

# Разрешающая способность волоконно-оптической системы охраны периметра рециркуляционного типа

А. В. Поляков<sup>1</sup>, М. А. Ксенофонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, e-mail: polyakov@bsu.by

<sup>2</sup>Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск

Проведены экспериментальные исследования разрешающей способности волоконно-оптической подземной системы охраны периметра рециркуляционного типа. Установлено, что выбором режимов работы элементов установки можно получить максимальную разрешающую способность, не превышающую 400 пс. Сравнение теоретических расчетов и экспериментальных данных показали, что для идущего нарушителя массой 60 кг, при мощности лазера 3 мВт и значении фронта импульса на входе порогового устройства 5 нс, твердости пенополиуретанового упругого элемента по Шору 50 измеренные временные задержки на 22 % превышают расчетные данные и достигают 1020 пс.

**Ключевые слова:** охрана периметра, волоконно-оптическая система, период рециркуляции, поперечные деформации волокна, разрешающая способность.

## Введение

Система охраны периметра всегда является первым техническим рубежом защиты объекта; надежность и эффективность этого рубежа очень важна для раннего обнаружения нарушителя. Цели любой охранной системы состоят в раннем обнаружении опасного события, локализации места, времени и характера события, сигнализации о событии, документировании события, инициировании мер, препятствующих развитию события и представлении материалов для профилактики подобных событий в будущем. Проблема охраны периметра представляет собой комплексную задачу, включающую в себя электронные, оптические и визуальные методы контроля и наблюдения [1].

В последнее время с развитием волоконной оптики и оптоэлектронных технологий все большее внимание разработчиков привлекают волоконно-оптические системы охраны периметра (ВОСОП). Предложены структуры, принцип действия которых основан на интерференционных методах, регистрации спекл-структуры, использовании волоконных решеток Брэгга [2–5]. 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 эти датчики на взрывоопасных объектах или под водой. К безальтернативным случаям применения волоконно-оптических технологий в сфере средств безопасности относятся случаи защиты объектов с протяженными периметрами, объектов со сложной электромагнитной обстановкой, объектов в зонах с повышенной грозовой активностью. Предлагаемые на рынке охранные системы предназначены, в основном, для размещения на наземных сетчатых упругих ограждениях. Вместе с тем, многие производители и заказчики проявляют интерес к созданию новых подземных охранных систем на основе волоконно-оптических сигнальных датчиков для защиты подходов к объектам или запретным зонам.

## **1. Принцип действия устройства**

При разработке подземных систем охраны периметра следует учитывать тот факт, что амплитуда и частота воздействий на волоконный световод будут принципиально иными, чем при размещении оптического волокна на упругом сетчатом ограждении. В этом случае требуется разработка специальных методов и средств регистрации вторжения. Существующие волоконно-оптические датчики основаны, как правило, на измерении изменений амплитуды зачастую маломощных оптических сигналов на фоне шумов. Для повышения разрешающей способности было предложено перейти к частотному (временному) представлению измеряемой величины, использующему зависимость времени распространения оптических импульсов в замкнутом оптоволоконном контуре от воздействующих 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 [6, 7]. Для формирования дискретного набора датчиков используется квазираспределенная оптоэлектронная рециркуляционная система с применением DWDM-технологии. Принцип действия волоконно-оптических систем рециркуляционного типа основан на том, что нарушитель, пересекающий периметр, создает дополнительные потери оптического излучения за счет поперечных деформаций волоконного световода, что влечет за собой изменение периода рециркуляции оптических импульсов, которое регистрируется с помощью метода время-амплитудного преобразования (ТА) с последующей записью значений амплитуд по каналам многоканального амплитудного анализатора (МАО). 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). Волоконный кабель разделен на секции длиной 1 км с помощью селективных отражателей, в качестве которых выступают волоконные брэгговские решетки (ВБР) с различными периодами, способные отражать излучения на разных длинах волн. Устройство выбора на основе спектрального демультимплексирования позволяет выделить отраженный импульс от любой секции. При параллельном опросе зон охраны такая технология позволяет обнаруживать одновременное вторжение на нескольких участках периметра, т. е. предотвращать маскирование реального вторжения на фоне умышленно имитированного сигнала нарушения 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. Волоконный световод (ВС) укладывается в виде параллельных петель с шагом 20 см. Равномерная передача внешнего давления достигается за счет того, что каркасная решетка с крупной квадратной ячеистой структурой укладывается посередине между соседними ВС и имеет пространственную частоту, равную пространственной частоте укладки световода. Ширина контролируемой территории, в зависимости от необходимых требований, может изменяться от 2,5 до 10 м с шагом 2,5 м.

