
ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА

FIBER OPTICS

УДК 621.372.8

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА НА ПЕРИОД РЕЦИРКУЛЯЦИИ В ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ ОХРАНЫ ПЕРИМЕТРА

Д. Г. САХОНЧИК¹⁾, А. В. ПОЛЯКОВ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Описан алгоритм работы подземной волоконно-оптической системы охраны периметра рециркуляционного типа с использованием WDM-технологии спектрального разделения информационных каналов. Представлены экспериментальные значения поперечных деформаций волоконного световода в зависимости от твердости пенополиуретанового упругого основания, количества точек деформации и массы идущего или ползущего нарушителя. Разработана математическая модель изменения временных интервалов между циркулирующими импульсами в зависимости от величины деформаций волоконного световода. Данная модель позволяет рассчитать величину дополнительных потерь в зависимости от радиуса изгиба, угла изгиба, вероятности туннелирования излучения из сердцевины в оболочку, параметров самого кварцевого волокна, а также от твердости упругой основы чувствительного элемента и количества точек деформации. Показано, что в случае постоянного радиуса деформирующего элемента $R = 4$ мм и одномодового ступенчатого волоконного световода для идущего нарушителя возникающие дополнительные временные задержки периода рециркуляции составляют 1,1–1,7 нс, для ползущего нарушителя данная величина находится в пределах 0,3–0,9 нс.

Ключевые слова: оптоволоконная система; охрана периметра; период рециркуляции; деформация; потери в оптическом волокне; временная задержка.

Образец цитирования:

Сахончик ДГ, Поляков АВ. Влияние деформаций волоконного световода на период рециркуляции в оптоэлектронных системах охраны периметра. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2019;2:112–124. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2019-2-112-124>

For citation:

Sakhonchik DG, Polyakov AV. Influence of the optical fiber deformations for a recirculation period in the optoelectronic perimeter security systems. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2019;2:112–124. Russian. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2019-2-112-124>

Авторы:

Дмитрий Георгиевич Сахончик – студент факультета радиофизики и компьютерных технологий. Научный руководитель – А. В. Поляков.

Александр Владимирович Поляков – кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры физики и аэрокосмических технологий факультета радиофизики и компьютерных технологий.

Authors:

Dmitrii G. Sakhonchik, student at the faculty of radiophysics and computer technologies.

dmitrium.saxon@yandex.by

Alexander V. Polyakov, PhD (physics and mathematics), doцент; associate professor at the department of physics and aerospace technologies, faculty of radiophysics and computer technologies.

polyakov@bsu.by

INFLUENCE OF THE OPTICAL FIBER DEFORMATIONS FOR A RECIRCULATION PERIOD IN THE OPTOELECTRONIC PERIMETER SECURITY SYSTEMS

D. G. SAKHONCHIK^a, A. V. POLYAKOV^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: D. G. Sakhonchik (dmitrium.saxon@yandex.by)

The operation algorithm of the underground recirculation fiber optic system for perimeter protection using WDM-technology of spectral separation of information channels is described. The experimental results of the transverse deformation magnitude of an optical fiber depending on the hardness of the polyurethane foam elastic base, the number of deformation points and the mass of the walking or crawling intruder are presented. A mathematical model of changing time intervals between circulating pulses depending on the magnitude of optical fiber deformations has been developed. This model allows to calculate the value of additional losses depending on the bend radius, bend angle, probability of tunneling radiation from the core into the cladding, parameters of the quartz fiber itself, as well as on the hardness of the elastic base of the sensing element and the number of deformation points. It is shown that in the case of a constant radius of the deforming element $R = 4$ mm and a single-mode stepped optical fiber for a running intruder, additional time delays of the recirculation period occur 1.1–1.7 ns, for a crawling intruder, this value is within 0.3–0.9 ns.

Keywords: fiber optic system; perimeter security; recirculation period; deformation; optical fiber loss; time delays.

Введение

Цели любой охранной системы – раннее обнаружение опасного события, локализация его места, времени и характера, сигнализация о событии, его документирование, инициирование мер, препятствующих развитию события, и представление материалов для профилактики подобных событий в будущем. Система охраны периметра всегда является первым техническим рубежом защиты объекта, надежность и эффективность этого рубежа очень важна для раннего обнаружения нарушителя. Проблема охраны периметра представляет собой комплексную задачу, включающую электронные, оптические и визуальные методы контроля и наблюдения [1].

С развитием волоконной оптики и оптоэлектронных технологий в последнее время все большее внимание разработчиков привлекают волоконно-оптические системы охраны периметра. Предложены структуры, принцип действия которых основан на интерференционных методах, регистрации спекл-структуры, использовании волоконных решеток Брэгга [2–10]. К преимуществам волоконно-оптических систем можно отнести их невосприимчивость к воздействию электромагнитных помех, а также грозовых разрядов, что уменьшает вероятность ложной тревоги. Сенсорные кабели не излучают электромагнитной энергии, и их трудно обнаружить с помощью поисковой техники. Привлекательной особенностью систем является отсутствие на периметре активного электронного оборудования: это позволяет снизить расходы на монтаж и обслуживание охранной системы, а также использовать датчики на взрывоопасных объектах или под водой. К безальтернативным случаям применения волоконно-оптических технологий в сфере средств безопасности относятся варианты защиты объектов с протяженными периметрами, объектов со сложной электромагнитной обстановкой, объектов в зонах с повышенной грозовой активностью. Предложенные охранные системы предназначены в основном для размещения на наземных сетчатых упругих ограждениях. Вместе с тем многие производители проявляют интерес к созданию новых подземных охранных систем на основе волоконно-оптических сигнальных датчиков для защиты подходов к объектам или запретным зонам.

Структура подземной волоконно-оптической охранной системы рециркуляционного типа

При разработке подземных систем охраны периметра следует учитывать тот факт, что амплитуда и частота воздействий на волоконный световод (ВС) будут принципиально иными, чем при размещении оптического волокна на упругом сетчатом ограждении, поэтому требуются специальные методы и средства регистрации вторжения. Существующие волоконно-оптические датчики основаны, как правило, на измерении амплитуды зачастую маломощных оптических сигналов на фоне шумов. Для повышения разрешающей способности предложено перейти к частотному (временному) представлению измеряемой величины, использующему зависимость времени распространения оптических импульсов в замкнутом оптоволоконном контуре от действующих измеряемых физических величин.

Для определения в режиме реального времени места внешнего деформирующего воздействия на контролируемую поверхность и отслеживания перемещения нарушителя по этой поверхности была разработана структура волоконно-оптической подземной системы охраны периметра рециркуляционного типа (рис. 1) [11].

