



# Перехват трафика в оптических сетях: метод оптического туннелирования

В. В. Гришачев  
ИИИиТБ РГГУ, Москва, Россия

В статье проанализирован перехват информации на основе оптического туннелирования информационного сигнала из волоконно-оптического канала оптической системы связи в канал утечки. Анализ выполнен методом численного моделирования. Он показывает высокий уровень угроз информационной безопасности критической информационной инфраструктуры. Перехват может быть реализован скрытно в полевых условиях с вероятностью появления ошибочного бита, не большим, чем в линии связи, даже при сохранении структуры оптического волокна и с минимальными разрушениями защитных оболочек кабеля.

**Ключевые слова:** информационная безопасность оптических сетей, перехват трафика, оптические каналы связи и утечки, информационный и информативный оптический сигнал, оптическое туннелирование

Статья поступила: 24.10.2020  
Принята к публикации: 24.11.2020

## ПРОБЛЕМА ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ В ОПТИЧЕСКИХ СЕТЯХ СВЯЗИ

В структуре современных систем связи определяющую роль играют оптические сети, в основе которых находятся волоконно-оптические системы передачи информации. Передача информации через оптический кабель дает значительные преимущества перед другими каналами связи, одно из которых – высокая защищенность передачи от перехвата [1,2]. Надо отметить, что повышенный уровень безопасности во многом определяется малой изученностью методов формирования каналов утечки и существует достаточно много

# Traffic Intercept in Optical Network: Method of Optical Tunneling

V. V. Grishachev  
Institute for Information Sciences and Security Technologies  
Russian State University of the Humanities, Moscow, Russia

Numerical simulation analysis of information interception based on optical tunneling information signal from fiber optic communication systems in a channel leak shows a high level threats of information security of critical information infrastructure. Interception can be implemented covertly in the field with the probability of an error bit appearing, no more than in the communication line, even while preserving the structure of the optical fiber and with minimal damage to the cable's protective shells.

**Keywords:** optical network information security, traffic intercept, optical link and leakage channel, informational and informative signals, optical tunneling

Received on: 24.10.2020  
Accepted on: 24.11.2020

## PROBLEM OF INFORMATION SECURITY IN OPTICAL COMMUNICATION NETWORKS

In the structure of modern communication systems, a decisive role is played by optical networks, which are based on fiber-optic information transmission systems. The transmission of information through an optical cable provides significant advantages over other communication channels, one of which is the high security of transmission from interception [1, 2]. It should be noted that the increased level of security is largely determined by the low level of knowledge of the methods of forming leakage channels and there are many technical solutions for gaining access to information transmitted via fiber-optic channels.

Interception of information traffic in communication networks is unauthorized access to information

технических решений получения доступа к передаваемой по волоконно-оптическим каналам информации.

Перехват информационного трафика в сетях связи – это несанкционированный доступ к передаваемой по сетям связи информации с помощью средств технической разведки, т.е. технических средств не входящих в штатную инфраструктуру системы связи [2–5]. Структура перехвата включает штатный канал и линию связи, в котором формируется нештатный канал и линия утечки. Основой перехвата является физический способ подключения к штатному каналу связи. По способу подключения модель перехвата включает два вида (рис. 1):

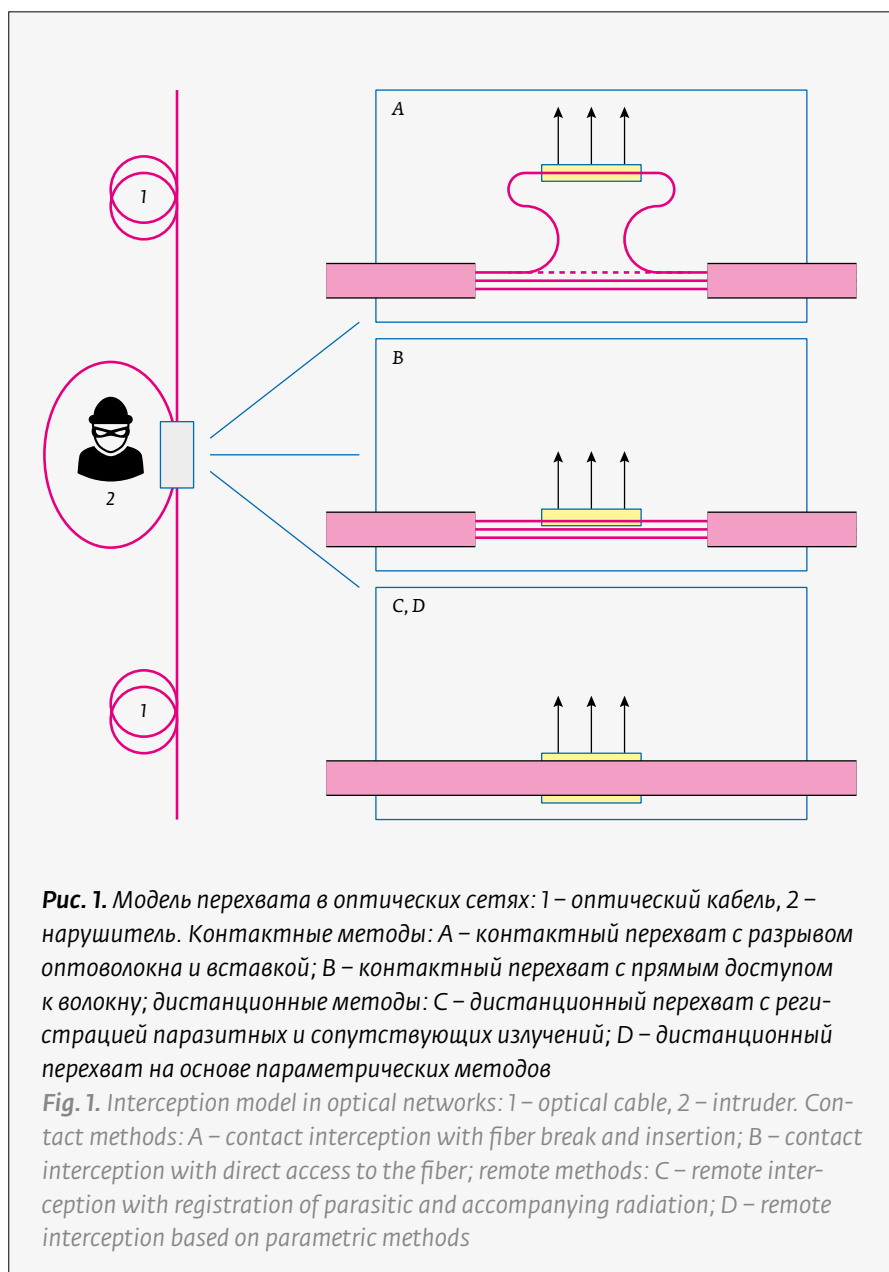
- контактный перехват, формируемый путем отвода части информационного оптического сигнала из канала связи в канал утечки (рис. 1А, 1В);
- дистанционный перехват, формируемый путем регистрации оптических и неоптических информативных сигналов без или с воздействием на канал связи (рис. 1С, 1D).

Вид перехвата определяет используемые средства технической разведки и эффективность функционирования, т.е. уровень опасности угрозы.

**Дистанционный перехват.** Одно из главных преимуществ оптического канала, по сравнению электрическими каналами связи, состоит в отсутствии побочных электромагнитных излучений и наводок (ПЭМИН), но данное утверждение не является абсолютным. Как показывает численное моделирование [6, 7], в оптическом кабеле присутствуют информативные электромагнитные излучения на частотах, близких к частотам модуляции информационного сигнала оптической несущей, – паразитные электромагнитные излучения (ПрЭМИ), формируемые вследствие нелинейно-оптических преобразований,

transmitted over communication networks using technical intelligence means, i.e. technical means not included in the standard infrastructure of the communication system [2–5]. The interception structure includes a regular channel and a communication line, in which an abnormal channel and a leak line are formed. Interception is based on the physical method of connecting to a standard communication channel. According to the connection method, the interception model includes two types (Fig. 1):

- contact interception, formed by diverting a part of the information optical signal from the communication channel to the leakage channel (Fig. 1A, 1B);



**Рис. 1.** Модель перехвата в оптических сетях: 1 – оптический кабель, 2 – нарушитель. Контактные методы: А – контактный перехват с разрывом оптоволокна и вставкой; В – контактный перехват с прямым доступом к волокну; дистанционные методы: С – дистанционный перехват с регистрацией паразитных и сопутствующих излучений; D – дистанционный перехват на основе параметрических методов

**Fig. 1.** Interception model in optical networks: 1 – optical cable, 2 – intruder. Contact methods: A – contact interception with fiber break and insertion; B – contact interception with direct access to the fiber; remote methods: C – remote interception with registration of parasitic and accompanying radiation; D – remote interception based on parametric methods



оценка мощности которых показывает возможность формирования дистанционного канала утечки. Также в литературе обсуждается дистанционный перехват на основе ядерного магнитного резонанса и других физических явлений без проведения какого-либо анализа. Все способы строятся на физических явлениях взаимодействия информационного сигнала с материалом канала связи, приводящее к информативным модуляциям параметров среды.

