



КАНАЛ УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ПАРАЗИТНЫХ НАВОДОК (МОДУЛЯЦИЙ) В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

*В. Гришачев, к. ф. – м. н.,
v.grishachev@gmail.com
Российский Государственный Геологоразведочный
Университет (МГРИ-РГГРУ),
Москва*

Оптические кабельные системы кроме функции транспорта информации могут применяться в качестве среды для распределенных измерений, что позволяет использовать их и в качестве канала утечки информации. Физические поля, которые формируют каналы утечки, являются носителями конфиденциальной информации. Они вызывают паразитные наводки (модуляции) световых потоков в оптическом волокне. Наиболее опасна – утечка речевой информации. На основе разъемного оптического соединения волокон показана опасность подслушивания переговоров методом оптической рефлектометрии паразитных акустооптических модуляций в оптическом кабеле, которые подтверждены экспериментальными исследованиями акустических наводок на распространение света через оптический SC-SC адаптер. Предложено строить защиту конфиденциальности на основе экранирования, фильтрации, зашумления и детектирования паразитных модуляций.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ДОМЕ И ОФИСЕ

Волоконно-оптические технологии окружают и сопровождают человека во многих областях его деятельности [1, 2]. Использование оптического кабеля как транспортной среды в различных системах связи – от телекоммуникаций до абонентского доступа – одна из наиболее успешных. Такие технологии, как пассивные оптические сети (passive optical network, PON), оптические структурированные кабельные системы (structured cabling systems, SCS)

LEAKAGE OF CHANNEL INFORMATION BASED ON THE SPURIOUS CROSSTALK (MODULATION) IN AN OPTICAL FIBER

*V. Grishachev, Ph.D.,
v.grishachev@gmail.com or grishachev@mail.ru
Russian State Geological Prospecting University
(RSGPU), Moscow*

Optic cable systems, in addition to function of transport information, can be used for distributed measurements allowing their use to create information leakage channel. Leak channel is formed by physical fields that carry confidential information and causing spurious crosstalk (modulation) light beams in an optical fiber. Greatest danger is leaked speech information. Based on the split optical fiber connections is shown danger eavesdropping talks by optical reflectometry of spurious acoustooptical modulations in the optic cable. Which have been confirmed by experimental studies of acoustic crosstalk on the light propagation through optical SC-SC adapter. Protection is proposed to build on the basis of screening, filtering, noise and detection spurious modulation.

FIBER OPTICAL TECHNOLOGIES IN HOUSE AND OFFICE

Currently, fiber optical technologies have widespread application in many areas of human activities [1, 2]. One of the most effective applications consists in the use of optical cable as the transport medium in many communication systems from telecommunications to subscriber access. Such technologies as passive optical networks (PON), optical structured cabling systems (SCS) make it possible to implement many broadband services, for example, service for the cable transmission of audio, video and data to subscriber – Triple Play; network convergence.

Other type of application is connected with fiber-optic sensors (FOS) and distributed measuring networks which are used in the



позволяют реализовать многие широкополосные услуги, например, услугу по передаче абоненту по одному кабелю аудио, видео и данных – Triple Play; построение конвергентных сетей (network convergence).

Другое применение связывается с волоконно-оптическими датчиками (fiber optic sensor, FOS) и распределенными измерительными сетями (технологический мониторинг состояния зданий, сооружений, экологический мониторинг природных и искусственных объектов). С измерительными и транспортными возможностями волоконной оптики связывают ее внедрение в системы безопасности и защиты. К ним относятся волоконно-оптические системы охраны объектов, системы видеонаблюдения и другие.

В последнее время разрабатываются волоконно-оптические удлинители интерфейсов периферийных устройств информационных систем, которые позволяют без промежуточных активных элементов передавать информацию на значительные расстояния с высокими скоростями. Например, применение оптического кабеля позволило создать соединение стандарта USB 3.0 Active Optical Cable (VIA Labs, Inc.) со скоростями 5 Gbps на расстояние 100 м. Аналогичное решение с собственным интерфейсом Thunderbolt (Intel, Corp.) имеет практическую реализацию как с оптическим, так и с медным кабелем. В данных удлинителях интерфейса трансиверы встроены в разъемы (штекеры) оптического кабеля. По подобной схеме создаются волоконно-оптические удлинители и конвертеры различных интерфейсов периферийных устройств, такие как USB, FireWire, Ethernet, HDMI, DVI, RS-232 и другие.