## **2. Экспериментальные исследования разрешающей способности**

Одним из фундаментальных факторов, определяющим разрешающую способность датчика, являются кратковременные флуктуации периода рециркуляции. Рассматриваемые временные флуктуации в ВОСОП являются результатом наложения целого ряда независимых друг от друга явлений. Наиболее существенное влияние на их

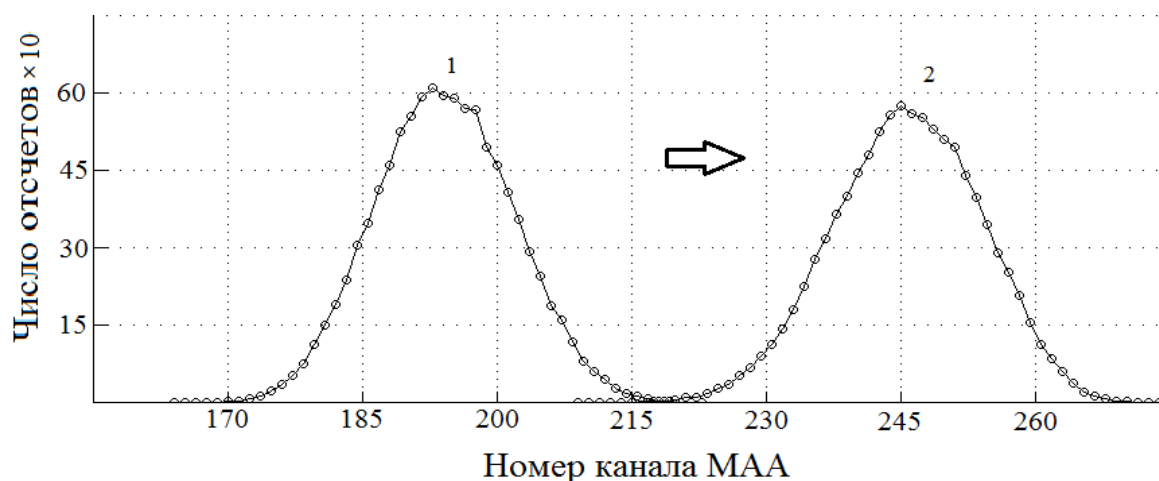
структуру оказывают следующие факторы: временной джиттер в инжекционном лазере (ИЛ), возникающий из-за случайных изменений времени задержки между импульсом тока накачки и излучением лазера; нестабильность времени отклика лавинного фотодиода (ЛФД); временной разброс моментов срабатывания порогового решающего устройства, который связан с изменением амплитуды входного сигнала из-за флуктуаций мощности излучения ИЛ, дробовых шумов ЛФД, тепловых шумов нагрузочного сопротивления, шумов входных каскадов усилителя и т.д. Сложный характер флуктуаций временных параметров требует разработки специальных экспериментальных методик изучения закономерностей распространения сигналов в замкнутой оптоэлектронной системе.