**Контактный перехват.** Отвод части излучения из оптоволокна является технической задачей требуемой для многих целей работы волоконно-оптических технологий, таких как объединение и разделение оптического потока в волокне и другие. Данные технологии могут успешно применяться и в технике перехвата, тем более что некоторые устройства с подобными функциями применяются при монтаже и эксплуатации волоконно-оптических систем передачи информации. Например, в службах мониторинга сети используются устройства-перехватчики трафика (network tap), которые представляются в виде включаемых в разрыв волокон с помощью штатных разъемов волоконно-оптического ответвителя и предназначенных для штатного контроля информационного трафика [1, 2]. Другое устройство, коммерческая волоконно-оптическая прищепка (например FOD-5503), используется при монтаже и эксплуатации оптической сети для голосовой связи между монтажниками на расстояниях более 200 км путем вывода/ввода части излучения на изгибе волокна [2].

Широкое распространение данных технических устройств, имеющих двойное назначение, привело к тому, что при обсуждении перехвата обсуждаются только эти два канала утечки. Их опасность значительно преувеличена, так как все они легко обнаруживаются службами мониторинга и безопасности либо при монтаже, либо при эксплуатации. Более или менее они эффективны для внутреннего нарушителя, который, используя свои знания работы локальной сети внутри контролируемой зоны, может подключить либо перехватчик трафика, либо прищепку-ответвитель. Перехват трафика в телекоммуникациях усложняется, так как разрыв канала будет обнаружен, отвод части информационного оптического сигнала на изгибе слишком значителен по величине, что скажется на функционале сети.

Анализ угроз показывает, что существуют другие более эффективные модели контактного перехвата, к которым относится перехват трафика

- remote interception, formed by registering optical and non-optical informative signals without or with impact on the communication channel (Fig. 1C, 1D).

The type of interception determines the technical reconnaissance means used and the effectiveness of their functioning, i. e. threat level of danger.

**Remote interception.** One of the main advantages of an optical channel in comparison with electrical communication channels is the absence of side electromagnetic radiation and pickup (SEMRP), but this statement is not absolute. As shown by numerical modeling [6, 7], the optical cable contains informative electromagnetic radiation at frequencies close to the modulation frequencies of the information signal of the optical carrier, parasitic electromagnetic radiation (PEMR), formed as a result of nonlinear optical transformations, the power assessment of which shows the possibility of forming a remote channel leaks. Also, the literature discusses remote interception based on nuclear magnetic resonance and other physical phenomena without conducting any analysis. All methods are based on the physical phenomena of the interaction of the information signal with the material of the communication channel, leading to informative modulations of the parameters of the environment.

**Contact interception.** Removing a part of the radiation from an optical fiber is a technical problem of fiber-optic technologies required for many purposes, such as combining and splitting an optical flow in a fiber and others. These technologies can also be successfully applied in interception techniques, especially since some devices with similar functions are used in the installation and operation of fiber-optic information transmission systems. Thus, in network monitoring services, network tap devices are used, which are presented in the form of fibers included in the break using standard fiber-optic coupler connectors and designed for regular control of information traffic [1, 2]. Another device, a commercial fiber-optic clothespin (e. g., FOD-5503) is used in the installation and operation of an optical network for voice communication between installers at distances of more than 200 km, by outputting/inputting part of the radiation at the bend of the fiber [2].

The wide dissemination of these dual-purpose technical devices has led to the fact that only these two channels of leakage are discussed in the discussion of interception. Their danger is greatly exaggerated, since they are all easily detected by monitoring and security services either during installation or during operation. They are more or less effective for an internal intruder who, using his knowledge of the

на основе отвода части оптического излучения из канала связи в канал утечки путем оптического туннелирования [2-3]. Хотя данный контактный перехват качественно описан достаточно давно, но физическое описание и оценки его эффективности отсутствуют. В данной работе данный пробел восполняется, что может позволить составить более полную модель угроз информационной безопасности трафику в оптических сетях.

## МЕТОДИКА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕХВАТА

Перехват трафика в информационных кабельных сетях имеет свои особенности, и для их выявления необходимо определить технические характеристики формирования и функционирования канала утечки [2-5, 8-10]. Основными составляющими канала утечки являются способ физического доступа к информационному сигналу и формирования информативного сигнала, реализация канала утечки и технические средства регистрации. Кроме этого необходимо определиться с техническими характеристиками, определяющими эффективность функционирования канала утечки.

**Канал связи и утечки.** Обобщенная структурная схема перехвата информационного трафика в оптических сетях представлена на рис. 2. Штатный канал связи состоит из передатчика 1, канала связи 2 в виде оптического кабеля и приемника 3. Основными частями канала утечки являются система формирования информативного сигнала 4, например путем отвода части излучения из канала связи в канал утечки, и система регистрации информативного сигнала 5. Функционирование канала утечки, которое может быть реализовано различными способами, определяется методом формирования информативного сигнала.

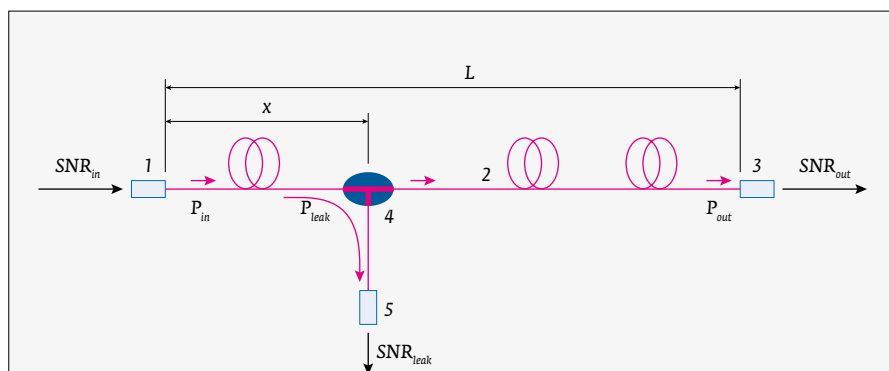
Параметры канала связи определяются длиной канала ( $L$ ), мощностями оптического сигнала на входе ( $P_{in}$ ), т.е. мощностью передатчика, и на выходе ( $P_{out}$ ), т.е. на входе в приемник, которые определяют бюджет

operation of a local network inside a protected perimeter, can connect either a traffic interceptor or a pincoupler. Traffic interception in telecommunications becomes more complicated, since a channel break will be detected, the removal of a part of the information optical signal at a bend is too significant in magnitude, which will affect the network functionality.

Threat analysis shows that there are other more effective models of contact interception, which include traffic interception based on the diversion of a part of the optical radiation from the communication channel to the leakage channel by optical tunneling [2-3]. Although this contact interception has been qualitatively described for a long time, there is no physical description and assessments of its effectiveness. In this work, this gap is filled, which can make it possible to compile a more complete model of threats to information security to traffic in optical networks.

## INTERCEPTION METHODOLOGY AND EFFICIENCY ASSESSMENT

Traffic interception in information cable networks has its own characteristics and in order to identify



**Рис. 2.** Структурная схема перехвата трафика в оптических сетях: 1 – оптический передатчик линии связи с выходной мощностью  $P_{in}$  и отношением сигнал/шум  $SNR_{in}$ , 2 – волоконно-оптический канал связи длиной  $L$ , 3 – оптический приемник линии связи с входной мощностью  $P_{out}$  и отношением сигнал/шум  $SNR_{out}$ , 4 – система формирования информативного сигнала на расстоянии  $x$  от передатчика, 5 – канал утечки с оптическим приемником с отводимой мощностью  $P_{leak}$  и отношением сигнал/шум  $SNR_{leak}$

**Fig. 2.** Block diagram of traffic interception in optical networks: 1 – optical transmitter of the communication line with output power  $P_{in}$  and signal-to-noise ratio  $SNR_{in}$ , 2 – fiber-optic communication channel of length  $L$ , 3 – optical receiver of the communication line with input power  $P_{out}$  and signal-to-noise ratio  $SNR_{out}$ , 4 – informative signal formation system at distance  $x$  from the transmitter, 5 – leakage channel with optical receiver with  $P_{leak}$  power dissipation and  $SNR_{leak}$  signal-to-noise ratio

линии связи ( $P_{in}-P_{out}$  в дБ). Величина  $P_{out}$  определяется чувствительностью приемника, которая не может быть выше этой величины. Также на работу линии связи влияют шумовые характеристики линии, задаваемые отношениями сигнал/шум на входе  $SNR_{in}$  и выходе  $SNR_{out}$ , которые можно разделить на электронные в активных частях и оптические в канале связи.

Параметры канала утечки определяются расстоянием ( $x$ ) до места формирования информативного сигнала в канале утечки, выбор которого оказывает значительное влияние на его эффективность. Чем ближе к передатчику расположен отвод, тем выше мощность информационного сигнала и тем большую мощность с меньшими шумами информативного сигнала ( $P_{leak}$ ) можно отвести скрытно от систем мониторинга. Эффективность перехвата во многом связана с шумами канала утечки  $SNR_{leak}$ , которые главным образом генерируются при подключении к штатному каналу связи и отводом в канал утечки. В других технических устройствах канала утечки шумы могут быть сокращены путем использования малозумящих приемников и усилителей по сравнению со штатными устройствами канала связи, что позволит добиться лучших шумовых характеристик.

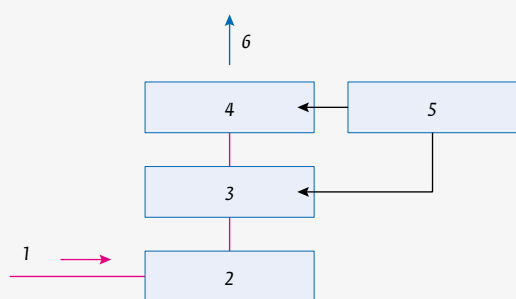
**Блок-схема канала утечки.** Эффективная регистрация трафика может быть реализована по схеме (рис. 3), в которой отведенный информативный сигнал 1 отрезается от канала связи путем уста-

them, it is necessary to determine the technical characteristics of the formation and functioning of the leakage channel [2-5, 8-10]. The main components of the leakage channel are the method of physical access to the information signal and the formation of the informative signal, the implementation of the leakage channel and technical means of registration. Furthermore, it is necessary to determine the technical characteristics that determine the efficiency of the leakage channel.