Столь широкое распространение волоконно-оптических технологий связано с преимуществами волоконно-оптической транспортной среды по сравнению с медной для передачи информации. Среда оптического транспорта – диэлектрик (плавленый кварц, стёкла, оптические пластмассы), но, главным образом, в оптическом кабеле используется плавленый кварц физические свойства которого и определяют его преимущества. С одной стороны, – это высокая механическая прочность, долговечность, невосприимчивость к электромагнитным полям, малое поглощение света. С другой, – технологии инсталляции и эксплуатации во многом повторяют возможности медного

technological monitoring of condition of buildings, structures and ecological monitoring of natural and artificial objects. Implementations in the area of security and protection are connected with the measuring and transport capabilities of fiber optics. They include fiber optical systems of site protection and use of fiber optical communication links in observation systems etc.

In the present time, the fiber optical extenders of peripheral interfaces of information systems which allow transferring information to significant distances with high speed without intermediate active elements are being developed. For example, application of optical cable allowed designing of the standard connection USB 3.0 Active Optical Cable (VIA Labs, Inc.) with the speed of 5 Gbps to the distance of 100 m. Analogous solution with its own interface Thunderbolt (Intel, Corp.) has the practical implementation with the optical cable and copper cable as well. According to the similar scheme, the fiber optical extenders and converters of different peripheral interfaces, such as USB, FireWire, Ethernet, HDMI, DVI, RS-232 etc., are created.

Such widespread occurrence of fiber optical technologies is connected with the advantages of fiber optical transport medium in comparison with the copper medium for the information transmission. Medium of optical transport is represented by dielectric (fused quartz, glasses, optical plastics) but the fused quartz, which physical properties determine its advantages, is mainly used in the optical cable. On one hand, its great mechanical strength, durability, nonsusceptibility to electromagnetic fields, and low light absorption refer to its advantages. On the other hand, installation and operation technologies repeat the capabilities of copper cable in many aspects. As a result, communication systems received the new transport medium with unique properties and standard installation.

Thus, fiber optical technologies for information transmission and measurements have widespread application in many areas and replace copper cable systems improving the main characteristics. However, new technologies generate problems for the provision of information security which are connected with the newness of transport system and low exploration degree of physical principles of the formation of information leakage channels.



кабеля. В результате системы связи получили новую транспортную среду с уникальными свойствами и со стандартным монтажом.

Благодаря своим свойствам волоконно-оптические технологии передачи информации и измерений постоянно расширяют свои применения во многих областях и замещают медные кабельные системы, удовлетворяя более высокие требования. Однако новые технологии создают проблемы для обеспечения информационной безопасности. Они связаны с новизной транспортной системы и соответственно отсутствием исследований физических принципов формирования каналов утечки информации. Основное внимание служб безопасности обращается на защиту трафика в волоконно-оптических телекоммуникациях, перехват которого может принести максимальный вред. Но кроме угроз трафику оптические кабельные системы офиса и дома несут опасность конфиденциальности информации внутри объектов. Причина – измерительные возможности оптического кабеля. Настоящая работа посвящена обоснованию подобных угроз.

УТЕЧКА ИНФОРМАЦИИ ЧЕРЕЗ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ КОММУНИКАЦИИ

Измерительные возможности волоконной оптики

Проникновение волоконно-оптических технологий в офис и дом приводит к тому, что оптический кабель и волокно размещаются вблизи человека, работающего оборудования, внутренней среды офиса, которые генерируют физические поля, оказывающие влияние на прохождение света в волокне. У злоумышленника появляется возможность регистрировать подобные паразитные наводки от окружающих физических полей и, анализируя их, получить доступ к циркулирующей на объекте конфиденциальной информации. Обобщенную схему канала утечки информации можно представить в следующем виде (рис.1): физическое поле как носитель информации воздействует на световые потоки в волокне, вызывает модуляцию светового потока на частотах поля, в результате чего нарушитель получает доступ к конфиденциальной информации, используя зондирующие излучения в оптическом волокне. Канал утечки информации может быть реализован по оптической схеме на прохождение

Security services are mainly focused on the traffic protection in fiber optical telecommunications, interception of which can cause the maximum damage. But besides the traffic threat, the optical cable systems for office and house have the danger of information confidentiality inside sites due to the measuring capabilities of optical cable. This paper is devoted to the explanation of similar threats.

