

УДК 621.383.92

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОДНОКВАНТОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ ЛИНИЯМ СВЯЗИ

И.Р. ГУЛАКОВ, А.О. ЗЕНЕВИЧ, А.М. ТИМОФЕЕВ, А.Г. КОСАРИ

*Высший государственный колледж связи  
Ф. Скорины, 8/2, г. Минск, 220114, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 6 мая 2014*

На основе созданной системы одноквантовой регистрации оптического излучения предложена система передачи и приема конфиденциальных данных по волоконно-оптической линии связи. Применительно к такой системе связи экспериментально обоснован выбор двух длин волн излучения, одна из которых используется для передачи информации, а вторая – для синхронизации времени передачи и приема информации и обнаружения несанкционированного доступа к информации, создаваемого посредством макроизгибов оптического волокна. Установлены оптимальные значения мощностей оптического излучения, при которых удалось обеспечить наиболее высокую скорость передачи конфиденциальной информации и, вместе с тем, наиболее эффективно обнаруживать возможные каналы утечки этой информации.

*Ключевые слова:* одноквантовая система регистрации, макроизгиб оптического волокна, канал утечки информации, лавинный фотоприемник.

### Введение

В последние годы в современных сетях связи для передачи данных преимущественно используют волоконно-оптические линии связи, поскольку они обладают достаточно большой скоростью передачи информации (СПИ) [1]. Одной из важнейших задач, решаемых при разработке современных систем волоконно-оптической связи, является обеспечение конфиденциальности передаваемых данных. Для формирования канала утечки информации наиболее часто создают макроизгибы оптического волокна (ОВ) [2]. При определенной величине макроизгиба ОВ на границе раздела сердцевина-оболочка угол падения оптической волны становится меньше предельного угла, и в месте макроизгиба создается побочное излучение, в результате чего может осуществляться несанкционированный съём передаваемой информации. В настоящее время разработан ряд способов и устройств для обнаружения таких каналов утечки информации, как, например [3–5], однако они малоэффективны, когда осуществляется несанкционированный забор не более десяти фотонов оптического излучения из каждого бита передаваемой информации. В этих случаях для передачи конфиденциальной информации следует использовать оптические импульсы малой мощности, для формирования и регистрации которых применяют одноквантовые системы передачи и приема как наиболее чувствительные [6], однако до настоящего времени отсутствуют исследования таких систем по определению длин волн и мощностей передаваемых оптических сигналов, при которых обеспечивается конфиденциальность передаваемых данных за счет обнаружения каналов утечки информации, сформированных макроизгибами ОВ. В связи с этим целью данной работы являлось предложить одноквантовую систему передачи и приема конфиденциальных данных по волоконно-оптической линии связи и применительно к такой системе обосновать выбор длин волн и мощностей передаваемых оптических сигналов, обеспечивающих конфиденциальность передаваемых данных за счет обнаружения каналов утечки информации, сформированных макроизгибами ОВ.

## Описание установки и методики эксперимента

Структурная схема установки для передачи и приема конфиденциальных данных по волоконно-оптической линии связи представлена на рис. 1.

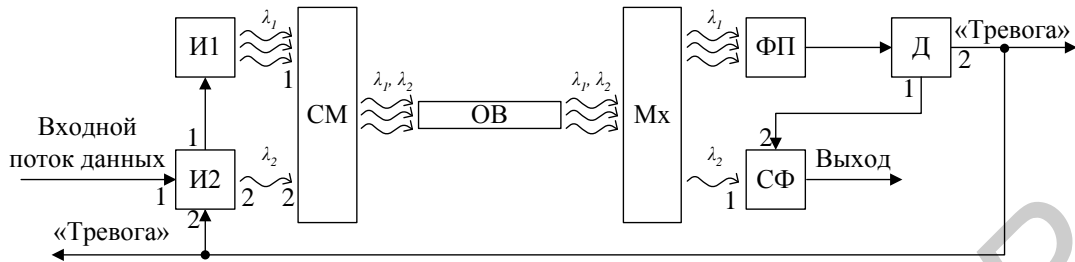


Рис. 1 Структурная схема установки для передачи и приема конфиденциальных данных по волоконно-оптической линии связи: И1 и И2 – источники оптического излучения, СМ – оптический смеситель, ОВ – оптическое волокно, Мх – монохроматор, ФП – фотоприемник; СФ – счетчик фотонов; Д – амплитудный дискриминатор