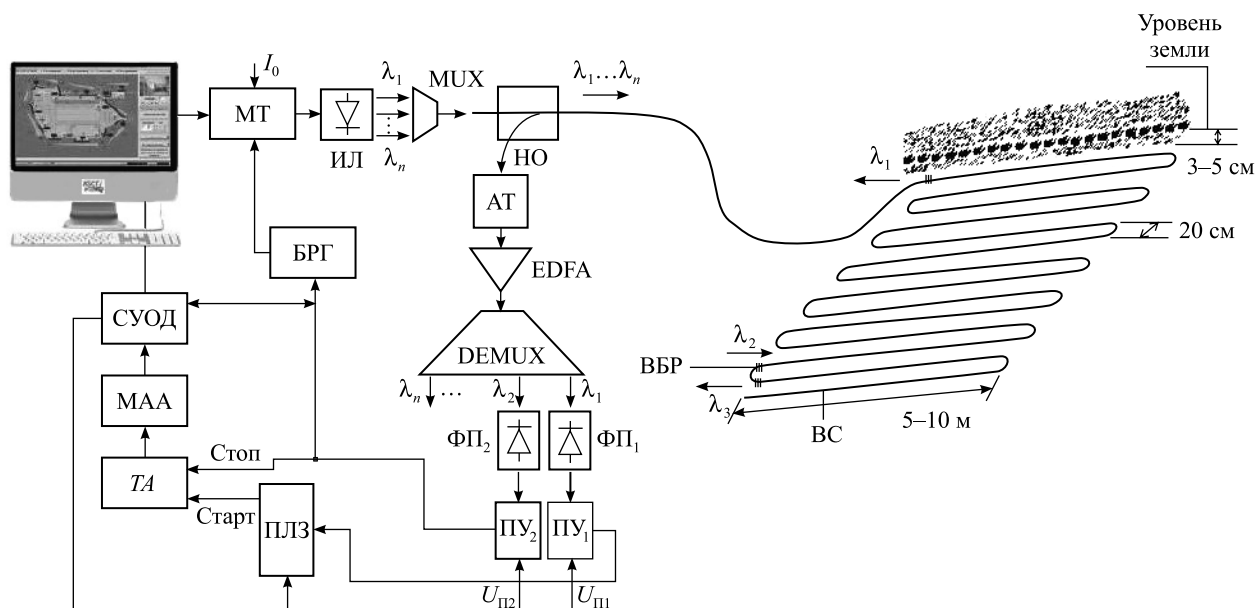


Рис. 1. Структура квазираспределенной системы охраны периметра на основе волоконно-оптического датчика рециркуляционного типа:

МТ – модулятор тока; ИЛ – набор полупроводниковых инжекционных лазеров;
МУХ – мультиплексор; НО – направленный ответвитель; АТ – аттенюатор;
EDFA – эрбиевый волоконно-оптический усилитель; ВС – волоконный световод;
ВБР – волоконные брэгговские решетки; ДЕМУХ – демультиплексор; ФП – набор фотоприемников;
ПУ – пороговое устройство; БРГ – блок регенерации; ПДЗ – перестраиваемая линия задержки;
ТА – времяамплитудный преобразователь; МАО – многоканальный амплитудный анализатор;
СУОД – система управления и обработки данных

Fig. 1. Structure of a quasi-distributed perimeter security system based on a fiber optic recirculation sensor:

МТ – current modulator; ИЛ – a set of semiconductor injection lasers; МУХ – multiplexer;
НО – directional coupler; АТ – attenuator; EDFA – erbium fiber optic amplifier; ВС – optical fiber;
ВБР – fiber Bragg gratings; ДЕМУХ – demultiplexer; ФП – a set of photodetectors;
ПУ – threshold device; БРГ – regeneration unit; ПДЗ – tunable delay line; ТА – time-amplitude converter;
МАО – multichannel amplitude analyzer; СУОД – data management and processing system

Принцип действия волоконно-оптических систем рециркуляционного типа основан на том, что при пересечении периметра нарушителем возникают дополнительные потери оптического излучения за счет поперечных деформаций ВС, что влечет за собой изменение периода рециркуляции оптических импульсов, которое регистрируется с помощью метода времяамплитудного преобразования [12]. Волоконный кабель разделен на секции с помощью спектрально-селективных отражателей, в качестве которых выступают волоконные брэгговские решетки (ВБР) с различными периодами, способные отражать излучения на разных длинах волн. Оптические импульсы, отражаясь от ВБР, расположенных в начале и конце измерительной секции, формируют старт- и стоп-импульсы для преобразователя время – амплитуда (ТА-преобразователь), а также через блок регенерации запускают новый цикл рециркуляции. Поступающие с ТА-преобразователя сигналы трансформируются в гистограммы распределения амплитуд сигналов с помощью многоканального амплитудного анализатора (МАО). Данные последнего обрабатываются электронным блоком (процессором), который в случае необходимости вырабатывает сигнал тревоги. Отслеживая характер смещения гистограмм распределения амплитуд, формируемых на разных длинах волн и соответствующих отдельным охраняемым секторам, по каналам МАО можно пространственно локализовать место нарушения и классифицировать характер этого нарушения (одиночный нарушитель или группа нарушителей). При параллельном опросе зон охраны такая технология позволяет обнаруживать одновременное вторжение на нескольких участках периметра.

Для волоконно-оптических подземных систем охраны периметра разработана конструкция чувствительных элементов, принцип действия которых основан на возникновении дополнительных потерь оптического излучения при деформации оптического волокна (рис. 2). ВС укладывается в виде параллельных

петель с шагом 20 см под поверхностью земли на глубине 3–5 см вдоль границы охраняемого периметра и маскируется защитным покрытием. Для обеспечения высокой и однородной чувствительности ВС укладывается на упругую основу и сверху накрывается каркасной георешеткой. Равномерная передача внешнего давления достигается за счет того, что данная решетка с крупной квадратной ячеистой структурой помещается посередине между соседними ВС и имеет пространственную частоту, равную пространственной частоте укладки световода. Пенополиуретановые полосы, являющиеся упругой основой, повторяют контур укладки ВС и имеют ширину 1,5 см и толщину 1,0–1,5 см. Ширина контролируемой территории, в зависимости от необходимых требований, может изменяться от 2,5 до 10,0 м с шагом 2,5 м.