INFORMATION LEAKAGE THROUGH FIBER OPTICAL COMMUNICATIONS Measuring Capabilities of Fiber Optics

Infiltration of fiber optical technologies into the office and house results in the fact that optical cable and fiber are located near human being, operating equipment, office internal environment which generate the physical fields influencing on the light passage in fiber. Intruder has the opportunity to register similar spurious crosstalk from the surrounding physical fields and analyzing them receive the access to the confidential information circulating at the site. Generalized scheme of information leakage channel can be shown in the following form (Fig. 1): physical field as the information carrier affects the light flux in fiber, causes the modulation of light flux at field frequencies and as a result the intruder receives access to the confidential information using the probing radiation in optical fiber. Information leakage channel can be implemented according to the optical scheme for the passage or reflection of light from the inhomogeneity point and for the implementation intruder can use his/her own probing radiation and light flux of legal information signal.

External physical fields form the spurious crosstalk in fiber and cause the modulation of light wave parameters. Modulation type and depth determine the efficiency of information leakage channel. Amplitude, phase, frequency and polarization modulation can occur in fiber and its depth depends on the parameters of probing radiation such as intensity, spectral composition, polarization, degree of monochromaticity and coherence. The light phase, variation of which is registered on the basis of interference methods with the accuracy of more than 1 ppm (10^{-6}), has the highest sensitivity to the external influence and it allows measuring the mechanical effects on fiber and acoustic fields near it. Polarization modulations are mainly connected

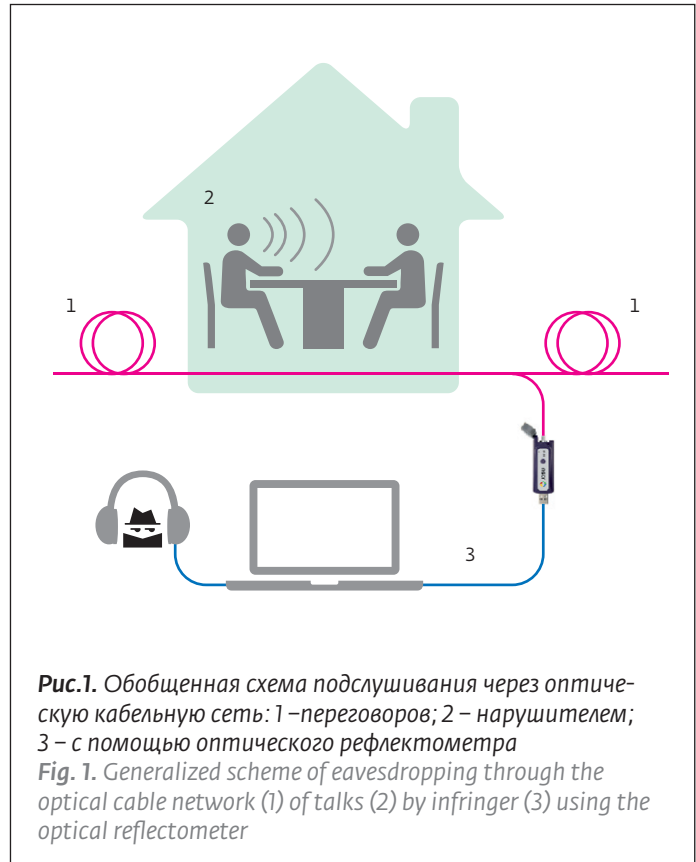
или на отражение света от места неоднородности. Также для реализации нарушитель может использовать как собственные зондирующие излучения, так и световые потоки легального информационного сигнала.