**Communication channel and leaks.** A generalized block diagram of information traffic interception in optical networks is shown in Fig. 2. The standard communication channel consists of a transmitter (1), a communication channel (2) in the form of an optical cable and a receiver (3). The main parts of the leakage channel are the informative signal formation system (4), e. g., by diverting part of the radiation from the communication channel to the leakage channel, and the informative signal registration system (5). The operation of the leakage channel is determined by the method of generating an informative signal, which can be implemented in various ways.

The parameters of the communication channel are determined by the channel length ( $L$ ), the power of the optical signal at the input ( $P_{in}$ ), i. e. transmitter power, and at the output ( $P_{out}$ ), i. e. at the entrance to the receiver, which determine the link budget ( $P_{in} - P_{out}$  in dB). The value of  $P_{out}$  is determined by the sensitivity of the receiver, which cannot be higher than this value. Also, the operation of the communication line is influenced by the noise characteristics of the line, specified by the signal-to-noise ratios at the  $SNR_{in}$  input and  $SNR_{out}$  output, which can be divided into electronic in active parts and optical in the communication channel.

The parameters of the leakage channel are determined by the distance ( $x$ ) to the place of formation of the informative signal in the leakage channel, the choice of which has a significant effect on its efficiency. The closer the tap is to the transmitter, the higher the power of the information signal and the more power with less noise of the information signal ( $P_{leak}$ ) can be diverted secretly from the monitoring systems. The efficiency of interception is largely due to the noise of the  $SNR_{leak}$  leakage channel, which is mainly generated when connected to a standard communication channel and tapped into the leakage channel. In other technical devices of the channel leakage noise can be reduced by using low-noise receivers and amplifiers in comparison with standard devices of the commu-



**Рис. 3.** Принципиальная блок-схема системы регистрации в канале перехвата трафика: 1 – информативный оптический сигнал, 2 – оптический изолятор, 3 – оптический усилитель, 4 – приемный оптический модуль, 5 – источник питания, 6 – информативный электрический сигнал

**Fig. 3.** Schematic block diagram of the registration system in the traffic interception channel: 1 – informative optical signal, 2 – optical isolator, 3 – optical amplifier, 4 – optical receiving module, 5 – power supply, 6 – informative electrical signal

новки оптического изолятора 2, последующего усиления 3 и преобразователя 4. Оптический изолятор выполняется в виде фарадеевского элемента, циркулятора или другого элемента и предназначен для недопущения обратных оптических излучений из канала утечки в канал связи, и в первую очередь излучений от оптического усилителя. Отводимый оптический сигнал должен быть малой величины, в предельном случае, порядка одного или нескольких фотонов, что позволяет повысить скрытность отвода излучения. Усиление позволяет повысить сигнал до требуемой мощности в преобразователе и последующего декодирования.

Задача канала утечки состоит в перехвате информационного трафика в канале связи без потерь информации. В цифровых системах связи это связано с формированием канала утечки, в котором вероятность появления ошибочного бита ( $BER_{leak}$ ) будет не больше, чем вероятность появления ошибочного бита ( $BER_{link}$ ) в канале связи, т. е.

$$BER_{leak} \leq BER_{link} .$$

Из этих предположений, основными параметрами канала связи являются: (1) оптический бюджет линии  $P_{in}-P_{out}$ , с которым связана чувствительность приемника; (2) отношение сигнал/шум на входе  $SNR_{in}$  и на выходе  $SNR_{out}$  канала связи. Тогда основными параметрами канала утечки, основанного на отведении части информационного оптического сигнала в канал утечки, являются мощность  $P_{leak}$  и отношение сигнал/шум  $SNR_{leak}$  информативного оптического сигнала.

Ограничения на мощность отводимого информативного сигнала определяются: (1) чувствительностью оптического приемника канала утечки, который должен надежно регистрировать сигнал с вероятностью появления ошибочного бита не большим, чем в канале связи; (2) с долей отводимой мощности из канала связи, которая должна быть такой малой, чтобы не быть обнаруженной системой мониторинга. На расстоянии  $x$  от передатчика мощность информативного сигнала  $P_{leak}=P_x$  зависит от мощности информационного сигнала  $P_0$  в месте формирования канала утечки, что позволяет ввести понятие коэффициента передачи мощности из канала связи в канал утечки

$$\kappa = \frac{P_x}{P_0} .$$

Дополнительные ограничения связаны с отношением сигнал/шум информативного сигнала – оно должно быть не меньше, чем у штатного прием-

никанского канала, который достигнет лучших характеристик.

**Leakage channel block diagram.** Effective traffic registration can be implemented according to the scheme (Fig. 3), in which the diverted informative signal (1) is cut off from the communication channel by installing an optical isolator (2), subsequent amplification (3) and a converter (4). The optical isolator is made in the form of a Faraday element, circulator or other element and is designed to prevent backward optical radiation from the leakage channel to the communication channel, and, first of all, radiation from the optical amplifier. The removed optical signal should be small, in the limiting case, on the order of one or several photons, which makes it possible to increase the secrecy of radiation removal. Amplification allows you to increase the signal to the required power in the converter and subsequent decoding.

The task of the leakage channel is to intercept information traffic in the communication channel without losing information. In digital communication systems, this is due to the formation of a leakage channel, in which the probability of an erroneous bit ( $BER_{leak}$ ) will not be greater than the probability of an erroneous bit ( $BER_{link}$ ) in the communication channel, i. e.

$$BER_{leak} \leq BER_{link} .$$

From these assumptions, if the main parameters of the communication channel are: (1) the optical budget of the  $P_{in}-P_{out}$  line, with which the receiver sensitivity is related; (2) signal-to-noise ratio at the  $SNR_{in}$  input and  $SNR_{out}$  output of the communication channel. Then, the main parameters of the leakage channel, based on the diversion of a part of the information optical signal to the leakage channel, are the  $P_{leak}$  power and the signal-to-noise ratio  $SNR_{leak}$  of the informative optical signal.

Limitations on the power of the withdrawn informative signal are determined by: (1) the sensitivity of the optical receiver of the leakage channel, which must reliably record the signal with the probability of an erroneous bit appearing no greater than in the communication channel; (2) with a fraction of the power removed from the communication channel, which must be so small as not to be detected by the monitoring system. At a distance  $x$  from the transmitter, the power of the informative signal  $P_{leak}=P_x$  depends on the power of the information signal  $P_0$  at the point of formation of the leakage channel, which allows us to introduce the concept of the power trans-

ника канала связи. Для характеристики шумовых свойств каналов можно использовать понятие коэффициента шума элементов канала [8–10], т. е. отношение SNR на входе элемента к SNR на выходе, так что интегральные коэффициенты шума канала связи и канала утечки определяются соответственно, как

$$CNL_{link} = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \text{ и } CNL_{leak} = \frac{SNR_{in}}{SNR_{leak}}.$$

Каждый из которых является произведением коэффициентов шума отдельных элементов, составляющих канал. Для канала утечки его можно определить в виде произведения

$$CNL_{leak} = F_T \cdot F_L \cdot F_A \cdot F_R \approx F_T,$$

коэффициентов шума системы формирования информативного сигнала ( $F_T$ ), линии передачи ( $F_L$ ), усилителя ( $F_A$ ) и преобразователя (приемника) ( $F_R$ ). Наибольший вклад в зашумление информативного сигнала вносит система формирования информативного сигнала, что связано с необходимостью его создания в полевых условиях существующей линии связи, в то время как другие элементы могут быть изготовлены заранее промышленным способом с характеристиками, превосходящими штатные элементы.

Условием для достоверной оценки эффективности канала утечки является требование

$$CNL_{leak} \leq CNL_{link},$$

тогда вероятность появления ошибочного бита в канале утечки будет не больше, чем в канале связи, т. е.  $BER_{leak} \leq BER_{link}$ .