Принцип работы этой установки заключается в том, что источник оптического излучения И1 с длиной волны  $\lambda_1$  передает синхроимпульсы, а источник оптического излучения И2 с длиной волны  $\lambda_2$  используется для передачи данных при помощи импульсов малой мощности. Оптические излучения от источников И1 и И2 поступают на оптический смеситель СМ, после чего направляются в оптическое волокно ОВ. С выхода оптического волокна излучения подаются на монохроматор Мх, который разделяет оптические излучения в зависимости от длины волны. Излучение с длиной волны  $\lambda_1$  направляется на фотоприемник ФП, а излучение с длиной волны  $\lambda_2$  подается на счетчик фотонов СФ.

Синхроимпульсы применяются для синхронизации работы счетчика фотонов СФ и источника И2, по аналогии как это сделано при помощи электрических импульсов в работе [7]. Синхронизация работы счетчика фотонов СФ и источника И2 осуществляется при помощи фотоприемника ФП и амплитудного дискриминатора Д. Фотоприемник ФП регистрирует синхроимпульсы от источника И1. Электрические импульсы с выхода ФП поступают на вход амплитудного дискриминатора Д, который сравнивает их амплитуду с некоторым заранее заданным значением. Если амплитуда синхроимпульса превышает заданное значение, то на первом выходе Д формируются импульсы стандартной амплитуды и длительности, которые поступают на второй вход счетчика фотонов СФ, управляя его работой. Счетчик фотонов СФ регистрирует оптическое излучение только при наличии управляющих импульсов на его втором входе. В случае, когда амплитуда синхроимпульса, поступающего на вход Д, не превышает заданное значение, импульсы на первом выходе Д отсутствуют, а на его втором выходе формируется сигнал тревоги, подаваемый на второй вход источника оптического излучения И2, как показано на рис. 1, и передача и прием информации прекращаются.

Поступающая входная последовательность данных, состоящая из двоичных символов «0» и «1», подается на первый вход источника оптического излучения И2. При отсутствии сигнала «Тревога» на втором входе И2 и наличии на первом входе И2 символа («0» или «1») на первом выходе И2 формируются электрические импульсы, а на втором – оптические при передаче символов «1»; при передаче символов «0» оптические импульсы на втором выходе И2 отсутствуют. Электрические импульсы с первого выхода И2 поступают на вход источника оптического излучения И1. Источник И1 формирует оптическое излучение при наличии на его входе электрических импульсов. В результате на выходе И1 формируется оптическое излучение при передаче символа («0» или «1»).

При передаче символа «1» на втором выходе И2 формируются маломощные оптические импульсы. Следовательно, несанкционированному пользователю для перехвата информации необходимо создать такой макроизгиб ОВ, при котором из каждого передаваемого оптического импульса изымается не менее одного фотона. В зависимости от общего количества фотонов в одном импульсе при несанкционированном изъятии из каждого такого импульса одного фотона доля потерь мощности будет различна. Например, несанкционированное изъятие из каждого передаваемого оптического импульса одного фотона эквивалентно потере 1 % или 10 % мощности передаваемого оптического импульса, если маломощный импульс на передающей

стороне содержал 100 или 10 фотонов соответственно. Потерю 1 % от передаваемой мощности обнаружить сложнее, чем потерю 10 % от передаваемой мощности. Потеря 10 % от передаваемой мощности достаточно просто может быть обнаружена при помощи мощных оптических синхроимпульсов: при наличии макроизгиба ОВ контролируемая амплитуда синхроимпульса становится меньше некоторого заданного значения, что позволяет выявить наличие несанкционированного доступа к информации и прекратить ее передачу и прием.

В качестве объектов исследования использовались: установка для передачи конфиденциальной информации, описанная выше, лавинный фотодиод ФД-115Л, лавинные фотоприемники (ЛФП) со структурой металл-резистивный слой-полупроводник и  $n^+p-p^+$ , а также серийно выпускаемое оптическое волокно G.652.