Внешние физические поля формируют паразитные наводки в волокне и приводят к модуляции параметров световой волны. Вид модуляции и ее глубина определяют эффективность канала утечки информации. В волокне возможна амплитудная, фазовая, частотная и поляризационная модуляция. Глубина модуляции зависит от параметров зондирующего излучения – интенсивности, спектрального состава, поляризации, степени монохроматичности и когерентности. Наибольшей чувствительностью к внешним воздействиям обладает фаза света, изменение которой регистрируется интерференционными методами с точностью более 1 ppm (10^{-6}). Это позволяет измерять механические воздействия на волокно и на акустические поля вблизи него. В основном поляризационные модуляции связаны с воздействием окружающих электромагнитных полей, а изменения спектра – с нелинейным рассеянием, которое зависит от температуры.

Таким образом, любое внешнее воздействие на волокно или окружающие его физические поля оказывают паразитное влияние на процесс распространения света, которое может быть детектировано специальными техническими средствами. Сложность регистрации паразитных наводок компенсируется ценностью получаемой конфиденциальной информации.

Оптическая рефлектометрия в сборе информации (рис.1)

Одним из основных способов регистрации паразитных наводок являются методы оптической рефлектометрии (Optical Time Domain Reflectometry, OTDR), они широко используются как в измерительной технике, так и в системах мониторинга волоконно-оптических линий связи [3]. Суть метода состоит в зондировании волокна импульсным или непрерывным оптическим излучением и регистрации обратного излучения. Обратное излучение появляется в результате взаимодействия зондирующего излучения с оптическими неоднородностями и дефектами оптического волокна. Оно направлено в противоположную (обратно) относительно зондирующего



with the action of surrounding electromagnetic fields and spectrum variations are connected with nonlinear scattering which depends on temperature.

Thus, any external effect on fiber and surrounding physical fields have the spurious influence on the process of light propagation which can be detected by the special technical devices. Difficulty of spurious crosstalk registration is compensated by the importance of received confidential information.

Optical Reflectometry in Information Accumulation (Fig. 1)

Methods of optical reflectometry (Optical Time Domain Reflectometry, OTDR), which are widely used in measuring technology and monitoring systems of fiber optical communication links, refer to the main methods of spurious crosstalk registration [3]. This method consists in the fiber probing by pulse or continuous optical radiation and registration of backscattered radiation or radiation generated as a result of the interaction of probing radiation with optical inhomogeneities, defects of optical fiber and directed to the opposite way (backward) relative



излучения сторону и связано с явлениями рассеяния, отражения и генерации (переизлучения) света. Оптическая схема на отражение позволяет по времени задержки τ обратного излучения (отклика) определять расположение исследуемого участка оптического кабеля. Это имеет важное значение для формирования канала утечки информации. Расстояние по кабелю до места наблюдения рассчитывается как

$$L = \tau \cdot c / 2n,$$

где c – скорость света в вакууме, n – показатель преломления волокна. Обратное излучение несет информацию о состоянии исследуемого участка кабеля, который подвергается паразитным наводкам со стороны окружающих физических полей и воздействий.

В измерительной технике для подобного зондирования используют излучение различного спектрального состава, когерентности, поляризации. Подбор параметров зондирующего излучения и методов регистрации позволяет получить достоверную информацию о состоянии самого волокна и процессах в окружающей его среде. В частности, временная рефлектометрия используется для контроля таких параметров оптической сети, как потери, наличие дефектов; бриллюэновские рефлектометры (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer, BOTDR) на основе спонтанного и вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна позволяют фиксировать распределение натяжений и распределение температур по длине оптического кабеля; когерентная оптическая рефлектометрия (Coherent Optical Time Domain Reflectometer, COTDR) применяется в системах виброакустического контроля.

Утечка информации из-за неоднородностей волоконно-оптической сети

Эффективность методов оптической рефлектометрии значительно повышается при формировании обратного излучения в кабеле от оптических неоднородностей, дефектов. То есть участки волокна с локальным изменением показателя преломления, коэффициентов поглощения и рассеяния, по размерам сравнимые с длиной волны зондирующего излучения, являются источником формирования каналов утечки. Наличие оптической

to the probing radiation, which is connected with the phenomena of light scattering, reflection and generation (reradiation). Optical scheme for reflection allows determining the location of studied section of optical cable by the delay time of backscattered radiation (response) τ , and this fact is very important for the formation of information leakage channel. Cable distance to the observation point is calculated as follows:

$$L = \tau \cdot c / 2n,$$

where c is the light speed in vacuum, n is the index of fiber refraction. Backscattered radiation carries the information on the condition of studied cable section which is subjected to the spurious crosstalk by surrounding physical fields and effects.