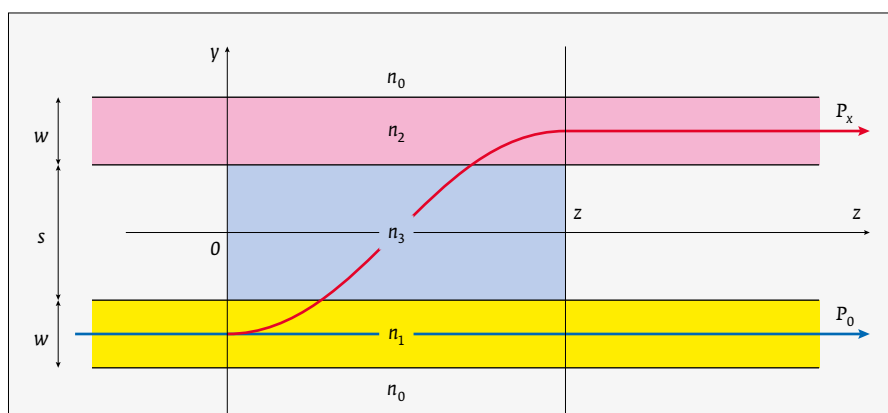
Введенные параметры позволяют провести анализ эффективности функционирования каналов утечки на основе отвода части оптического излучения из канала связи и сделать предположения по эффективной защите канала связи от перехвата по отдельным типам. В частности, далее рассматри-

fer coefficient from the communication channel to the leakage channel

$$\kappa = \frac{P_x}{P_0}.$$

Additional restrictions are associated with the signal-to-noise ratio of the informative signal: it should be no less than that of a standard receiver of the communication channel. To characterize the noise properties of channels, one can use the concept of the noise figure of channel elements [8–10], i. e. the ratio of the SNR at the input of the element to the SNR at the output, so that the integral noise factors of the communication channel and the leakage channel are determined, respectively, as

$$CNL_{link} = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \text{ and } CNL_{leak} = \frac{SNR_{in}}{SNR_{leak}}.$$



**Рис. 4.** Модель формирования информативного сигнала переходом части оптического информативного сигнала из волновода канала связи в волновод канала утечки путем оптического туннелирования:  $n_0, n_1, n_2, n_3$  – показатели преломления окружающей среды, материала волноводов и среды оптического контакта волноводов,  $w$  – ширина (плоских) волноводов каналов связи и утечки,  $s$  – ширина среды оптического контакта,  $z$  – длина среды оптического контакта,  $P_0$  – мощность информационного оптического сигнала в канале связи,  $P_x$  – мощность информативного оптического сигнала в канале утечки

**Fig. 4.** Model of the formation of an informative signal by the transition of a part of the optical informative signal from the waveguide of the communication channel to the waveguide of the leakage channel by optical tunneling:  $n_0, n_1, n_2, n_3$  are the refractive indices of the environment, the material of the waveguides and the medium of the optical contact of the waveguides,  $w$  is the width of the (plane) waveguides of the channels communication and leakage,  $s$  is the width of the optical contact medium,  $z$  is the length of the optical contact medium,  $P_0$  is the power of the information optical signal in the communication channel,  $P_x$  is the power of the informative optical signal in the leakage channel



вается канал утечки на основе отвода части оптического излучения из канала связи в канал утечки на основе оптического туннелирования.

## ОПТИЧЕСКОЕ ТУННЕЛИРОВАНИЕ В ПЕРЕХВАТЕ ТРАФИКА

Явление оптического туннелирования состоит в нарушении полного внутреннего отражения на границе сердцевина/оболочка оптического волокна, которое связано с формированием поверхностной волны, проникающей внутрь оболочки с экспоненциально убывающей интенсивностью по глубине проникновения, варьирующуюся с углом падения и длиной волны [2, 3, 11–13]. Проникающая в оболочку отражаемая волна уходит от границы на расстояния нескольких длин волн и может быть захвачена другим волноводом. При условии фазового синхронизма в основном волноводе и дополнительном волноводе, перехватывающем часть поверхностной волны, происходит перетекание волны, которое может быть полным.

Модель отвода оптической мощности из одного волновода в другой, близко расположенный волновод, представлена на рис. 4. Два волноводных канала вдоль оси  $y$  шириной  $w$  с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  разделены расстоянием  $s$  с показателем преломления  $n_3$ , образующим оптический контакт вдоль волокон длиной  $z$  по оси  $z$ . По информационному каналу связи распространяется оптическое информационное излучение мощностью  $P_0$ , в области оптического контакта часть излучения мощностью  $P_x$  переходит в информативный канал утечки.

Коэффициент передачи из канала связи в канал утечки для случая оптического туннелирования можно определить методом связанных мод [11–13] как

$$\kappa = \frac{K^2}{K^2 + (\Delta\beta/2)} \sin^2 \left[ \left( K^2 + (\Delta\beta/2)^2 \right)^{1/2} z \right] \exp(-\alpha z),$$

который зависит от коэффициента связи оптических мод ( $K$ ) в каналах связи и утечки, оптической контактной длины волноводов  $z$  с оптическими потерями в канале связи  $\alpha$  и разностью постоянных распространения между ними  $\Delta\beta$ .

В приближении малого поглощения ( $\alpha \ll 1$ ) и одинаковости волноводов ( $\Delta\beta \approx 0$ ) получим

$$\kappa = \sin^2 Kz.$$

Отвод мощности из канала связи в канал утечки не должен быть большим. Он не должен превышать типичные значения потерь на оптических

Each of which is the product of the noise figures of the individual elements that make up the channel. For the leakage channel, it can be defined as the product

$$CNL_{leak} = F_T \cdot F_L \cdot F_A \cdot F_R \approx F_T,$$

noise factors of the informative signal formation system ( $F_T$ ), transmission line ( $F_L$ ), amplifier ( $F_A$ ) and converter (receiver) ( $F_R$ ). The greatest contribution to the noise of the informative signal is made by the informative signal generation system, which is associated with the need to create it in the field conditions of the existing communication line, while other elements can be manufactured in advance by an industrial method with characteristics superior to standard elements.

A condition for a reliable assessment of the efficiency of the leakage channel is the requirement

$$CNL_{leak} \leq CNL_{link},$$

then the probability of an erroneous bit appearing in the leakage channel will be no more than in the communication channel, i. e.  $BER_{leak} \leq BER_{link}$ .

The introduced parameters make it possible to analyze the efficiency of the leakage channels functioning based on the removal of a part of the optical radiation from the communication channel and to make assumptions on the effective protection of the communication channel from interception by individual types. In particular, a leakage channel based on diverting a part of optical radiation from a communication channel to a leakage channel based on optical tunneling is considered below.

## ОПТИЧЕСКОЕ ТУННЕЛИРОВАНИЕ В ПЕРЕХВАТЕ ТРАФИКА

The phenomenon of optical tunneling consists in the violation of total internal reflection at the core/cladding interface of an optical fiber, which is associated with the formation of a surface wave penetrating into the cladding with an exponentially decreasing intensity along the penetration depth, varying with the angle of incidence and wavelength [2, 3, 11–13]. The reflected wave penetrating into the shell leaves the boundary at a distance of several wavelengths and can be captured by another waveguide. Under the condition of phase matching in the main waveguide and the additional waveguide intercepting a part of the surface wave, the wave overflow occurs, which can be complete.





неоднородностях типа сварки (менее 0,1 дБ, порядка 0,01-0,02 дБ), поэтому отводимая мощность всегда много меньше 1 при  $Kz < 0,1$ , что позволяет определить коэффициент передачи в виде

$$\kappa = (Kz)^2.$$

Как видно, значение коэффициента передачи  $\kappa$  определяется коэффициентом связи  $K$  между волноводами каналов связи и утечки, а длина оптического контакта  $z$  волнопроводов играет роль параметра, с помощью которого можно влиять на величину коэффициента передачи.

**Оценка интегрального коэффициента передачи из канала связи в канал утечки** может быть проведена в приближении плоских волнопроводов с параболическим профилем показателя преломления методом связанных мод. Для оценки используем геометрические и оптические параметры волнопроводов, близкие по величине к цилиндрическим волокнам оптических систем связи [1,2].

- Геометрические параметры: ширина волновода порядка диаметра сердцевинки волокна – 8–9 мкм ( $w/\lambda=8$ ), ширина оптического контакта меньше или порядка толщины оболочки волокна – ~60 мкм при диаметре оболочки 125 мкм ( $s/\lambda \leq 50$ ).
- Длина оптического контакта порядка 1 см ( $z/\lambda=10^4$ ) выбирается из условий технической возможности фиксации протяженного контакта механическими и клеявыми приспособлениями, а также из условия фазового синхронизма связанных мод. Длина когерентности информационного оптического сигнала ограничивается частотой модуляции, следовательно, для скорости передачи информации более 10 ГГц длина когерентности составит порядка 6 см.
- Оптические параметры: показатели преломления волнопроводов как у сердцевин выпускаемых оптоволокон порядка  $n_1=n_2=1,45$ , показатель преломления оптического контакта  $n_3=1,44$  (т.е.  $n_1(n_2)-n_3=0,01$ ) и критический угол  $\theta_c=1,45328$  рад ( $\sin \theta_c=n_3/n_2=0,9931$ ), т.е. пределы изменения угла падения  $\theta \in \{\theta_c=1,45328 \div 1,57080 = \pi/2\}$  и синуса угла падения  $\sin \theta \in \{0,993103 \div 1\}$ .

Предлагаемые приближения можно транслировать на цилиндрические волокна с определенными ограничениями, но они позволяют определить основные параметры оптического туннелирования по порядку величины, что вполне

A model of optical power removal from one waveguide into an arc closely located waveguide is shown in Fig. 4. Two waveguide channels along the  $y$  axis with a width  $w$  with refractive indices  $n_1$  and  $n_2$  are separated by a distance  $s$  with a refractive index  $n_3$ , which forms an optical contact along the fibers of length  $z$  along the  $z$  axis. Through the information communication channel, optical information radiation with power  $P_0$  propagates, in the area of the optical contact, part of the radiation with power  $P_x$  passes into the informative leakage channel.

The transmission coefficient from the communication channel to the leakage channel for the case of optical tunneling can be determined by the coupled mode method [11-13] as

$$\kappa = \frac{K^2}{K^2 + (\Delta\beta/2)^2} \sin^2 \left[ \left( K^2 + (\Delta\beta/2)^2 \right)^{1/2} z \right] \exp(-\alpha z),$$

which depends on the coupling coefficient of optical modes ( $K$ ) in the communication and leakage channels, the optical contact length  $z$  of the waveguides with optical losses in the communication channel  $\alpha$  and the difference between the propagation constants  $\Delta\beta$  between them.

