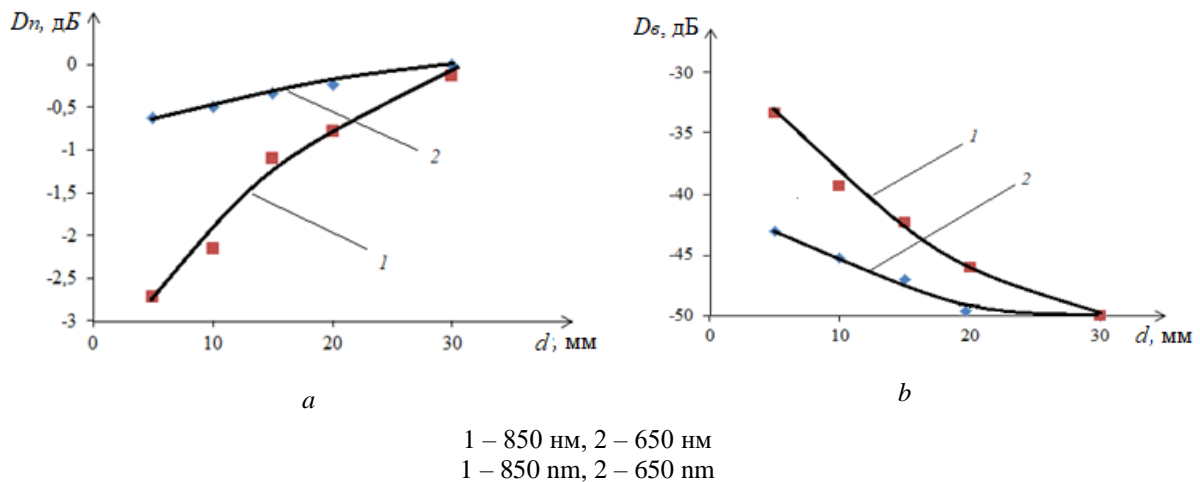


Рис. 2. Зависимость потери мощности на изгибе и величины ответвленной мощности от диаметра изгиба:
a – потери мощности на изгибе; *b* – величина ответвленной мощности

Fig. 2. Dependence of the bending power loss and the magnitude of the branch power on the bending diameter:
a – bending power loss; *b* – the amount of branched power

На рис. 3 представлена зависимость способности обнаружения дополнительных потерь мощности в оптическом волокне от мощности оптического излучения, поступающей на вход оптического волокна.

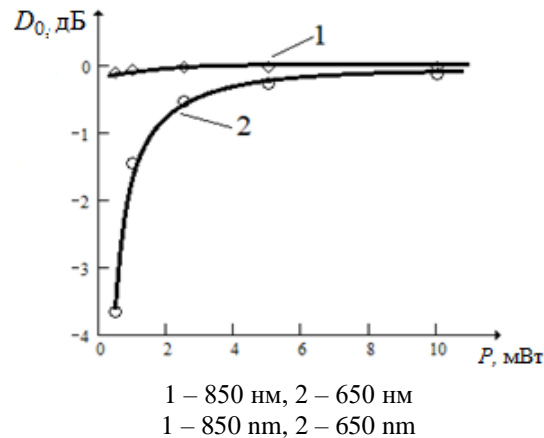


Рис. 3. Зависимость способности обнаружения дополнительных потерь мощности в оптическом волокне от мощности оптического излучения, вводимой в волокно

Fig. 3. Dependence of the ability to detect additional power losses in an optical fiber on the power of optical radiation injected into the fiber

Из полученных зависимостей следует, что увеличение вводимой в волокно мощности оптического излучения до 10 мВт позволяет обеспечить способность обнаружения потери мощности на выходе до $-0,005$ дБ для длины волны оптического излучения 850 нм. Для длины волны 650 нм было получено наименьшее значение величины $D_0 = -0,142$ дБ.

На рис. 4 представлена зависимость величины D_0 от диаметра изгиба оптического волокна. Данные зависимости были получены для вводимой в волокно мощности оптического излучения 1 мВт. Такая мощность для проведения исследования была выбрана, поскольку она соответствовала максимальной мощности, применяемой в технологиях Ethernet для многомодового оптического волокна [10]. Увеличение диаметра изгиба приводило к уменьшению величины D_0 как для длины волны 650 нм, так и для 850 нм. При длине волны 650 нм и диаметрах изгиба более 20 мм обнаружить какое-либо изменение мощности оптического излучения в волокне не представлялось возможным. Наибольшие величины D_0 во всем диапазоне исследуемых диаметров изгиба наблюдаются для длины волны 850 нм, чем для длины волны 650 нм. Максимальное значение D_0 получено при диаметре изгиба 5 мм для этих длин волн. Так, для длины волны 650 нм это значение составляло $-0,6$ дБ, а для 850 нм оно было равно $-0,04$ дБ.