In the measurement technology, the radiation with various spectral composition, coherence and polarization is used for probing. Selection of the parameters of probing radiation and registration methods allows receiving the information on fiber condition and processes in fiber-surrounding medium. In particular, the time reflectometry is used for the control of such parameters of optical network as loss, defects etc.; Brillouin reflectometers (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer, BOTDR) based on spontaneous and stimulated Mandelstam-Brillouin scattering make it possible to register the tension distribution and temperature distribution along the optical cable; coherent optical reflectometry (Coherent Optical Time Domain Reflectometer, COTDR) is applied in the systems of vibration-acoustic control.

Inhomogeneities of Fiber Optical Network in Information Leakage

Efficiency of optical reflectometry methods is considerably improved with the formation of backscattered radiation in cable from the optical inhomogeneities, defects or fiber sections with the local variation of refraction index, coefficients of absorption and scattering which can be compared with the probing radiation wavelength by their values. Availability of optical inhomogeneity results in the growth of backscattered radiation power and increases the fiber sensitivity to external effects and physical fields. The special sections with hypersensitivity are formed in fiber optical measuring systems, for example, on the basis of fiber Bragg grating



неоднородности приводит к увеличению мощности обратного излучения и повышает чувствительность волокна к внешним воздействиям и физическим полям. В волоконно-оптических измерительных системах формируют специальные участки с повышенной чувствительностью, например на основе волоконных решеток Брэгга (Fiber Bragg grating, FBG). Известно, что такие элементы повышают чувствительность высокоточных волоконных измерителей деформаций, температуры, в некоторых других случаях применяются оптические волокна с повышенной чувствительностью к электромагнитным полям (оптические волокна с большим значением постоянной Верде, Керра, Погкельса - Verdet, Kerr, Pockels constant) и так далее. Подобные структуры возможно создать и в обычных оптических структурированных кабельных системах, правда со значительно меньшей чувствительностью к внешним полям. В принципе, любая неоднородность ведет к росту влияния внешних воздействий на параметры световых потоков в волокне - это может быть использовано для формирования канала утечки побочной

(FBG) which allows measuring the deformations, temperature with high accuracy, in other cases optical fibers with hypersensitivity to electromagnetic fields (optical fibers with large value of Verdet, Kerr, Pockels constants) are used etc. Similar structures can be created in the regular optical structured cable systems but with considerably lower sensitivity to the external fields. Generally, any inhomogeneity causes the growth of influence of external effects on the parameters of light flux in fiber and this fact can be used for the formation of side information leakage channel. Increase of probing radiation power causes the growth of backscattered radiation which makes it possible to measure more distant cable sections with lower requirements to the registration equipment.

Topology and Infrastructure of Fiber Optical Communications in Information Leakage Channel

Cable location in building, office and use of infrastructure elements for installation have great impact on the efficiency of fiber optical cable as distributed measurement system. If cable

информации. Повышение мощности зондирующего излучения вызывает рост обратного излучения, то есть создает условия для измерения более удаленных участков кабеля с пониженными требованиями к регистрирующей аппаратуре.

Топология и инфраструктура волоконно-оптических коммуникаций в канале утечки информации

На эффективность работы волоконно-оптической кабеля как распределенной измерительной системы большое влияние оказывает размещение кабеля в здании, офисе, а также использование инфраструктурных элементов для его монтажа. Если кабель одной из подсистем монтируется рядом с источниками побочных полей, формирующих информативные сигналы, то необходимо учитывать возможность паразитных наводок на световые потоки в кабеле. Нежелательные модуляции могут значительно усилиться при использовании коммутационных боксов, кабельных коробов без экранирования от внешних физических полей. Например, акустические поля могут резонировать с конструктивными элементами кабельной системы, тем самым увеличивая акустический контакт внешнего поля с волокном. Аналогичные явления возникают при воздействии электромагнитных, тепловых и других внешних полей. Размещение кабеля внутри коробов, их конструкция и расположение в здании имеет большое значение для нежелательных паразитных наводок на оптическое волокно.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В КАНАЛЕ УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ

Классификация оптических неоднородностей (дефектов)

Роль оптических неоднородностей в формировании каналов утечки конфиденциальной информации путем нежелательных, паразитных наводок в волокне может быть очень высокой, в связи с чем необходимо провести анализ типов неоднородностей, их характеристик. Все неоднородности можно разделить на три группы.