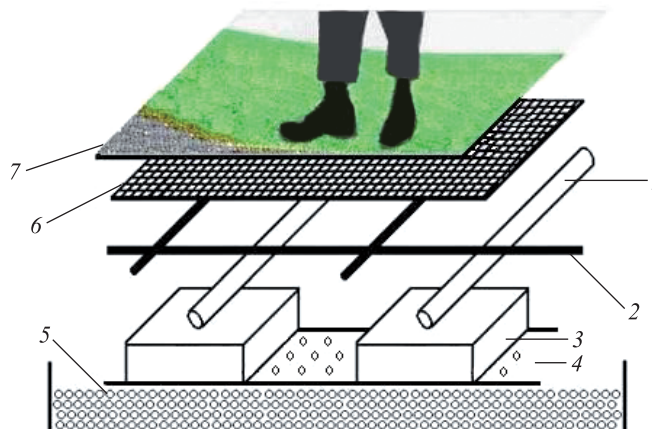


Рис. 2. Конструкция чувствительного элемента волоконно-оптической системы охраны периметра:
1 – волоконный световод; 2 – каркасная двуслойная жесткая экструдированная георешетка из полипропилена с крупной ячеистой структурой 20×20 см и диаметром трубки 8 мм;
3 – упругие пенополиуретановые элементы; 4 – перфорированный стеклопластик в качестве основы;
5 – гравийная подложка; 6 – стеклотканевое полотно с шагом плетения 1 мм; 7 – маскирующее покрытие

Fig. 2. The design of the sensitive element of the fiber optic perimeter security system:
1 – optical fiber; 2 – frame biaxial rigid extruded geogrid of polypropylene with a large cellular structure of 20×20 sm and tube diameter 8 mm;
3 – elastic polyurethane foam elements; 4 – perforated fiberglass as the base;
5 – gravel substrate; 6 – glass cloth with weaving steps 1 mm; 7 – masking coating

Для волоконно-оптических подземных систем охраны периметра на основе метода времяамплитудного преобразования с последующим формированием гистограмм распределения амплитуд сигналов с помощью МАА разработан алгоритм идентификации характера нарушения охраняемой территории [13]:

- пересекающим периметр нарушителем создаются поперечные деформации оптоволокна;
- при деформации возникают потери мощности оптических импульсов и изменение показателя преломления сердцевины волокна;
- потери оптической мощности циркулирующих импульсов влекут изменение скорости нарастания фронта импульса и, как следствие, задержку времени срабатывания порогового устройства;
- временная задержка трансформируется в набор амплитуд с помощью ТА-преобразователя;
- набор амплитуд поступает в МАА, в котором каждому значению амплитуды соответствует свой канал анализатора;
- на выходе анализатора формируется гистограмма распределения амплитуд по каналам;
- по смещению гистограммы распределения классифицируется характер нарушения охраняемой территории.

В данной работе исследованы изменения периода рециркуляции под воздействием поперечных деформаций ВС при различных параметрах чувствительных элементов. Полученные результаты позволяют оценить эффективность использования метода времяамплитудного преобразования, предлагаемого для обнаружения нарушителей.

Математическая модель

Изменение временных интервалов между циркулирующими импульсами связано с увеличением оптических потерь в ВС из-за возникновения поперечных деформаций при нарушениях охраняемого периметра, что приводит к изменению скорости нарастания фронта импульса на входе порогового

устройства и, как следствие, появлению дополнительной задержки $\delta\tau$ во времени срабатывания при постоянном значении порога срабатывания (рис. 3). Из условия, что пороговый уровень компаратора соответствует линейному участку фронта импульса, следует соотношение

$$\tau = \frac{(U_{\text{п}} - 0,1U_{\text{а0}})\tau_{\text{ф}}}{0,8U_{\text{а0}}}, \quad (1)$$

где τ – время задержки срабатывания порогового устройства, с; $U_{\text{п}}$ – значение порога срабатывания, В; $\tau_{\text{ф}}$ – линейный участок фронта импульса, с; $U_{\text{а0}}$ – амплитуда импульса в отсутствие деформации ВС, В.

Амплитуда импульса на входе порогового устройства оценивается согласно выражению

$$U_{\text{а0}} = P_{\text{ил}} S_{\text{лфд}} R_{\text{н}} K_{\text{п0}} M G_{\text{yc0}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{ил}}$ – пиковая оптическая мощность излучения импульсного полупроводникового лазерного источника, Вт; $S_{\text{лфд}}$ – спектральная чувствительность лавинного фотодиода, А/Вт; $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки фотодиода, Ом; $K_{\text{п0}}$ – коэффициент потерь в волоконно-оптическом тракте; M – коэффициент лавинного умножения лавинного фотодиода; G_{yc0} – коэффициент усиления волоконно-оптического эрбиевого усилителя.

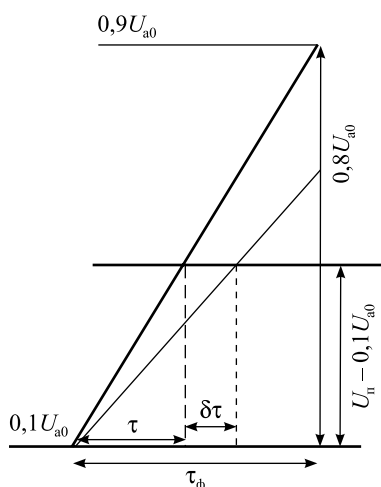


Рис. 3. Временная задержка при срабатывании порогового устройства

Fig. 3. Time delay when threshold device is operation

Величины измеряемых временных интервалов для одного контролируемого сектора в невозмущенном состоянии и при наличии нарушителя с учетом (1), (2) можно оценить исходя из следующих соотношений:

$$\Delta T_{0(1)} = \frac{2Ln_e \cdot 1000}{c} + \frac{(U_{\text{п}} - 0,1U_{\text{а}})\tau_{\text{ф}}}{0,8P_{\text{ил}} S_{\text{лфд}} R_{\text{н}} K_{\text{п0(1)}} M G_{\text{yc0(1)}}} + T_3, \quad (3)$$

$$K_{\text{п0}} = 10^{-0,1(\alpha_1 + \alpha_2 \cdot 2L)}, K_{\text{п1}} = 10^{-0,1(\alpha_1 + \alpha_2 \cdot 2L + \alpha_i)}, \quad (4)$$

$$\alpha_i = 2N_{1,2}\alpha_i^0, \quad (5)$$

где $\Delta T_{0(1)}$ – временной интервал для невозмущенного состояния (0) и при возникновении деформации (1) волокна, с; L – длина ВС, перекрывающего данный сектор, км; n_e – групповой эффективный показатель преломления сердцевины волокна; $K_{\text{п0(1)}}$ – коэффициент потерь для невозмущенного состояния (0) и при нарушении периметра (1); $G_{\text{yc0(1)}}$ – коэффициент усиления волоконно-оптического эрбиевого усилителя для исходной мощности оптических импульсов (0) и при возникновении потерь (1); T_3 – временная задержка в остальных оптоэлектронных компонентах системы, с; α_1 – потери на оптических элементах и соединениях в схеме, дБ; α_2 – потери оптической мощности в оптоволокне, дБ/км; α_i – результирующие потери в ВС за счет деформации, дБ; N_1 – число точек деформаций ВС для идущего человека, N_2 – число точек деформаций ВС для ползущего человека; α_i^0 – потери на одном изгибе, дБ.