Общая длина ОВ составляла 398 м. Макроизгиб формировался на расстоянии 198 м от источника оптического излучения; в процессе проведения эксперимента это расстояние не изменялось. Для создания макроизгибов ОВ использовались цилиндры различных диаметров  $D$ , на которых формировался один виток ОВ. Вероятность потери оптического сигнала в оптическом волокне рассчитывалась по формуле:

$$P_{pot} = 1 - 10^{(p_D - p_\infty)/10}, \quad (1)$$

где  $p_D$  и  $p_\infty$  – опорная мощность оптического сигнала на выходе ОВ при диаметре макроизгиба  $D$  и при отсутствии макроизгиба соответственно.

Опорная мощность  $p$  вычислялась по формуле:

$$p = 10 \lg(P/1 \text{ мВт}), \quad (2)$$

где  $P$  – абсолютная мощность оптического сигнала.

Длина волны оптического излучения источников И1 и И2 изменялась в диапазоне от 850 до 1625 нм. Из этого диапазона для проведения экспериментальных исследований выбраны длины волн оптического излучения, которые в современных системах связи наиболее часто используются для передачи данных: 850, 1310, 1490, 1550 и 1625 нм [8]. Для измерения абсолютной мощности оптического сигнала использовался оптический тестер ОТ-2-8. Из работы [6] известно, что при комнатных температурах вероятность образования темновых импульсов в фотоприемнике достаточно большая, но при уменьшении температуры эта вероятность уменьшается. Темновые импульсы возникают в фотоприемнике в отсутствие оптического излучения и приводят к увеличению вероятности ошибочной регистрации данных, поэтому их число стремятся уменьшить. В этой связи для проведения экспериментальных исследований выбраны температуры  $T_1 = 300$  К и  $T_2 = 263$  К. Температура  $T_1$  соответствует комнатной, а  $T_2$  достаточно просто реализуется при помощи термоэлектрического холодильника на эффекте Пельтье.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для оценки влияния диаметра макроизгиба ОВ на величину потерь мощности передаваемого оптического излучения выполнены исследования зависимости  $P_{pot}$  от диаметра макроизгиба ОВ для различных длин волн оптического излучения, результаты которых представлены на рис. 2.

Из полученных зависимостей следует, что вероятность потери оптического сигнала в ОВ тем меньше, чем больше диаметр  $D$ . Для всех исследуемых длин волн оптического излучения при диаметре макроизгиба больше 100 мм величина  $P_{pot}$  равнялась вероятности потери мощности оптического излучения в отсутствие макроизгиба ОВ. Наиболее сильная зависимость  $P_{pot}(D)$  наблюдалась для длины волны оптического излучения 1625 нм, а наименьшая – для длины волны оптического излучения 850 нм. Это подтверждается приведенной на рис. 3 зависимостью отношения  $\Delta P_{pot}/\Delta D$  от длины волны оптического излучения.

Величина  $\Delta P_{pot}$  рассчитывалась как разность между вероятностью потери мощности оптического излучения в ОВ при диаметре макроизгиба ОВ 60 мм и вероятностью потери мощности оптического излучения в ОВ при диаметре макроизгиба ОВ  $D = 5$  мм.

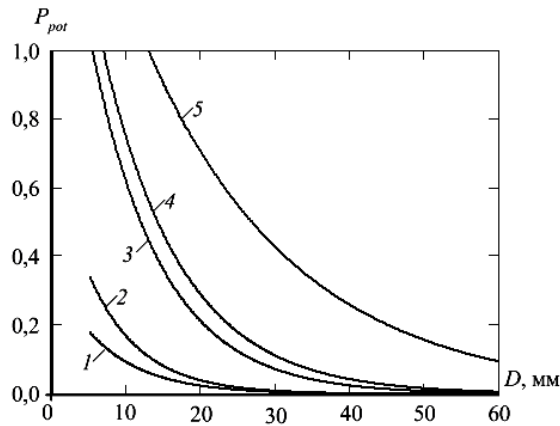


Рис. 2. Зависимость вероятности потерь оптического сигнала от диаметра макроизгиба ОВ; длина волны оптического излучения: 1 – 850 нм; 2 – 1310 нм; 3 – 1490 нм; 4 – 1550 нм; 5 – 1625 нм