Для исследования флуктуаций времени распространения оптических импульсов по оптоэлектронному тракту с высоким временным разрешением был использован метод многоканального временного анализа, который основан на регистрации вероятностной структуры флуктуаций периодов импульсных процессов. Основным измерительным узлом установки являлся стенд для анализа флуктуаций временных интервалов с разрешением 20 пс, состоящий из блока селекции временных интервалов, преобразователя время-амплитуда, многоканального амплитудного анализатора. Для запуска волоконно-оптической системы использовался генератор импульсов Г5-72, который вырабатывал прямоугольные сигналы длительностью 10 нс и амплитудой 3 В. Формирователь информационных импульсов генерировал импульсы накачки ИЛ длительностью 3 нс на полувысоте с фронтом  $\tau_f = 2\text{--}10$  нс и дискретно меняющейся амплитудой в диапазоне (0–20) мА. Одновременно на инжекционный лазер подавался регулируемый ток постоянного смещения  $I_0$ . Форма сигнала на выходе модулятора тока накачки ИЛ контролировалась с помощью электронного осциллографа. Для исключения влияния на температуру элементов окружающих воздушных потоков при проведении экспериментов вся оптоэлектронная часть схемы была помещена в специальный кожух. Установка включала оптический аттенюатор с потерями минус 18 дБ, имитирующий потери мощности излучения на оптических элементах и при распространении по ВС длиной 20 км (в прямом и обратном направлении), а также малошумящий волоконно-оптический эрбиевый усилитель Lucent 1712 с сонаправленной накачкой на длине волны 980 нм и рабочим интервалом длин волн 1530–1565 нм. Решающее устройство представляло собой электронный блок, состоящий из компаратора с регулируемым порогом срабатывания  $U_n$  и преобразователя уровня. Генератором временных интервалов служил источник временных сдвигов И1-8, а регистрацию гистограмм функции распределения кратковременных флуктуаций на первом цикле рециркуляции производили с помощью МАА.

Анализ полученных результатов показал, что для каждого значения тока накачки лазера и коэффициента лавинного умножения ЛФД существует определенное значение порога срабатывания решающего устройства, обеспечивающее минимальные флуктуации периода рециркуляции в ВОСОП. Наименьшее значение  $\sigma_a$  достигается при коэффициенте лавинного умножения ЛФД  $M \approx 10\text{--}12$ , когда отношение сигнал/шум близко к максимальному значению. Увеличение тока постоянного смещения  $I_0$  ведет к уменьшению амплитудных флуктуаций интенсивности излучения и минимизирует временной джиттер ИЛ. Это также снижает уровень флуктуации временного положения импульса в ВОСОП в процессе рециркуляции. Данный эффект наблюдался до  $I_0 = 0,9\text{--}0,95 I_n$ , далее в предпороговом режиме излучение лазера становилось нестабильным. Во всех случаях минимальные флуктуации фиксировались, когда порог решающего устройства соответствовал линейному участку фронта импульса. При этом, чем больше крутизна этого участка и амплитуда сигнала на входе решающего устройства, тем в меньшей степени на величину флуктуаций будет влиять временной разброс моментов

срабатывания данного устройства. Как следует из полученных результатов, при выборе определенных параметров рециркуляционной системы величина кратковременных флуктуаций, измеренная на полувысоте гистограммы распределения амплитуд, являлась минимальной и не превышала 400 пс.

Для проверки полученных результатов провели исследования смещения гистограммы с использованием экспериментального стенда. На рис. 1 показано полученное смещение гистограммы распределения амплитуд по каналам МАА для идущего нарушителя при следующих параметрах: пиковая мощность импульса 3 мВт, фронт импульса 5 нс, воздействующая масса 60 кг, число точек деформации волокна  $2 \times 2$  (имитировали распространение излучения по волокну в прямом и обратном направлении), твердость пенополиуретановой основы по Шору 50, цена одного канала МАА 20 пс. Результирующее смещение гистограммы оказалось равной 1020 пс, это на 22 % больше, чем расчетные значения [8], что с точки зрения регистрации нарушения является положительным фактом, поскольку увеличивается разрешающая способность системы. По видимому, это связано с тем, что кроме основных точек макродеформации волокна возникали еще микродеформации ВС в других близлежащих точках пересечения ВС и георешетки, которые вызывали дополнительные потери оптической мощности и не учитывались в теоретических расчетах.