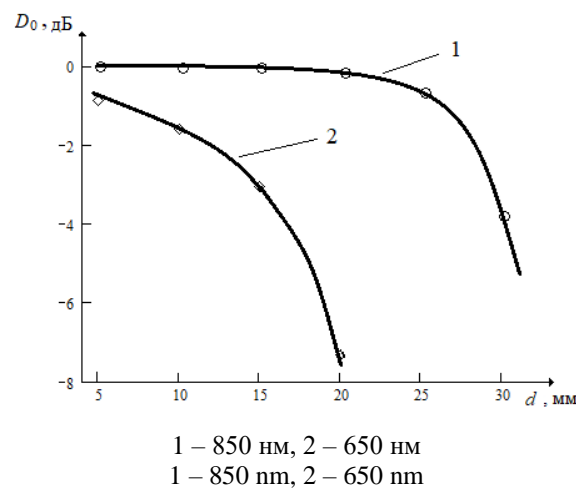


Рис. 4. Зависимость способности обнаружения дополнительных потерь мощности в оптическом волокне от диаметра изгиба оптического волокна

Fig. 4. Dependence of the ability to detect additional power losses in an optical fiber on the bending diameter of the optical fiber

Заключение

Получено, что уменьшение диаметра изгиба многомодового оптического волокна приводит к увеличению величины ответвляемой мощности оптического излучения. Для длины волны оптического излучения 650 нм величина ответвляемой мощности меньше, чем для длины волны 850 нм при всех исследуемых диаметрах изгиба.

Установлено, что увеличение вводимой в волокно мощности оптического излучения до 10 мВт позволяет получить способность обнаружения дополнительных потерь мощности в оптическом волокне, равную $-0,005$ дБ для длины волны оптического излучения 850 нм. Для длины волны 650 нм наибольшее значение способности обнаружения дополнительных потерь мощности в оптическом волокне составило $-0,142$ дБ.

Определено, что увеличение диаметра изгиба приводило к уменьшению способности обнаружения дополнительных потерь мощности в оптическом волокне. Наибольшее значение этой величины во всем диапазоне исследуемых диаметров изгиба наблюдается для длины волны 850 нм.

Список литературы

1. Govind P. Agrawal *Fiber-Optic Communication Systems*. New York: Wiley-Interscience; 2002.
2. Дмитриев С.А., Слепов Н.Н. *Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы*. Москва: Техносфера; 2010.
3. Убайдуллаев Р.Р. *Волоконно-оптические сети*. Москва: Эко-Трендз; 2001.
4. Зеневич А.О. *Обнаружители утечки информации из оптического волокна*. Минск: Белорусская государственная академия связи; 2017.
5. Манько А., Каток В., Задорожний М. Защита информации на волоконно-оптических линиях связи от несанкционированного доступа. *Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні*. 2001;2:249-255.
6. Грашачев В. Фотоника в системах безопасности и защиты информации *Фотоника*. 2011;6:58-63.
7. *Способ обнаружения несанкционированных отводов сигнала с одномодовых оптических волокон*: патент 2506701, Российская Федерация, МПК G01M11/00. Заявитель и патентообладатель ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ. № 2012133005/28; заявл. 01.08.2012; опубл. 10.02.2014. Официальный бюллетень. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. 2014;4:1-9.
8. Складаров О.К. *Волоконно-оптические сети и системы связи*. С.-Петербург: Издательство «Лань»; 2021.
9. Stagliano M., Abegão L., Chierici A., d'Errico F. Silicon photomultiplier current and prospective applications in biological and radiological photonics. *EPH - International Journal of Science and Engineering*. 2018;10:10-29.
10. Шубин В. В. *Информационная безопасность волоконно-оптических систем*. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ; 2015.
11. Клемин С. Кремниевый фотоэлектронный умножитель. Новые возможности. *ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес*. 2007;8:80-86.
12. Листвин А.В. Листвин В.Н. *Рефлектометрия оптических волокон*. Москва: ЛЕСАРпт; 2005.