In the approximation of small absorption ( $\alpha \ll 1$ ) and the same waveguides ( $\Delta\beta \approx 0$ ), we obtain

$$\kappa = \sin^2 Kz.$$

The power drain from the communication channel to the leakage channel should not be large. It should not exceed the typical values of losses due to optical inhomogeneities of the welding type (less than 0.1 dB, about 0.01-0.02 dB), therefore, the power removed is always much less than 1 with  $Kz < 0,1$ , which makes it possible to determine the transmission coefficient in the form

$$\kappa = (Kz)^2.$$

As can be seen, the value of the transmission coefficient  $\kappa$  is determined by the coupling coefficient  $K$  between the waveguides of the communication and leakage channels, and the length of the optical contact  $z$  of the waveguides plays the role of a parameter with which one can influence the value of the transmission coefficient.

**The integral transmission coefficient from the communication channel to the leakage channel can be assessed** in the approximation of plane waveguides with a parabolic refractive index profile by the coupled mode method. For the assessment, we use the



достаточно для поставленной задачи по оценке эффективности канала утечки.

Коэффициент связи оптических мод  $K$  зависит от типа волноводов, расстояния между волноводами ( $s$ ), частоты или длины волны информационного сигнала ( $\omega$  или  $\lambda$ ), постоянной распространения волновода ( $\beta = nk_0 \sin \theta$ ), показателя преломления среды волновода ( $n$ ), волнового числа информационного сигнала в вакууме ( $k_0 = 2\pi/\lambda$ ), угла падения ( $\theta$ , принимающего значения от критического угла падения  $\theta_c = \arcsin(n_3/n_1)$  до направления распространения вдоль оси волновода  $\pi/2$ ). В приближении плоских одинаковых волноводов с  $n_1 = n_2$ ,  $\Delta\beta = 0$  и параболическим профилем показателя преломления коэффициент связи [11] имеет вид

$$K = -\frac{2\pi n_2 (n_2^2 \sin^2 \theta - n_3^3)}{\lambda (n_2^3 - n_3^2) \left[ 1 + \pi (w/\lambda) \sqrt{n_2^2 \sin^2 \theta - n_3^3} \right] \sin \theta} \times \exp \left\{ -2\pi \sqrt{n_2^2 \sin^2 \theta - n_3^3} (s/\lambda) \right\}.$$

Тогда коэффициент передачи может быть представлен в удобном для численного моделирования виде

$$\kappa = A \left( \frac{z}{\lambda} \right)^2 \left[ \frac{x^2}{[1 + B(w/\lambda)x] \sin \theta} \right]^2 \exp \left\{ -4B \left( \frac{s}{\lambda} \right) x \right\},$$

где введены безразмерные константы на основании принятых геометрических и оптических характеристик волноводов:

$$A = \frac{4\pi^2 n_2^6}{(n_2^3 - n_3^2)} = 4,4 \cdot 10^5; \quad B = \pi n_2 = 4,6; \quad x = \sqrt{\sin^2 \theta - \sin^2 \theta_c};$$

$$\sin^2 \theta_c = (n_3/n_2)^2 = 0,986254 \text{ для } n_2 = 1,45 \text{ и } n_3 = 1,44,$$

$$\lambda = 1,6 \text{ мкм, } (w/\lambda) = 5, (s/\lambda) = 40, (z/\lambda) = 100.$$

В результате численного моделирования получена зависимость коэффициента передачи от угла падения  $\kappa(\theta)$ , которая имеет ярко выраженный максимум (рис. 5). Коэффициент передачи равен 0 при критических углах падения, с увеличением угла падения он быстро растет и достигает своего максимума. Приближение направления распространения к приосевым лучам приводит к быстрому падению коэффициента передачи до 0. Таким образом, коэффициент передачи имеет узкий по углу падения максимум, в котором сосредоточена небольшая доля мощности информационного сигнала. Величина максимума достигает 1

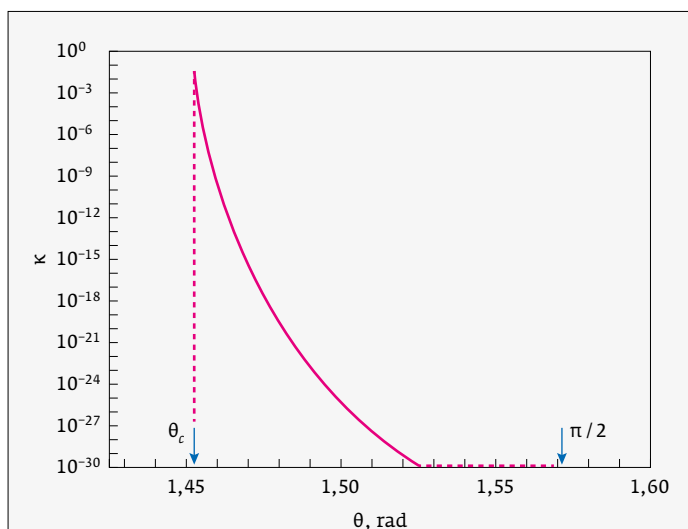
geometric and optical parameters of waveguides, which are close in magnitude to cylindrical fibers of optical communication systems [1, 2].

- Geometric parameters: waveguide width of the order of the fiber core diameter - 8-9  $\mu\text{m}$  ( $w/\lambda = 8$ ), the optical contact width is less than or of the order of the fiber cladding thickness - ~60  $\mu\text{m}$  with a 125  $\mu\text{m}$  cladding diameter ( $s/\lambda \leq 50$ ).
- The length of the optical contact of about 1 cm ( $z/\lambda = 10^4$ ) is selected from the conditions of the technical possibility of fixing the extended contact with mechanical and adhesive devices, as well as from the condition of phase matching of coupled modes. The coherence length of the information optical signal is limited by the modulation frequency; therefore, for an information transmission rate of more than 10 GHz, the coherence length will be about 6 cm.
- Optical parameters: the refractive indices of the waveguides are of the order of  $n_1 = n_2 = 1,45$ , the refractive index of the optical contact is  $n_3 = 1,44$  (i.e.  $n_1(n_2) - n_3 = 0,01$ ) and the critical angle  $\theta_c = 1,45328$  rad ( $\sin \theta_c = n_3/n_2 = 0,9931$ ), i.e. limits of variation of the angle of incidence  $\theta \in \{\theta_c = 1,45328 \pm 1,57080 = \pi/2\}$  and sine of the angle of incidence  $\sin \theta \in \{0,993103 \pm 1\}$ .

The proposed approximations can be transmitted to cylindrical fibers with certain restrictions, but they allow one to determine the main parameters of optical tunneling in order of magnitude, which is quite sufficient for the task of assessing the efficiency of the leakage channel.

The coupling coefficient of optical modes  $K$  depends on the type of waveguides, the distance between the waveguides ( $s$ ), the frequency or wavelength of the information signal ( $\omega$  or  $\lambda$ ), the waveguide propagation constant ( $\beta = nk_0 \sin \theta$ ), the refractive index of the waveguide medium ( $n$ ), the wave number of the information signal in vacuum ( $k_0 = 2\pi/\lambda$ ), the angle of incidence ( $\theta$ , taking values from the critical angle of incidence  $\theta_c = \arcsin(n_3/n_1)$  to the direction of propagation along the axis of the waveguide  $\pi/2$ ). In the approximation of plane identical waveguides with  $n_1 = n_2$ ,  $\Delta\beta = 0$  and a parabolic profile of the refractive index, the coupling coefficient [11] has the form

$$K = -\frac{2\pi n_2 (n_2^2 \sin^2 \theta - n_3^3)}{\lambda (n_2^3 - n_3^2) \left[ 1 + \pi (w/\lambda) \sqrt{n_2^2 \sin^2 \theta - n_3^3} \right] \sin \theta} \times \exp \left\{ -2\pi \sqrt{n_2^2 \sin^2 \theta - n_3^3} (s/\lambda) \right\}.$$



**Рис. 5.** Зависимость коэффициента передачи  $\kappa$  от угла падения  $\theta$  в пределах от критического угла падения ( $\theta_c$ ) до прямого угла падения для показателей преломления одинаковых волноводов 1,45 и оптического контакта между ними 1,44 (ширина волноводов  $w/\lambda=5$ , ширина оптического контакта  $s/\lambda=40$ , длина оптического контакта  $z/\lambda=100$ )

**Fig. 5.** Dependence of the transmission coefficient  $\kappa$  on the angle of incidence  $\theta$  in the range from the critical angle of incidence ( $\theta_c$ ) to the right angle of incidence for the refractive indices of the same waveguides 1.45 and the optical contact between them 1.44, (the width of the waveguides  $w/\lambda=5$ , the width of the optical contact  $s/\lambda=40$ , optical contact length  $z/\lambda=100$ )

при увеличении длины оптического контакта более 1 мм. Это позволяет полностью отводить в канал утечки малые доли информационного потока, отклоняющиеся от приосевого направления распространения, что трудно фиксируется системами мониторинга сети.