Таким образом, возникающая временная задержка распространения оптического импульса на определенной длине волны равна

$$\delta\tau = \Delta T_1 - \Delta T_0. \quad (6)$$

Использовался малошумящий волоконно-оптический эрбиевый усилитель (EDFA) Lucent 1712 с сонаправленной накачкой на длине волны 980 нм, зависимость коэффициента усиления которого от мощности входного сигнала для $\lambda = 1550$ нм представлена на рис. 4 (пунктирными линиями выделен рабочий диапазон входных сигналов EDFA для рассматриваемой системы). Верхняя граница обусловлена мощностью используемых полупроводниковых лазерных источников излучения и потерями в оптоволоконном контуре. Нижняя граница связана с тем, что при усилении слабых сигналов (менее 10 мкВт) наблюдается значительная нелинейность коэффициента усиления в области длин волн 1525–1540 нм. Из рис. 4 следует, что если мощность входного сигнала уменьшается, то коэффициент усиления возрастает. Чтобы учесть данный эффект при последующем численном моделировании, зависимость коэффициента усиления EDFA от мощности входного сигнала была аппроксимирована следующим полиномом (сплошная кривая на рис. 4):

$$G_{\text{ус}} [\text{дБ}] = -9,50 \cdot 10^{-9} P_{\text{вх}}^6 - 2,53 \cdot 10^{-7} P_{\text{вх}}^5 + 3,43 \cdot 10^{-5} P_{\text{вх}}^4 + 1,55 \cdot 10^{-3} P_{\text{вх}}^3 - 8,15 \cdot 10^{-4} P_{\text{вх}}^2 - 1,02 P_{\text{вх}} + 14,29 [\text{дБм}], \quad (7)$$

$$P_{\text{вх}} [\text{дБм}] = P_{\text{ил}} [\text{дБм}] - \alpha_1 - \alpha_2 L - \alpha_i.$$

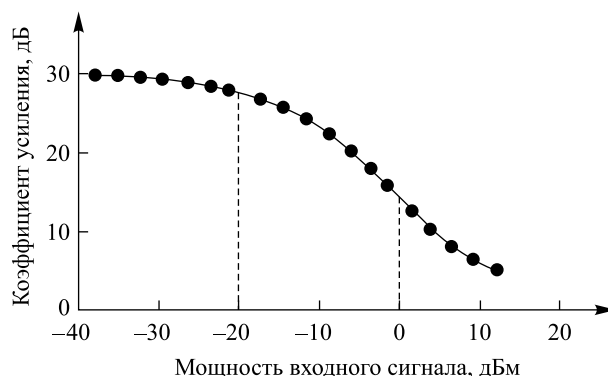


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления EDFA от мощности входного сигнала

Fig. 4. EDFA gain dependence on input power

При изогнутом по радиусу R на угол ϕ волокне внешний слой оказывается упруго растянут, а внутренний сжат. Геометрическое удлинение оптического пути на внешней поверхности изгиба частично компенсируется уменьшением показателя преломления (ПП), связанным с уменьшением плотности вещества при растяжении. Однако даже при изгибе по радиусу $R = 1$ мм удлинение оптического пути составляет 90 % от геометрического удлинения. В изогнутом ВС фрагменты волны, идущие по его внешнему краю, за одно и то же время должны проходить больший путь по сравнению с осевыми фрагментами, т. е. должны двигаться с большими, чем в неизогнутом ВС, скоростями. При малых радиусах R вполне возможна ситуация, когда крылья волны должны двигаться по внешнему краю ВС со скоростью, большей скорости света в оболочке. Это будет означать, что волна непрерывно теряет интенсивность за счет отставания фрагментов крыльев волны [14].

Одним из распространенных методов теоретического решения задачи нахождения величины оптических потерь в деформированном ВС является метод конформного отображения (МКО) изогнутого ВС в прямолинейный с перекошенным профилем ПП [15–19]. Это преобразование превращает изогнутый по радиусу R световод в прямолинейный, а указанную выше разницу в оптических путях переводит в изменение профиля ПП. В используемой модели нет катастрофических отрывов мощности волны вследствие невозможности движения быстрее скорости света. В то же время проявляется возможность туннелирования излучения между сердцевинной и оболочкой, что приводит к перекачке мощности волны, идущей по сердцевине, в оболочечные моды, т. е. к потерям канализируемого излучения. Перекос профиля ПП, связанный с изгибом, приведен на рис. 5. Уменьшение радиуса изгиба R приводит к большему перекосу профиля ПП, это сокращает толщину барьера, сквозь который туннелирует излучение. Для прямоугольного профиля вертикальные стенки сердцевины остаются вертикальными. Наклон группового эффективного ПП увеличивается с уменьшением радиуса R .