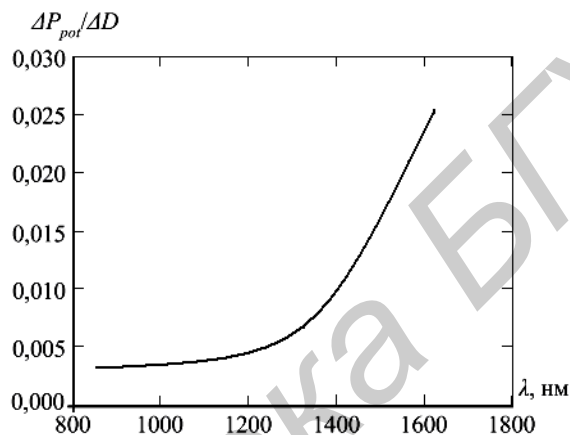


Рис. 3 Зависимость отношения  $\Delta P_{pot}/\Delta D$  от длины волны оптического излучения

Такие значения выбраны как крайние из исследуемого диапазона значений  $D$ . Отметим, что при  $D < 5$  мм достаточно высока вероятность излома ОВ, а при  $D > 60$  мм для всех длин волн оптического излучения, за исключением 1625 нм, зависимости  $P_{pot}(D)$  практически не изменялись (см. рис. 2, кривые 1–4). Величина  $\Delta D = 55$  мм и по модулю равнялась разности между выбранными крайними значениями  $D$ .

Из полученных зависимостей, представленных на рис. 2 и 3, следует, что для передачи конфиденциальной информации целесообразно использовать оптическое излучение с длиной волны 850 нм, а для определения наличия макроизгиба ОВ и передачи синхроимпульсов – 1625 нм.

Согласно [9], СПИ по оптическому каналу связи, содержащему в качестве приемного модуля счетчик фотонов, зависит от мощности оптического излучения. С увеличением мощности оптического излучения увеличивается скорость передачи информации при постоянном значении длительности времени передачи бита информации. Увеличение СПИ с ростом мощности оптического излучения ограничивается быстродействием счетчика фотонов, то есть наличием у ЛФП, работающих в режиме одноквантовой регистрации, мертвого времени [6]. Однако для обеспечения конфиденциальности передаваемых данных необходимо понижать мощность оптического излучения, используемого для передачи информации. Поэтому необходимо найти оптимум между скоростью передачи информации и возможностью обеспечения конфиденциальности передаваемых данных.

В таблице представлены характеристики хорошо зарекомендовавших себя в режиме одноквантовой регистрации ЛФП, чувствительных к оптическому излучению с длиной волны 850 нм. С учетом средней длительности передачи одного бита информации в таблице приведены рассчитанные по методике, описанной в [9], значения максимальной скорости передачи информации по волоконно-оптическому каналу связи, содержащему в качестве приемного модуля счетчик фотонов.

**Характеристики исследуемой системы передачи конфиденциальной информации  
по волоконно-оптической линии связи**

Сравниваемые параметры	Тип лавинного фотоприемника					
	Лавинный фотодиод ФД-115Л		Структура металл-резистивный слой-полупроводник		Лавинный фотоприемник со структурой $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$	
Рабочая температура фоточувствительного слоя ЛФП, К	300	263	300	263	300	263
Пороговая мощность СФ, $10^{-14}$ Вт	0,8	0,2	1,0	1,0	0,7	0,1
Мощность оптического сигнала с длиной волны $\lambda_1 = 850$ нм, подаваемого на вход СФ для обеспечения максимальной СПИ, $10^{-12}$ Вт	1,9	1,6	1,9	1,9	1,9	1,9
Максимальный динамический диапазон СФ, дБ	30	31	28	30	29	30
Квантовая эффективность регистрации СФ, %	3,0	10	1,0	8,0	2,0	12
Скорость счета темновых импульсов СФ, $10^4$ с $^{-1}$	1,00	0,90	3,00	0,10	0,80	0,07
Длительность мертвого времени СФ, мкс	1,0	1,0	1,1	1,1	1,0	1,0
Средняя длительность бита (символа), мкс	8	3	24	3	12	2
Максимальная СПИ при отсутствии макроизгиба, Кбит/с	50	130	10	130	30	190
Параметры макроизгиба ОВ:						
– диаметр, мм;	23	16	32	16	26	13
– вероятность потери оптического сигнала с длиной волны $\lambda_1 = 850$ нм;	0,015	0,039	0,005	0,039	0,010	0,059
– вероятность потери оптического сигнала с длиной волны $\lambda_2 = 1625$ нм	0,59	0,84	0,39	0,84	0,51	0,98