Из графика зависимости  $\kappa(\theta)$  видно, что присутствующие в структуре потока направления лучей распространения, близкие к критическому углу падения  $\theta_c$ , будут эффективно переходить из канала связи в канал утечки. В приближении оптического контакта длиной порядка ста величин длин волн (~160 мкм) и при ширине около 40 длин волн (~65 мкм) в канал утечки будет переходить более 1% мощности всех лучей с углом падения, близким к критическому углу. Увеличение длины оптического контакта в 100 раз до 16 мм приведет к вовлечению в процесс формирования информативного сигнала более удаленные от критического угла лучи со 100% передачей в канал

Then the transmission coefficient can be presented in a form convenient for numerical simulation

$$\kappa = A \left( \frac{z}{\lambda} \right)^2 \left[ \frac{x^2}{[1 + B(w/\lambda)x] \sin \theta} \right]^2 \exp \left\{ -4B \left( \frac{s}{\lambda} \right) x \right\},$$

where dimensionless constants are introduced based on the adopted geometric and optical characteristics of waveguides:

$$A = \frac{4\pi^2 n_2^6}{(n_2^3 - n_3^3)} = 4,4 \cdot 10^5; \quad B = \pi n_2 = 4,6; \quad x = \sqrt{\sin^2 \theta - \sin^2 \theta_c};$$

$$\sin^2 \theta_c = (n_3 / n_2)^2 = 0,986254 \text{ for } n_2 = 1,45 \text{ и } n_3 = 1,44,$$

$$\lambda = 1,6 \text{ } \mu\text{m}, \quad (w/\lambda) = 5, \quad (s/\lambda) = 40, \quad (z/\lambda) = 100.$$

As a result of numerical simulation, the dependence of the transmission coefficient on the angle of incidence  $\kappa(\theta)$  was obtained, which has a pronounced maximum (Fig. 5). The transmission coefficient is equal to 0 at critical angles of incidence; with an increase in the angle of incidence, it rapidly increases and reaches its maximum. The approach of the propagation direction to the paraxial rays leads to a rapid drop in the transmission coefficient to 0. Thus, the transmission coefficient has a maximum narrow in the angle of incidence, in which a small fraction of the information signal power is concentrated. The maximum value reaches 1 when the length of the optical contact is increased by more than 1 mm. This allows small portions of the information flow deviating from the axial direction of propagation to be completely diverted into the leakage channel, which is difficult to detect by network monitoring systems.

It can be seen from the plot of the dependence  $\kappa(\theta)$  that the directions of propagation rays present in the structure of the flow close to the critical angle of incidence  $\theta_c$  will effectively pass from the communication channel to the leakage channel. In the approximation of an optical contact with a length of about a hundred wavelengths (~160  $\mu\text{m}$ ) and a width of about 40 wavelengths (~65  $\mu\text{m}$ ), more than 1% of the power of all beams with an angle of incidence close to the critical angle will pass into the leakage channel. An increase in the length of the optical contact by a factor of 100 to 16 mm will lead to the involvement of beams more distant from the critical angle into the process of forming an informative signal with 100% transmission to the leakage channel. Beams closer to the critical angle will not have a significant effect on the transmission coefficient due to the violation of the wave synchronism between

утечки. Более близкие к критическому углу лучи не будут оказывать существенного влияние на коэффициент передачи из-за нарушения волнового синхронизма между каналами. Таким образом, 100%-ая передача будет происходить в узком диапазоне углов падения, ограниченных шириной диапазона углов с максимальной передачей, порядка 0,003 рад из общего диапазона углов порядка 0,1 рад. Интегральный коэффициент передачи мощности можно оценить в 1%. Такой вид зависимости  $\kappa(\theta)$  предполагает возможность формирования регистрируемого информативного сигнала в канале утечки даже для цилиндрических волокон соединенных оптическим клеем без стравливания оболочки волокна до сердцевины, что значительно упрощает технику отвода светового потока и делает её скрытной для мониторинга.

**Оценка расстояния от передатчика линии связи до места перехвата.** Мощность  $P_{leak}$  информативного сигнала в месте перехвата определяется исходной мощностью  $P_{in}$  передатчика, потерями  $\alpha$  в канале связи и коэффициентом передачи  $\kappa$ , так что

$$P_{leak} = \kappa P_{in} \cdot 10^{-\alpha x}.$$

Минимальную отводимую в канал утечки мощность можно оценить в 10 фотонов, которая ограничивается шумами средств технической разведки канала утечки. Ограничение по мощности для скорости передачи информации 100 Гб/сек составит  $P_{leak} < -40$  дБм (0,1 мкВт), отсюда получаем максимальную дальность перехвата

$$x < \frac{\lg(P_{in} / P_{leak}) + \lg(\kappa)}{\alpha}.$$

Для интегрального коэффициента передачи  $\kappa=1\%$ , мощности передатчика  $P_{in}=10$  дБм и потерей в канале связи  $\alpha=0,5$  дБ/км расстояние, до которого будет возможен перехват с принятой техникой разведки, достигнет 60 км.

**Шумы информативного сигнала в канале утечки.** При формировании информативного сигнала путем оптического туннелирования коэффициент связи оптических мод ( $K$ ) испытывает флуктуации вследствие теплового изменения расстояния между каналами ( $\delta s$ ), ширины спектра информационного сигнала ( $\delta \omega$ ), направления распространения ( $\delta \theta$ ), что вызывает флуктуации коэффициента передачи и, следовательно, искажения информативного сигнала в канале утечки, т.е. появление мультипликативных шумов. Аддитивными шумами можно пренебречь, так как про-

те channels. Thus, 100% transmission will occur in a narrow range of angles of incidence, limited by the width of the range of angles with maximum transmission, of the order of 0.003 rad from the total range of angles of the order of 0.1 rad. The integral power transfer ratio can be assessed at 1%. This type of dependence  $\kappa(\theta)$  presupposes the possibility of forming a recorded informative signal in the leakage channel even for cylindrical fibers connected with optical glue without bleeding the fiber cladding to the core, which greatly simplifies the technique of removing the light flux and makes it hidden for monitoring.

**Assessment of the distance from the transmitter of the communication line to the place of interception.** The  $P_{leak}$  power of the informative signal at the point of interception is determined by the original power  $P_{in}$  of the transmitter, the loss  $\alpha$  in the communication channel and the transmission coefficient  $\kappa$ , so that

$$P_{leak} = \kappa P_{in} \cdot 10^{-\alpha x}.$$

The minimum power diverted into the leakage channel can be assessed at 10 photons, which is limited by the noise of the technical reconnaissance equipment of the leakage channel. The power limit for a data transfer rate of 100 Gb/s will be  $P_{leak} < -40$  dBm (0.1  $\mu$ W), hence the maximum interception range

$$x < \frac{\lg(P_{in} / P_{leak}) + \lg(\kappa)}{\alpha}.$$

For the integral transmission coefficient  $\kappa=1\%$ , transmitter power  $P_{in}=10$  dBm and loss in the communication channel  $\alpha=0.5$  dB/km, the distance to which interception with the adopted reconnaissance technique will be possible will reach 60 km.

**Noises of the informative signal in the leakage channel.** When forming an informative signal by optical tunneling, the coupling coefficient of optical modes ( $K$ ) experiences fluctuations due to a thermal change in the distance between channels ( $\delta s$ ), the width of the spectrum of the information signal ( $\delta \omega$ ), the direction of propagation ( $\delta \theta$ ), which causes fluctuations in the transmission coefficient and, consequently, distortion informative signal in the leakage channel, i.e. the appearance of multiplicative noise. Additive noise can be disregarded as the penetration from the external environment or internal light generation is negligible. At the point where the optical radiation is tapped off, the rms power of the information signal in the communication channel and the informative signal in the leakage channel

$$P_x = S_x + N_x \text{ and } P_{leak} = S_l + N_l,$$



никновение из внешней среды или внутренние генерации света незначительны. В месте отвода оптического излучения среднеквадратичная мощность информационного сигнала в канале связи и информативного сигнала в канале утечки

$$P_x = S_x + N_x \text{ и } P_{leak} = S_l + N_l,$$

где первые слагаемые  $S_x$  и  $S_l$  – мощности полезной части сигнала, а вторые слагаемые  $N_x$  и  $N_l$  – мощности шумов. Среднеквадратичная мощность полезной части информативного сигнала

$$S_l = \kappa S_x - \delta \kappa S_x$$

и шумовой части

$$N_l = \delta \kappa S_x + \kappa N_x + N_a,$$

где  $\delta \kappa$  – паразитные флуктуации коэффициента передачи, которые уменьшают величину полезной части информативного сигнала на  $\delta \kappa S_x$  и на столько же увеличивают её шумовую часть,  $N_a = 0$  – аддитивные шумы, которыми пренебрегаем. Отсюда можно получить связь отношения сигнал/шум информационного  $SNR_x$  и информативного  $SNR_{leak}$  сигналов в виде коэффициента шума канала утечки

$$CNL_{leak} = \frac{SNR_x}{SNR_{leak}} = \frac{1 + SNR_x (\delta \kappa / \kappa)}{1 - (\delta \kappa / \kappa)} \approx F_T.$$

То есть предполагается, что основной вклад в шумы дает способ формирования отвода части информационного сигнала из канала связи в канал утечки, шумы других частей канала утечки нивелируются выбором малозумящих средств технической разведки.