References

1. Govind P. Agrawal *Fiber-Optic Communication Systems*. New York: Wiley-Interscience; 2002.
2. Dmitriev S.A., Slepov N.N. [*Fiber-optic technology: current state and new prospects*]. Moscow: Technosphaera; 2010. (In Russ.)
3. Ubaidullaev R.R. [*Fiber-optic networks*]. Moscow: Eco-Trends; 2001. (In Russ.)
4. Zenevich A.O. [*Detectors of information leakage from optical fiber*]. Minsk: Belarusian State Academy of Communications; 2017. (In Russ.)
5. Manko A., Katok V., Zadorozhnyi M. [Protection of information on fiber-optic communication lines from unauthorized access]. *Legal, normative and metrological support of the information protection system in Ukraine*. 2001;2:249-255. (In Russ.)
6. Grashachev V. [Photonics in security and information protection systems]. *Photonics*. 2011;6:58-63. (In Russ.)
7. [*Method for detecting unauthorized signal taps from single-mode optical fibers*]: Pat. 2506701 Russian Federation, IPC G01M11/00. Applicant and patentee Federal State Unitary Enterprise RFNC-VNIIEF. No. 2012133005/28; dec. 08/01/2012; publ. 02/10/2014. Official Bull. Federal Service for Intellectual Property. 2014;4:1-9. (In Russ.)

8. Sklyarov O.K. [*Fiber-optic networks and communication systems*]. St. Petersburg: Lan Publishing House, 2021. (In Russ.)
9. Stagliano M., Abegãob L., Chierici A., d'Errico F. Silicon photomultiplier current and prospective applications in biological and radiological photonics. *EPH - International Journal of Science and Engineering*. 2018;10:10-29.
10. Shubin V.V. [*Information security of fiber-optic systems*]. Sarov: RFNC-ARRIEP; 2015. (In Russ.)
11. Klemin S. [Silicon photomultiplier. New opportunities]. *ELECTRONICS: Science, Technology, Business*. 2007;8:80-86. (In Russ.)
12. Listvin A.V. Listvin V.N. [*Reflectometry of optical fibers*]. Moscow: LESARart; 2005. (In Russ.)

Вклад авторов

Гулаков И.Р. разработал методику проведения исследования, принял участие в интерпретации его результатов, подготовил статью к опубликованию.

Зеневич А.О. осуществил научное руководство исследованием, сформулировал научные гипотезы, проверенные посредством эксперимента, принял участие в интерпретации результатов исследования.

Кочергина О.В. произвела настройку экспериментальной установки, провела измерения и обработку их результатов, подготовила статью к опубликованию.

Матковская Т.А. произвела настройку экспериментальной установки, провела измерения и обработку их результатов, подготовила статью к опубликованию.

Authors' contribution

Gulakov I.R. developed a research methodology, took part in the interpretation of research results, prepared an article for publication.

Zenevich A.O. carried out the scientific leadership of the research, formulated scientific hypotheses, verified through experiment, took part in the interpretation of the research results.

Kochergina O.V. set up the experimental setup, carried out measurements and processed their results, prepared an article for publication.

Matkovskaia T.A. set up the experimental setup, carried out measurements and processed their results, prepared an article for publication.

Сведения об авторах

Гулаков И.Р., д.ф.-м.н., профессор кафедры физических и математических основ информатики Белорусской государственной академии связи.

Зеневич А.О., д.т.н., профессор, ректор Белорусской государственной академии связи.

Кочергина О.В., аспирант Белорусской государственной академии связи.

Матковская Т.А., аспирант Белорусской государственной академии связи.

Information about the authors

Gulakov I.R., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor at the Department of Physical and Mathematical Foundations of Informatics of the Belarusian State Academy of Communications.

Zenevich A.O., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Rector of the Belarusian State Academy of Communications.

Kochergina O.V., Postgraduate at the Belarusian State Academy of Communications.

Matkovskaia T.A., Postgraduate at the Belarusian State Academy of Communications.

Адрес для корреспонденции

220114, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2,
Белорусская государственная академия связи;
тел. +375 29 509-02-29;
e-mail: tandem7m@gmail.com
Матковская Татьяна Александровна

Address for correspondence

220114, Republic of Belarus,
Minsk, F. Skorina St., 8/2,
Belarusian State Academy of Communications;
tel. +375 29 509-02-29;
e-mail: tandem7m@gmail.com
Matkovskaia Tatiana Alexandrovna