1– недеформированное волокно, 2– волокно под воздействием деформации

Рис. 1. – Результаты экспериментальных исследований для идущего нарушителя.

### Закключение

Установлены экспериментальные зависимости кратковременных флуктуаций периода рециркуляции, определяемые по ширине на уровне полувысоты гистограмм распределения амплитуд по каналам многоканального амплитудного анализатора для различных режимов работы оптоэлектронного контура при пиковой мощности излучения полупроводникового инжекционного лазера  $P_{\text{ил}}=3$  мВт, величине фронта импульса  $\tau_{\text{ф}}=5$  нс. Как следует из полученных результатов, при выборе соответствующих значений коэффициента лавинного умножения ЛФД в интервале  $M=8-12$  и порога срабатывания компаратора, соответствующего линейному участку фронта импульса, кратковременные флуктуации минимальны и составляли величину не более 400 пс, что и принималось за разрешающую способность измерительной системы. На основе анализа результатов экспериментальных исследований, показано, что, для идущего нарушителя массой 60 кг, при мощности лазера 3 мВт и значении фронта импульса на входе порогового устройства 5 нс, твердости пенополиуретанового

упругого элемента по Шору 50 измеренные временные задержки на 22 % превышают расчетные данные и достигают 1020 пс. Высокая чувствительность и минимальная погрешность подтверждает эффективность применения разработанной методики регистрации фактов нарушения охраняемой территории как для идущего, так и для ползущего нарушителя.

### Литература

1. Поляков А. В., Альгина Е. Г. Нейрокомпьютерные и волоконно-оптические технологии, применяемые для охраны периметра. Военно-промышленный комплекс. Беларусь. 2016. № 1. С. 60–66.
2. Juarez J. C., Taylor H. F. Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters. *Applied Optics*. 2007. – Vol. 46, No 11. P. 1968–1971.
3. Peng F., Wu H., Jia X.-H. [et al.] Ultra-long high-sensitivity Ф-OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines. *Optics Express*. 2014. Vol. 22, No 11. P. 13804–13810.
4. Yuan L., Dong Y. Loop topology based white light interferometric fiber optic sensor network for application of perimeter security. *Photonic Sensors*. 2011. Vol. 1, No 3. P. 260–267.
5. Wu H., Rao Y., Tang C. [et al.] A novel FBG-based security fence enabling to detect extremely weak intrusion signals from nonequivalent sensor nodes. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2011. Vol. 167, No 2. P. 548–555.
6. Поляков А. В. Рециркуляционные оптоволоконные измерительные системы. Минск: БГУ, 2014..
7. Polyakov A. V. Fiber-optic perimeter security system based on WDM technology. *Proc. SPIE*. 2017. Vol. 10433 *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIV*. P. 10433-401–10433-407.
8. Сахончик Д. Г., Поляков А. В. Влияние деформаций волоконного световода на период рециркуляции в оптоэлектронных системах охраны периметра. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2019. № 2. С. 112–124.

### Resolution of the recirculation fiber-optic perimeter security system

A.V. Polyakov<sup>1</sup>, M.A. Ksenofontov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus*  
e-mail: polyakov@bsu.by

<sup>2</sup> *A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of BSU,  
Minsk, Republic of Belarus*

Experimental studies of the resolution of the recirculation fiber-optic underground perimeter security system have been carried out. It was found that by choosing the operating modes of the installation elements, it is possible to obtain the maximum resolution not exceeding 400 ps. Comparison of theoretical calculations and experimental data showed that for a walking intruder weighing 60 kg, with a laser power of 3 mW and a pulse front value at the entrance of the threshold device of 5 ns, the hardness of the foam elastic element 50 Shore, the measured time delays exceed the calculated data by 22% and reach 1020 ps..

**Keywords:** perimeter security, fiber optic system, recirculation period, lateral fiber deformations, resolution.