**Оценка флуктуаций коэффициента передачи  $\delta \kappa / \kappa$**  определяется относительными флуктуациями параметров оптического туннелирования, таких как угол падения ( $\delta \theta / \theta$ ), ширина ( $\delta s / s$ ) и длина ( $\delta z / z$ ) оптического контакта, ширины волновода ( $\delta w / w$ ) и других, связанных с тепловыми колебаниями в месте контакта. В приближении малости коэффициента передачи его величина связывается с относительными флуктуациями в принятых обозначениях и приближениях как

$$\frac{\delta \kappa}{\kappa} \approx 2 \frac{\delta(Kz)}{Kz} =$$

$$= 2 \sqrt{\left[ \frac{\delta z}{z} \right]^2 + \left( \frac{Bx(w/\lambda)}{1 + Bx(w/\lambda)} \right)^2 \left[ \frac{\delta w}{w} \right]^2 + 16(Bx)^2 \left[ \frac{s}{\lambda} \right]^2 \left[ \frac{\delta s}{s} \right]^2} + o(\delta \theta / \theta).$$

where the first terms  $S_x$  and  $S_l$  are the power of the useful part of the signal, and the second terms  $N_x$  and  $N_l$  are the power of the noise. RMS power of the useful part of the informative signal

$$S_l = \kappa S_x - \delta \kappa S_x$$

and noise part

$$N_l = \delta \kappa S_x + \kappa N_x + N_a,$$

where  $\delta \kappa$  are parasitic fluctuations of the transmission coefficient, which reduce the value of the useful part of the informative signal by  $\delta \kappa S_x$  and increase its noise part by the same amount,  $N_a = 0$  are additive noise, which we neglect. From here it is possible to obtain the relationship between the signal-to-noise ratio of the information  $SNR_x$  and information  $SNR_{leak}$  signals in the form of leakage channel noise figure

$$CNL_{leak} = \frac{SNR_x}{SNR_{leak}} = \frac{1 + SNR_x (\delta \kappa / \kappa)}{1 - (\delta \kappa / \kappa)} \approx F_T.$$

Thus, it is assumed that the main contribution to the noise is provided by the method of forming the diversion of a part of the information signal from the communication channel to the leakage channel, the noise of other parts of the leakage channel is leveled by the choice of low-noise technical reconnaissance means.

**The assessment of fluctuations in the transmission coefficient  $\delta \kappa / \kappa$**  is determined by the relative fluctuations of the parameters of optical tunneling, such as the angle of incidence ( $\delta \theta / \theta$ ), width ( $\delta s / s$ ) and length ( $\delta z / z$ ) of the optical contact, the width of the waveguide ( $\delta w / w$ ), and others associated with thermal vibrations at the point of contact. In the approximation of smallness of the transfer coefficient, its value is associated with relative fluctuations in the accepted notation and approximations as

$$\frac{\delta \kappa}{\kappa} \approx 2 \frac{\delta(Kz)}{Kz} =$$

$$= 2 \sqrt{\left[ \frac{\delta z}{z} \right]^2 + \left( \frac{Bx(w/\lambda)}{1 + Bx(w/\lambda)} \right)^2 \left[ \frac{\delta w}{w} \right]^2 + 16(Bx)^2 \left[ \frac{s}{\lambda} \right]^2 \left[ \frac{\delta s}{s} \right]^2} + o(\delta \theta / \theta).$$

Taking into account the large length of the optical contact and the stability of the waveguide width, the transmission coefficient can be assessed by the approximation

$$\frac{\delta \kappa}{\kappa} \approx 8\pi n_2 \sqrt{\sin^2 \theta - \sin^2 \theta_c} \frac{\delta s}{\lambda} \approx 0,5.$$

Если учесть большую длину оптического контакта и стабильность ширины волновода, то коэффициент передачи можно оценить приближением

$$\frac{\delta k}{k} \approx 8\pi n_2 \sqrt{\sin^2 \theta - \sin^2 \theta_c} \frac{\delta s}{\lambda} \approx 0,5.$$

Тогда коэффициент шума передачи

$$CNL_{leak} \approx F_T \approx 10 \text{ для } SNR_x = 8, \text{ т. е. } SNR_{leak} = 1.$$

Это значительно затрудняет перехват. Но эффективного перехвата можно достичь использованием менее шумящего приемника по сравнению со штатным приемником линии связи (т. е. с вероятностью появления ошибочного бита, не большего штатного канала связи).

### ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХВАТА ТРАФИКА В ОПТИЧЕСКИХ СЕТЯХ СВЯЗИ

Практическая реализация перехвата возможна при создании эффективного и стабильного оптического контакта между каналами связи и утечки, что требует выполнения определенных условий по доступу к оптическому кабелю и технических решений по формированию отвода части оптического излучения. На основе проведенного качественного анализа формирования информативного сигнала методом оптического туннелирования можно предложить несколько структурных схем реализации канала утечки (рис. 6). Несмотря на то, что значения коэффициента передачи должны быть малы, но даже в этом случае реализовать туннелирование света через защитные оболочки трудно. Поэтому, во-первых, необходимо освободить волокно от всех защитных оболочек до оптической оболочки волокна, составляющее в диаметре 125 мкм; во-вторых, в области оптического контакта с волокном канала связи необходимо использовать канал утечки в виде волновода без оболочки удобной формы, переходящее в обычное цилиндрическое волокно.

Формирование устойчивого оптического контакта можно осуществить механическим (рис. 6А) или клеевым (рис. 6В) способами без изгиба волокна. Последний способ предпочтительнее, так как более устойчив к внешним воздействиям: границы оптического клея выполняют фокусирующие функции для туннелирующего в него света и защитные функ-

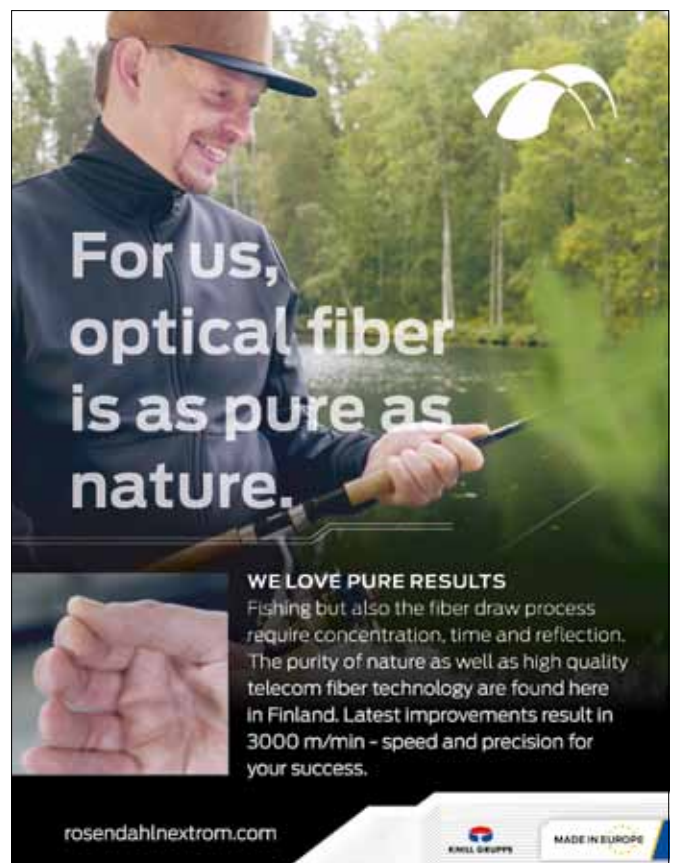
Then the transmission noise figure is

$$CNL_{leak} \approx F_T \approx 10 \text{ для } SNR_x = 8, \text{ i. e. } SNR_{leak} = 1.$$

This makes interception much more difficult, but the use of a less noisy receiver in comparison with a standard communication line receiver can achieve effective interception, i. e. with the probability of an erroneous bit appearing no larger than the standard communication channel.

### FEATURES OF TRAFFIC INTERCEPTION IN OPTICAL COMMUNICATION NETWORKS

Practical implementation of interception is possible when creating an effective and stable optical contact between the communication and leakage channels, which requires the fulfillment of certain conditions for access to the optical cable and technical solutions for forming a part of the optical radiation. Based on the qualitative analysis of the formation of an informative signal by the optical tunneling method, we can propose several structural schemes for the implementation of the leakage channel (Fig. 6). Despite the fact that the values of the transmission

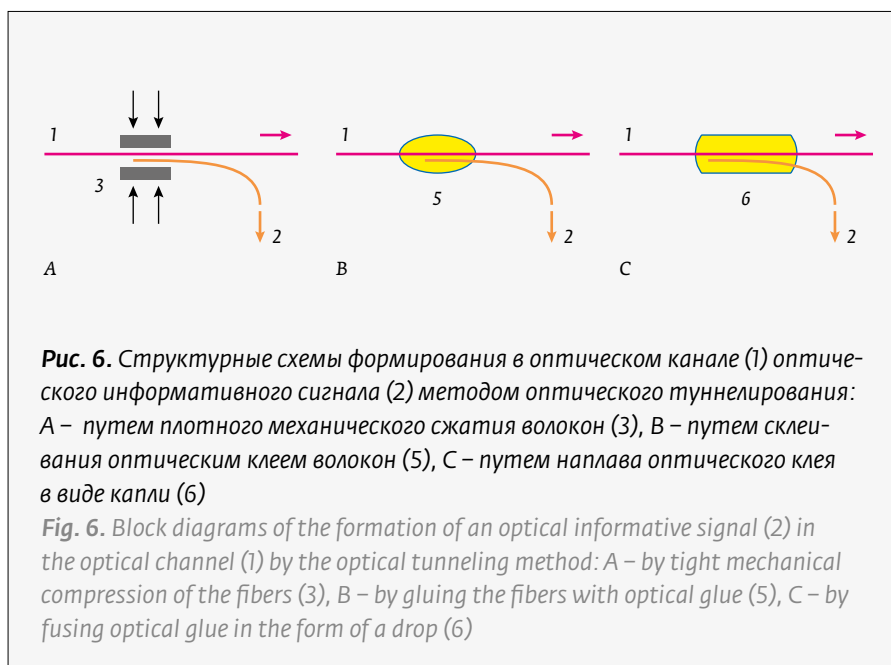


**For us, optical fiber is as pure as nature.**

**WE LOVE PURE RESULTS**  
Fishing but also the fiber draw process require concentration, time and reflection. The purity of nature as well as high quality telecom fiber technology are found here in Finland. Latest improvements result in 3000 m/min - speed and precision for your success.

rosendahlnextrom.com

KNILL GRUPP MADE IN EUROPE



ции от внешних воздействий, которые могут повлиять как на канал утечки, так и на канал связи. Дополнительное небольшое воздействие внешних физических полей на оптический контакт, в том числе и механическое воздействие (т. е. изгиб), может увеличить коэффициент передачи. Еще один способ (рис. 6С) связан с использованием оптического клея как второй оболочки вокруг первой оболочки оптического волокна канала связи, в которую туннелирует свет и фокусируется на вход волокна канала утечки с градиентной линзой на конце.