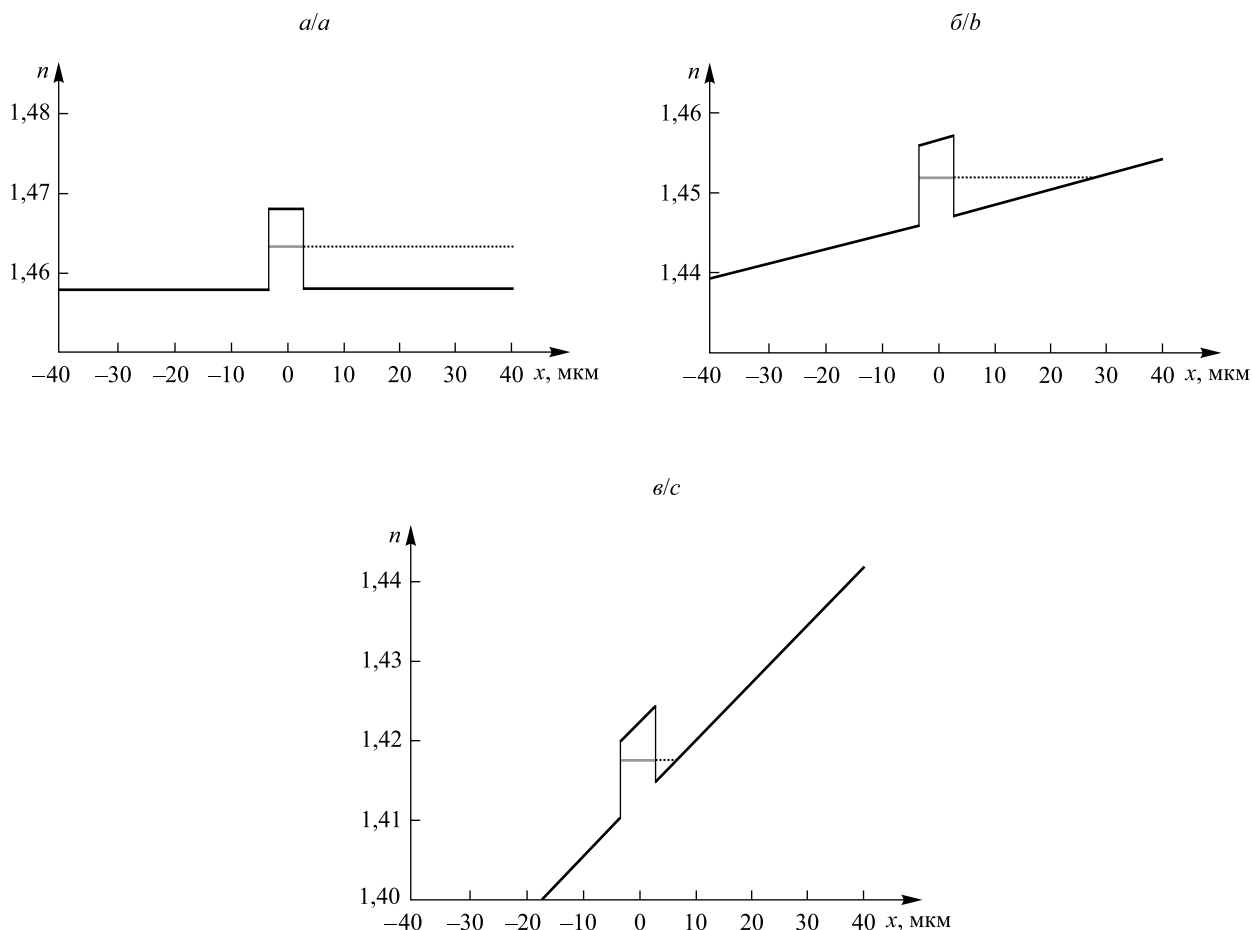


Рис. 5. Профили показателя преломления ВС после МКО в результате изгиба по различным радиусам: 1 м (а); 8 мм (б); 2 мм (в).

Уровень эффективного показателя преломления обозначен серыми сплошными линиями, ширина барьера – пунктирными

Fig. 5. The profiles of the refractive index of the optical fiber after the method of conformal transformation as a result of bending along different radius: 1 m (a); 8 mm (b); 2 mm (c). The gray solid lines are the level of the effective refractive index, the dotted ones are the width of the barrier

При некотором радиусе изгиба в оболочке для распространяющейся по сердцевине моды возникает разрешенное состояние, в которое эта мода может перекачивать мощность в процессе туннелирования. Между разрешенными состояниями в оболочке и состоянием в сердцевине существует барьер, в котором амплитуда волны затухает по экспоненциальному закону. Вероятность туннелирования сквозь этот барьер выражается формулой [14]

$$D = \exp \left(- \frac{k_0 R f_0^2 n_e^2}{n_o - \eta f_0} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin K - K \sqrt{1 - K^2} \right) \right), \quad (8)$$

где k_0 – волновой вектор в пустоте; n_e – эффективный ПП сердцевины ВС, используемый для МКО; n_o – групповой ПП оболочки ВС;

$$\eta = \frac{n_o^4 + n_o^2 - 2}{4n_o^3 + 2n_o}; \quad (9)$$

$$f_0 = 1 - \frac{r}{R}; \quad (10)$$

$$K = \left(\left(\frac{n_o f_r}{f_0} - \frac{\eta \rho}{R} \right) \frac{1}{n_e} \right), \quad (11)$$

$$f_r = 1 - \frac{r}{R} + \frac{\rho}{R}, \quad (12)$$

r – радиус волокна, ρ – радиус сердцевинки ВС.

Потери мощности (дБ) излучения в ВС на одной точке деформации α_i^0 определяются из уравнения [14]

$$\alpha_i^0 = \frac{5\varphi R \lg e}{2(\rho R)^{1/2}} D, \quad (13)$$

где

$$\varphi = \pi - \gamma, \quad \gamma = \pi - 2 \arctg \frac{\Delta h}{R}; \quad (14)$$

R – радиус трубки георешетки, равный 4 мм; Δh – величина поперечной деформации ВС, возникающей под воздействием нарушителя, мм.

Область применимости формул (8) и (13) оценим как $R_{кр} < R < R_0$. Максимальный радиус изгиба R ограничен радиусом R_0 , при котором становится возможным туннелирование в оболочку в эффективном профиле ПП [14]:

$$R_0 = r \left(\frac{\beta}{k_0} - \eta \right) \left(\frac{\beta}{k_0} - n_0 \right)^{-1}.$$

Минимальный радиус изгиба R ограничен критическим радиусом $R_{кр}$, при котором практически все излучение вытекает из сердцевинки в оболочку и потери становятся недопустимо большими. Критический радиус изгиба волокна приближенно рассчитывается по формуле [20]

$$R_{кр} \approx \frac{3n_c^2 \lambda}{4\pi NA^3},$$

где NA – числовая апертура; n_c – групповой ПП сердцевинки ВС.

Для одномодового германо-силикатного волокна с диаметром сердцевинки 9 мкм, диаметром оболочки 125 мкм и ступенчатым профилем показателя преломления на длине волны $\lambda = 1,55$ мкм имеем: $n_c = 1,4693$; $n_0 = 1,4659$; $n_c - n_0 = 0,0034$; $NA \approx 0,12$. Следовательно, минимальный радиус изгиба должен составлять $R_{кр} = 0,46$ мм. При $\eta = 0,307$ для прямоугольного профиля $\frac{\beta}{k_0} \approx n_0 + \frac{\Delta n}{2}$, тогда $R_0 \approx 42$ мм.

Таким образом, математическую модель, описанную формулами (8)–(14), можно использовать при радиусах изгиба $0,46 \text{ мм} < R < 42 \text{ мм}$. Для радиусов изгибов ВС более 1 мм в волоконной оптике такие деформации называются макродеформациями.

В нашем случае радиус изгиба, обусловленный радиусом трубки георешетки, оставался постоянным, а менялась величина поперечной деформации ВС в зависимости от твердости пенополиуретанового упругого элемента, числа точек деформации и воздействующей массы. На рис. 6 представлена зависимость угла изгиба ВС от величины деформации Δh , полученная с помощью формулы (14). Из рисунка следует, что значительное изменение угла изгиба, а следовательно, и потерь, согласно (13), будет наблюдаться для деформаций от 0 до 5–6 мм.