Наибольшее значение СПИ рассматриваемого канала связи, обеспечивающего конфиденциальность передаваемых данных, удалось получить при использовании в качестве приемного модуля счетчика фотонов, построенного на базе ЛФП со структурой  $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$  при его рабочей температуре 263 К.

### Заключение

Установлено, что, в сравнении с другими исследуемыми длинами волн, наибольшей чувствительностью к макроизгибам ОВ обладает оптическое излучение с длиной волны 1625 нм, которое целесообразно использовать для передачи синхроимпульсов и обнаружения несанкционированного доступа к передаваемой информации. Непосредственно передавать данные по волоконно-оптической линии связи следует на длине волны оптического излучения 850 нм, поскольку в этом случае конфиденциальность передаваемой информации будет выше, чем при использовании других длин волн из числа исследуемых. Это обусловлено тем, что на длине волны оптического излучения 850 нм наименьшая вероятность потери оптического излучения, поэтому возможный несанкционированный доступ, осуществляемый посредством макроизгиба ОВ, может привести к утечке наименьшего количества информации.

Получено, что наибольшее значение СПИ рассматриваемого канала связи, обеспечивающего конфиденциальность передаваемых данных, достигается при использовании в качестве приемного модуля счетчика фотонов, построенного на базе лавинного фотоприемника со структурой  $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$  при его рабочей температуре 263 К.

*Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договоры № Т13-018, № Т14М-130).*

## USING OF SINGLE-QUANTUM REGISTRATION FOR CONFIDENTIAL INFORMATION TRANSMISSION SYSTEMS OVER FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES

I.R. GULAKOV, A.O. ZENEVICH, A.M. TIMOFEEV, A.G. KOSARI

### Abstract

The system for transmission and reception of confidential information over fiber-optic communication line on the basis of created single-quantum registration system of optical radiation has

been suggested. With regard to such a communication system two types of optical wavelengths have been experimentally justified. One type of optical wavelength is used for information transfer and the second one for time synchronization of information transmission and reception, as well as for detection of unauthorized access to information, created with optical fiber macrobends. Optimal values of optical power, which allowed to provide the highest confidential information data rate and detect more effectively possible data loss channels have been established.

#### Список литературы

1. *Олифер В.Г.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов. СПб., 2012.
2. *Булавкин И.А.* // Вестник связи. 2008. № 3. С. 54–58.
3. *Ивченко С.Н., Шубин В.В.* Способ защиты информации от несанкционированного доступа в волоконно-оптических линиях связи / Патент РФ 2110894.
4. *Ивченко С.Н., Овечкин С.И., Шубин В.В.* Способ обнаружения медленного вывода оптического излучения через боковую поверхность волоконно-оптической линии связи / Патент РФ №2251810.
5. *Шубин В.В.* Способ обнаружения участков волоконно-оптической линии передачи с повышенным боковым излучением / Патент РФ №2252405.
6. *Гулаков И.Р., Зеневич А.О.* Фотоприемники квантовых систем: монография. Минск, 2012.
7. *Зеневич А.О., Комаров С.К., Тимофеев А.М.* // Электросвязь. 2010. № 10. С. 14–16.
8. *Дмитриев С.А.* Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы. М., 2010.
9. *Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Комаров С.К.* // Докл. БГУИР. 2009. № 8 (46). С. 22–27.