Предложенные схемы позволяют реализовать перехват в полевых условиях простейшими средствами технической разведки с минимальными затратами по времени. В частности, формирование контакта с применением оптического клея можно реализовать без полного разрушения защитных оболочек кабеля путем ввода клея и волокна канала утечки через малый прокол в кабеле полой цилиндрической трубкой наподобие иглы медицинского шприца.

Все это показывает высокий уровень угрозы данного сценария перехвата, противодействие которому требует разработки методов защиты кабельной системы, использования оптоволоконка высокого качества, непрерывного мониторинга состояния канала связи и других действий. В существующих условиях эксплуатации волоконно-оптических систем передачи информации основным способом предотвращения

coefficient should be small, but even in this case, it is difficult to realize the tunneling of light through the protective shells. Therefore, first, it is necessary to free the fiber from all protective cladding to the optical cladding of the fiber, which is 125  $\mu\text{m}$  in diameter; second, in the area of optical contact with the fiber of the communication channel, it is necessary to use a leakage channel in the form of a waveguide without a shell of a convenient shape, which turns into a conventional cylindrical fiber.

The formation of a stable optical contact can be done mechanically (Fig.6A) or adhesive (Fig.6B) without bending the fiber. The latter method is preferable, since

it is more resistant to external influences – the boundaries of the optical glue perform focusing functions for the light tunneling into it and protective functions against external influences that can affect both the leakage channel and the communication channel. An additional small effect of external physical fields on the optical contact, including mechanical impact (i. e., bending), can increase the transmission coefficient. Another method (Fig. 6C) involves the use of optical glue as a second cladding around the first cladding of the optical fiber of the communication channel, into which the light tunnels and focuses on the input of the leakage channel fiber with a gradient lens at the end.

The proposed schemes make it possible to implement interception in the field with the simplest means of technical reconnaissance with minimal time investment. In particular, the formation of contact with the use of optical glue can be realized without completely destroying the protective sheaths of the cable, by introducing the glue and the fiber of the leakage channel through a small puncture in the cable with a hollow cylindrical tube similar to the needle of a medical syringe.

All this shows a high level of threat of this interception scenario, the counteraction of which requires the development of methods for protecting the cable system, the use of high-quality optical fiber, continuous monitoring of the state of the communication channel and other actions. In the current operating conditions of fiber-optic information transmission systems, the main ways to pre-



перехвата является использование качественного оптического кабеля при качественном монтаже, которое позволяет уменьшить вероятность скрытного подключения.

## АВТОР

Гришачев Владимир Васильевич к. ф. - м. н., доц. Института информационных наук и технологий безопасности (ИИНИТБ), Российского Государственного гуманитарного университета (РГУ), email: grishachev@mail.ru, Москва, Россия.  
ORCID: 0000-0002-7585-7282

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фриман Р. Л. Волоконно-оптические системы связи / Пер. с англ. под ред. Н. Н. Слепова. – 4-е доп. изд. – М.: Техносфера. 2007. 511 с.
2. Шубин В. В. Информационная безопасность волоконно-оптических систем. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. – 257 с.
3. Гришачев В. В., Кабашкин В. Н., Фролов А. Д. Анализ каналов утечки информации в волоконно-оптических линиях связи: нарушение полного внутреннего отражения. Информационное противодействие угрозам терроризма. 2005; 4: 194–204.
4. Булавкин И. А. Вопросы информационной безопасности сетей PON. Технологии и средства связи. 2006; 2:104–108.
5. Глушенко А., Глушенко Л., Тупота В. Оценка защищенности информации, циркулирующей в ВОЛП. Фотоника. 2010; 4: 36–42.
6. Гришачев В. В. Анализ каналов утечки информации в волоконно-оптических линиях связи: паразитные электромагнитные излучения. Материалы XXIV науч.-практ. конф. «Комплексная защита информации». – Витебск: ВГТУ. 2019; 44–52.
7. Гришачев В. В. Перехвата трафика в оптических сетях: информативные паразитные электромагнитные излучения. Фотоника. 2019; 13(3): 280–294. DOI: 10.22184 / FROS.2019.13.3.280.294.
8. Гришачев В. В., Косенко О. А. Количественная оценка эффективности канала утечки информации по техническим параметрам каналов связи. Вопросы защиты информации. 2010; 4:9–17.
9. Гришачев В. В., Косенко О. А. Оценка коэффициента шума технического канала утечки информации. Вопросы защиты информации. 2011; 1: 29–36.
10. Гришачев В. В. Методика оценки параметров технического канала утечки информации. Вопросы защиты информации. 2012; 1:12–16.
11. Введение в интегральную оптику / Под ред. М. Барноски. – М.: Мир, 1977. 368 с.
12. Маркузе Д. Оптические волноводы. / Пер. с англ. – М.: Мир. 1974. 576 с.
13. Снайдер А. В., Лав Дж. Д. Теория оптических волноводов. – М.: Радио и связь. 1987. 656 с.

vent interception is the use of high-quality optical cable with high-quality installation, which reduces the likelihood of covert connection.

## AUTHOR

Grishachev Vladimir V., Cand of Science (Phys.-Math.), docent, associate professor Institute for Information Sciences and Security Technologies (IISS) Russian State University of the Humanities (RSUH), email: grishachev@mail.ru, Moscow, Russia.  
ORCID: 0000-0002-7585-7282

## REFERENCES

1. Freeman R. L. *Fiber-Optic Systems for Telecommunications*. – New York: Wiley-Interscience. 2002. 390 p.
2. Shubin V. V. *Informacionnaya bezopasnost' volokonno-opticheskikh sistem*. – Sarov: RFNC-VNIIEF, 2015. 257 p.
3. Grishachev V. V., Kabashkin V. N., Frolov A. D. Analiz kanalov utechki informacii v volokonno-opticheskikh liniyah svyazi: narushenie polnogo vnutrennego otrazheniya. *Informacionnoe protivodejstvie ugrozam terrorizma*. 2005; 4: 194–204.
4. Bulavkin I. A. Voprosy informacionnoj bezopasnosti setej PON. *Tekhnologii i sredstva svyazi*. 2006; 2:104–108.
5. Glushchenko A., Glushchenko L., Tupota V. Ocenka zashchishchennosti informacii, cirkuliruyushchej v VOLP. *Fotonika*. 2010; 4: 36–42.
6. Grishachev V. V. Analiz kanalov utechki informacii v volokonno-opticheskikh liniyah svyazi: parazitnye elektromagnitnye izlucheniya. *Materialy XXIV nauch.-prakt. konf. «Kompleksnaya zashchita informacii»*. – Vitebsk: VGTU. 2019; 44–52.
7. Grishachev V. V. Traffic Interception In Optical Network: Informative Parasitic Electromagnetic Radiation. *Photonics Russia (Fotonica)*. 2019; 13(3): 280–294. DOI: 10.22184 / FROS.2019.13.3.280.294.
8. Grishachev V. V., Kosenko O. A. Kolichestvennaya ocenka effektivnosti kanala utechki informacii po tekhnicheskim parametram kanalov svyazi. *Voprosy zashchity informacii*. 2010; 4: 9–17.
9. Grishachev V. V., Kosenko O. A. Ocenka koefficienta shuma tekhnicheskogo kanala utechki informacii. *Voprosy zashchity informacii*. 2011; 1: 29–36.
10. Grishachev V. V. Metodika ocenki parametrov tekhnicheskogo kanala utechki informacii. *Voprosy zashchity informacii*. 2012; 1:12–16.
11. *Introduction to integrated optics* / Edited by Michael K. Barnoski – New York: Plenum Press. 1974. 515 p.
12. Marcuse D. *Light Transmission Optics*. – New York: Van Nostrand Reinhold Co. 1972. 444 p.
13. Snyder Allan W., Love John D. *Optical Waveguide Theory*. – New York: Chapman and Hall. 1983. 734 p.

## X Международная конференция по фотонике и информационной оптике

Оргкомитет конференции объявляет, что 27–29 января 2021 года на базе НИЯУ «МИФИ» (Москва) пройдут заседания X конференции по фотонике и информационной оптике. Конференция является эффективной площадкой для обмена новыми идеями и методами, а также местом, где рождаются предложения о создании научных коллабораций. Организаторы конференции: РАН и НИЯУ «МИФИ». Председатели программ-

ного комитета конференции: академик РАН Гуляев Ю. В. (ИРЭ РАН) и д.ф.-м.н. Евтихий Н. Н. (НИЯУ МИФИ). Программа конференции охватывает направления: когерентной и нелинейной оптики, взаимодействия излучения с веществом, квантовой оптики, волоконной и интегральной оптики, элементной базы фотоники, голографии, оптических методов и оптико-электронных устройств обработки информации. Науч-



ный форум способствует повышению уровня знаний специалистов лазерной и фотонной отрасли. Языки конференции – русский, английский.

<http://fioconf.mephi.ru/>