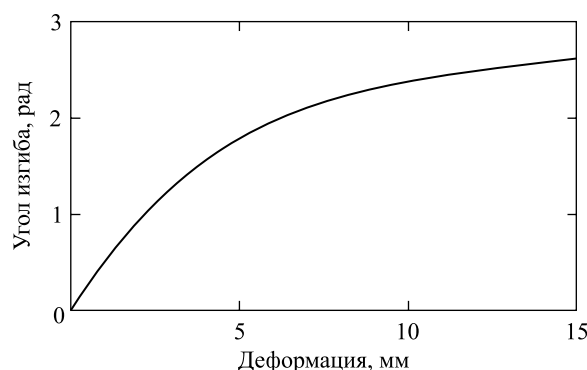


Рис. 6. Зависимость угла изгиба ВС от величины деформации

Fig. 6. The dependence of the OF bending angle on the magnitude of the deformation

Предложенная математическая модель справедлива для ступенчатых ВС, у которых α -профиль имеет вид $\alpha \rightarrow \infty$, и градиентных ВС с $\alpha \geq 3$. Следует отметить, что формула (8) неприменима для параболического ($\alpha = 2$) и треугольного ($\alpha = 1$) профиля ПП. Это связано с искажениями самой формы эффективного профиля ПП при изгибе. Так, в случае параболического профиля ПП смещается максимум ПП сердцевины, меняется «глубина» профиля ПП и эти параметры зависят от радиуса изгиба [14].

Результаты численного моделирования

При расчетах потерь и временных задержек при деформации волокна использовались следующие параметры:

R_n	500 Ом	$S_{\text{лфд}}$	0,85 А/Вт	α_1	10,7 дБ
λ	1,55 мкм	M	10	α_2	0,22 дБ/км
n_o	1,4659	L	20 км	ρ	4,5 мкм
n_c	1,4693	τ_ϕ	15 нс	r	62,5 мкм
$P_{\text{ил}}$	5 мВт	R	4 мм		

Согласно (13), (14) значение потерь мощности излучения зависит от величины Δh . С помощью разработанной в лаборатории физикохимии полимерных материалов и природных органических соединений Научно-исследовательского института прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко БГУ смесительно-заливочной установки и технологии по автоматическому нанесению эластичных пенополиуретанов по заданной траектории получены несколько образцов упругой основы с различной твердостью по Шору. Результаты экспериментальных исследований зависимости величины деформации Δh одномодового кварцевого волоконного световода от массы нарушителя и количества точек деформации представлены в табл. 1 и 2. В качестве деформирующего элемента выступала каркасная двуслойная жесткая экструдированная георешетка из полипропилена с диаметром трубки 8 мм. Проведенные эксперименты показали, что для идущего человека величина Δh находилась в области упругих деформаций, однако не соответствовала линейному закону Гука. Для ползущего нарушителя массой 85 кг деформация ВС составляла 0,15–0,4 мм в зависимости от твердости пенополиуретанового элемента и подчинялась закону Гука.

В тех же таблицах приведены рассчитанные по (8)–(13) значения потерь при макродеформации волокна. Результаты расчетов соответствуют экспериментальным данным [14; 21], в которых при $R = 4$ мм величина потерь находилась в интервале 0,4–0,45 дБ. Чтобы избежать самопроизвольного срабатывания компаратора по шумам и находиться в области линейного участка фронта импульса, минимальное начальное значение порога срабатывания решающего устройства должно быть равным $U_{\text{п. min}} = 0,3U_{a0} = 0,3P_{\text{ил}}S_{\text{лфд}}R_nK_{\text{п0}}MG_{\text{yc0}}$, в то время как максимальное значение порога для сигнала с дополнительными потерями из-за макродеформаций не должно превышать $U_{\text{п. max}} = 0,8U_{a1} = 0,8P_{\text{ил}}S_{\text{лфд}}R_nK_{\text{п1}}MG_{\text{yc1}}$. В этом случае динамический диапазон изменения напряжений порогового устройства не должен превосходить $\delta U = 20 \lg \left(\frac{U_{\text{п}}}{0,5U_{a0}} \right) = \pm 4$ (дБ). Это учитывалось при выборе твердости пенополиуретанового элемента.

Таблица 1

Потери в ВС при макродеформации при различных значениях твердости материала для идущего нарушителя и двух точек деформации

Table 1

OF losses during macrodeformation at different values of the material hardness for the walking intruder and two points of deformation

Твердость по Шору	Масса нарушителя, кг	Деформация, мм	Потери для одной точки, дБ
50	60	4,7	0,423 1
50	72	5,4	0,456 1
50	85	5,7	0,468 6
60	60	4,4	0,407 1
60	72	4,8	0,428 1
60	85	5,1	0,442 6

Окончание табл. 1
Ending table 1

Твердость по Шору	Масса нарушителя, кг	Деформация, мм	Потери для одной точки, дБ
70	60	4,2	0,395 7
70	72	4,6	0,417 9
70	85	4,9	0,433 1

Таблица 2

Потери в ВС при макродеформации при различном числе точек деформации для идущего нарушителя массой 85 кг

Table 2

OF losses during macrodeformation with a different number of deformation points for a walking intruder weighing 85 kg

Твердость по Шору	Количество точек деформации	Деформация, мм	Потери для одной точки, дБ
50	1	7,5	0,528 2
60	1	6,9	0,510 9
70	1	6,5	0,498 0
80	1	6,0	0,480 3
50	2	5,7	0,468 6
60	2	5,1	0,442 6
70	2	4,9	0,433 1
80	2	4,8	0,428 1
50	3	4,5	0,412 5
60	3	4,3	0,401 5
70	3	4,2	0,395 7
80	3	4,1	0,389 8

По формулам (3)–(7) были рассчитаны временные задержки при макродеформации волокна для разных значений твердости пенополиуретановой упругой основы (рис. 7) и различного количества точек деформации (рис. 8).

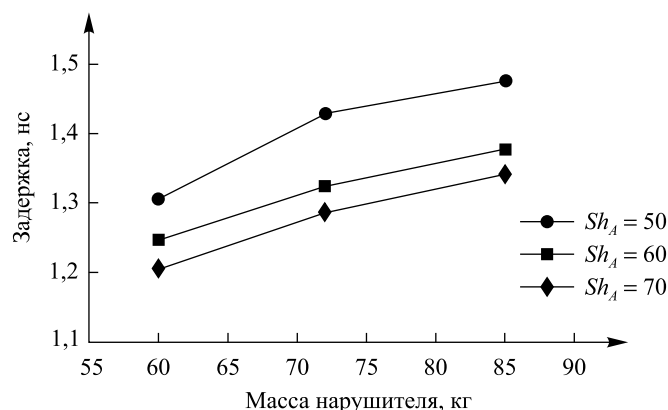


Рис. 7. Временная задержка циркулирующих импульсов в ВС под воздействием макродеформаций при различных значениях твердости по Шору Sh_A упругой основы чувствительного элемента для идущего нарушителя при двух точках деформации

Fig. 7. The time delay of circulating pulses in the OF under the influence of macrostrains at various values of Shore Sh_A hardness elastic basis of the sensing element for the walking intruder when the number of two deformation points

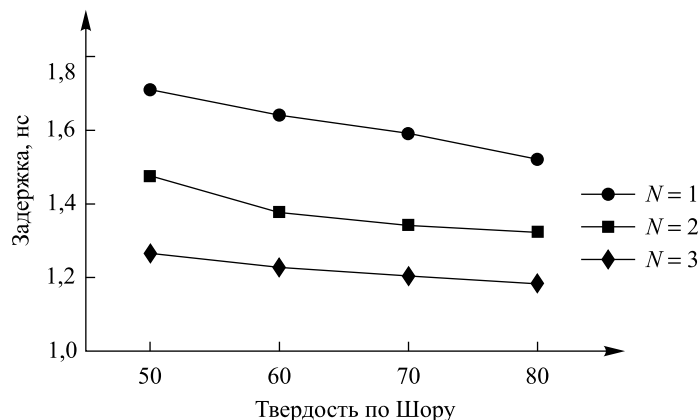


Рис. 8. Временная задержка циркулирующих импульсов в ВС под воздействием макродеформаций при различном количестве N точек деформации для идущего нарушителя массой 85 кг

Fig. 8. The time delay of the circulating pulses in the optical fiber under the influence of macrostrains with a different number N of deformation points for the walking intruder with a mass of 85 kg

Также рассчитаны потери и временные задержки при макродеформации волокна при различных значениях твердости пенополиуретановой упругой основы для ползущего нарушителя массой 85 кг (табл. 3).

Таблица 3

Потери и временная задержка в ВС при макродеформации при ползущем нарушителе

Table 3

Losses and time delay in the OF under macrodeformation with a crawling intruder

Твердость по Шору Sh_A	Потери, дБ	Временная задержка, нс
50	0,048 7	0,966 2
60	0,038 6	0,742 1
70	0,028 5	0,530 4
80	0,018 3	0,330 7

Закключение

Для структуры подземной волоконно-оптической системы охраны периметра рециркуляционного типа с использованием WDM-технологии спектрального разделения информационных каналов разработана математическая модель изменения временных интервалов между циркулирующими импульсами в зависимости от величины поперечных деформаций ВС. Данная модель позволяет рассчитать дополнительные потери в зависимости от радиуса изгиба, угла изгиба, вероятности туннелирования излучения из сердцевины в оболочку, параметров самого кварцевого волокна, а также от твердости упругой основы чувствительного элемента и количества точек деформации для идущего и ползущего нарушителя. Оценка вероятности туннелирования оптического излучения для ВС с прямоугольным профилем ПП осуществлялась при помощи МКО изогнутого ВС в прямолинейный с перекошенным профилем показателя преломления. Представлены экспериментальные данные величины поперечных деформаций ВС в зависимости от твердости пенополиуретанового упругого основания, количества точек деформации и массы идущего или ползущего нарушителя. Проведены расчеты потерь в ВС при макродеформации для случая постоянного радиуса деформирующего элемента $R = 4$ мм. Показано, что для идущего нарушителя возникающие дополнительные временные задержки периода рециркуляции составили 1,1–1,7 нс, для ползущего нарушителя они находятся в пределах 0,3–0,9 нс. Полученные результаты подтверждают возможность эффективного использования метода вреямплитудного преобразования, предлагаемого для обнаружения нарушителей с помощью подземной волоконно-оптической системы охраны периметра, а также позволяют определить конструктивные параметры датчика, обеспечивающие наилучшую чувствительность измерительной системы.

Библиографические ссылки

1. Поляков АВ, Альгина ЕГ. Нейрокомпьютерные и волоконно-оптические технологии, применяемые для охраны периметра. *Военно-промышленный комплекс. Беларусь*. 2016;1:60–66.
2. Juarez JC, Maier EW, Choi KN, Taylor HF. Distributed fiber-optic intrusion sensor system. *Journal of Lightwave Technology*. 2005;23(6):2081–2087.
3. Juarez JC, Taylor HF. Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters. *Applied Optics*. 2007;46(11):1968–1971. DOI: 10.1364/AO.46.001968.
4. Peng F, Wu H, Jia X-H, Rao Y-J, Wang Z-N, Peng Z-P. Ultra-long high-sensitivity Ф-OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines. *Optics Express*. 2014;22(11):13804–13810. DOI: 10.1364/OE.22.013804.
5. Mahmoud SS, Visagathilagar Y, Katsifolis J. Real-time distributed fiber optic sensor for security systems: performance, event classification and nuisance mitigation. *Photonic sensors*. 2012;2(3):225–236. DOI: 10.1007/s13320-012-0071-6.
6. Ye W, Zhu Q, You T. Developments in distributed optical fiber detection technology. In: Czarske J, Zhang S, Sampson D, Wang W, Liao Y, editors. *International Symposium on Optoelectronic Technology and Application: Laser and Optical Measurement Technology; and Fiber Optic Sensors. Proceedings of SPIE. Volume 9297*. Beijing: SPIE; 2014. Article ID: 92972T. DOI: 10.1117/12.2071380.
7. Yuan L, Dong Y. Loop topology based white light interferometric fiber optic sensor network for application of perimeter security. *Photonic Sensors*. 2011;1(3):260–267. DOI: 10.1007/s13320-010-0009-9.
8. Wu H, Rao Y, Tang C, Wu Y, Gong Y. A novel FBG-based security fence enabling to detect extremely weak intrusion signals from nonequivalent sensor nodes. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2011;167(2):548–555. DOI: 10.1016/j.sna.2011.02.046.
9. Li S, Vf J, Hu J. Rockfall hazard alarm strategy based on FBG smart passive net structure. *Photonic sensors*. 2015;5(1):19–23. DOI: 10.1007/s13320-014-0203-2.
10. Wu H, Qian Y, Zhang W, Li H, Xie X. Intelligent detection and identification in fiber-optical perimeter intrusion monitoring system based on the FBG sensor network. *Photonic Sensors*. 2015;5(4):365–375. DOI: 10.1007/s13320-015-0274-8.
11. Поляков АВ. *Рециркуляционные оптоволоконные измерительные системы*. Минск: БГУ; 2014. 208 с.
12. Polyakov AV. Fiber-optic perimeter security system based on WDM technology. In: Huckridge DA, Ebert R, Bürsing H, editors. *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIV. Proceedings of SPIE. Volume 10433*. Warsaw: SPIE; 2017. Article ID: 104330C. DOI: 10.1117/12.2278131.
13. Поляков АВ, Ксенофонтов МА, Сахончик ДГ. Волоконно-оптическая рециркуляционная сигнальная система на основе WDM-технологии. В: *Опто-, микро- и СВЧ-электроника – 2018. Сборник научных статей I Международной научно-технической конференции; 22–26 октября 2018 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Институт физики им. Б. И. Степанова НАНБ; 2018. с. 262–265.
14. Аксенов ВА, Волошин ВВ, Воробьев ИЛ, Иванов ГА, Исаев ВА, Колосовский АО и др. Потери в одномодовых волоконных световодах на однократных изгибах по малому радиусу. Прямоугольный профиль показателя преломления. *Радиотехника и электроника*. 2004;49(6):734–742.
15. Heiblum M, Harris JH. Analysis of curved optical waveguides by conformal transformation. *IEEE Journal Quantum Electronics*. 1975;11(2):75–83. DOI: 10.1109/JQE.1975.1068563.
16. Sakai J, Kimura T. Analytical bending loss formula of optical fibers with field deformation. *Radio Science*. 1982;17(1):21–29. DOI: 10.1029/RS017i001p00021.
17. Danielsen P, Yevick D. Propagation beam analysis of bent optical waveguides. *Journal of Optical Communications*. 1983;4(3):94–98. DOI: 10.1515/JOC.1983.4.3.94.
18. Baets R, Lagasse IE. Loss calculation design of arbitrary curved integrated optic waveguides. *Journal of the Optical Society of America*. 1983;73(2):177–182.
19. Schermer RT, Cole JH. Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2007;43(10):899–909. DOI: 10.1109/JQE.2007.903364.
20. Zendeenam A, Mirzaei M, Farashiani A, Horabadi L. Investigation of bending loss in a single-mode optical fibre. *Pramana Journal of Physics*. 2010;74(4):591–603. DOI: 10.1007/s12043-010-0052-5.
21. Salleh MFM, Zakaria Z. Effect of bending optical fibre on bend loss over a long period of time. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015;10(16):6732–6736.

References

1. Polyakov AV, Algina EG. Neurocomputers and fiber-optic technologies, implemented in perimeter security. *Military-Industrial Complex. Belarus*. 2016;1:60–66. Russian.
2. Juarez JC, Maier EW, Choi KN, Taylor HF. Distributed fiber-optic intrusion sensor system. *Journal of Lightwave Technology*. 2005;23(6):2081–2087.
3. Juarez JC, Taylor HF. Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters. *Applied Optics*. 2007;46(11):1968–1971. DOI: 10.1364/AO.46.001968.
4. Peng F, Wu H, Jia X-H, Rao Y-J, Wang Z-N, Peng Z-P. Ultra-long high-sensitivity Ф-OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines. *Optics Express*. 2014;22(11):13804–13810. DOI: 10.1364/OE.22.013804.
5. Mahmoud SS, Visagathilagar Y, Katsifolis J. Real-time distributed fiber optic sensor for security systems: performance, event classification and nuisance mitigation. *Photonic sensors*. 2012;2(3):225–236. DOI: 10.1007/s13320-012-0071-6.
6. Ye W, Zhu Q, You T. Developments in distributed optical fiber detection technology. In: Czarske J, Zhang S, Sampson D, Wang W, Liao Y, editors. *International Symposium on Optoelectronic Technology and Application: Laser and Optical Measurement Technology; and Fiber Optic Sensors. Proceedings of SPIE. Volume 9297*. Beijing: SPIE; 2014. Article ID: 92972T. DOI: 10.1117/12.2071380.
7. Yuan L, Dong Y. Loop topology based white light interferometric fiber optic sensor network for application of perimeter security. *Photonic Sensors*. 2011;1(3):260–267. DOI: 10.1007/s13320-010-0009-9.
8. Wu H, Rao Y, Tang C, Wu Y, Gong Y. A novel FBG-based security fence enabling to detect extremely weak intrusion signals from nonequivalent sensor nodes. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2011;167(2):548–555. DOI: 10.1016/j.sna.2011.02.046.

9. Li S, Vf J, Hu J. Rockfall hazard alarm strategy based on FBG smart passive net structure. *Photonic sensors*. 2015;5(1):19–23. DOI: 10.1007/s13320-014-0203-2.
10. Wu H, Qian Y, Zhang W, Li H, Xie X. Intelligent detection and identification in fiber-optical perimeter intrusion monitoring system based on the FBG sensor network. *Photonic Sensors*. 2015;5(4):365–375. DOI: 10.1007/s13320-015-0274-8.
11. Polyakov AV. *Retsirkulyatsionnye optovolokonnye izmeritel'nye sistemy* [Recirculation fiber optic measuring systems]. Minsk: Belarusian State University; 2014. 208 p. Russian.
12. Polyakov AV. Fiber-optic perimeter security system based on WDM technology. In: Huckridge DA, Ebert R, Bürsing H, editors. *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIV. Proceedings of SPIE. Volume 10433*. Warsaw: SPIE; 2017. Article ID: 104330C. DOI: 10.1117/12.2278131.
13. Polyakov AV, Ksenofontov MA, Sakhonchik DG. [Fiber optic recirculation alarm system based on WDM technology]. In: *Opto-, mikro- i SVCh-elektronika – 2018. Sbornik nauchnykh statei I Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii; 22–26 oktyabrya 2018 g.; Minsk, Belarus* [Opto-, microwave and SHF-electronics. Proceedings of the I International scientific and technology conference; 2018 October 22–26; Minsk, Belarus]. Minsk: B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus; 2018. p. 262–265. Russian.
14. Aksenov VA, Voloshin VV, Vorob'ev IL, Ivanov GA, Isaev VA, Kolosovskii AO, et al. Losses in single-mode optical fibers occurring in isolated bends of small radius: rectangular profile of refractive index. *Radiotekhnika i elektronika*. 2004;49(6):734–742. Russian.
15. Heiblum M, Harris JH. Analysis of curved optical waveguides by conformal transformation. *IEEE Journal Quantum Electronics*. 1975;11(2):75–83. DOI: 10.1109/JQE.1975.1068563.
16. Sakai J, Kimura T. Analytical bending loss formula of optical fibers with field deformation. *Radio Science*. 1982;17(1):21–29. DOI: 10.1029/RS017i001p00021.
17. Danielsen P, Yevick D. Propagation beam analysis of bent optical waveguides. *Journal of Optical Communications*. 1983;4(3):94–98. DOI: 10.1515/JOC.1983.4.3.94.
18. Baets R, Lagasse IE. Loss calculation design of arbitrary curved integrated optic waveguides. *Journal of the Optical Society of America*. 1983;73(2):177–182.
19. Schermer RT, Cole JH. Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2007;43(10):899–909. DOI: 10.1109/JQE.2007.903364.
20. Zendehtnam A, Mirzaei M, Farashiani A, Horabadi L. Investigation of bending loss in a single-mode optical fibre. *Pramana Journal of Physics*. 2010;74(4):591–603. DOI: 10.1007/s12043-010-0052-5.
21. Salleh MFM, Zakaria Z. Effect of bending optical fibre on bend loss over a long period of time. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015;10(16):6732–6736.

Статья поступила в редколлегию 28.02.2019.
Received by editorial board 28.02.2019.