Внутренние оптические неоднородности (рис.2) оптического волокна, связанные с существующими дефектами, допущенными при производстве волокна и кабеля, при монтаже

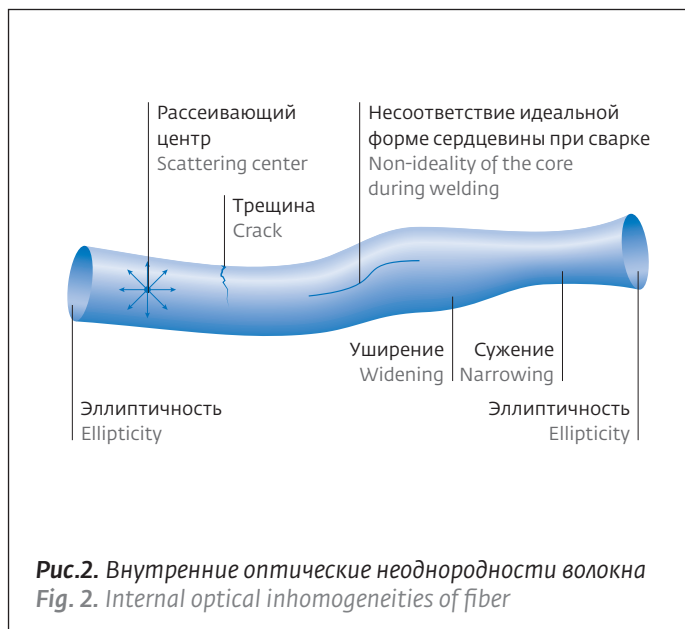


Рис.2. Внутренние оптические неоднородности волокна
Fig. 2. Internal optical inhomogeneities of fiber

of one subsystem is installed near the sources of side fields forming the informative signals, it is necessary to take into account the potential of spurious crosstalk on light flux in cable. Undesirable modulations can be considerably intensified with the use of breakout boxes, cable trunks without screening from external physical fields. For example, acoustic fields can resonate with the structural elements of cable system increasing the acoustic contact of external field with fiber. Analogous phenomena occur upon the action of electromagnetic, thermal and other external fields. Cable placement inside the boxes, their structure and location in building have great impact for undesirable spurious crosstalk on optical fiber.

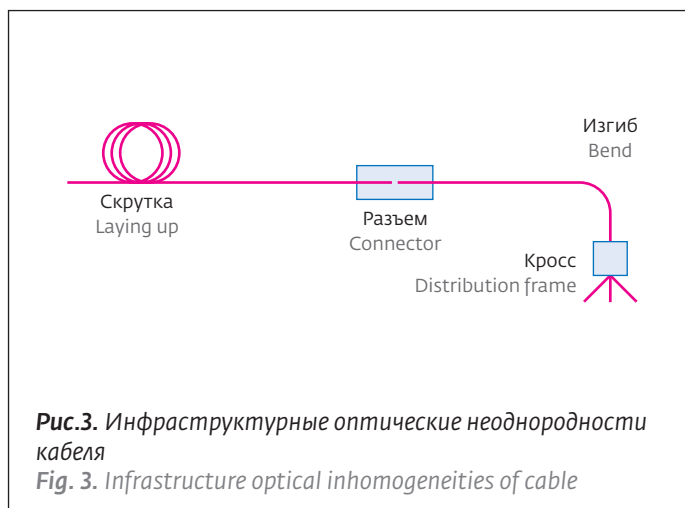


Рис.3. Инфраструктурные оптические неоднородности кабеля
Fig. 3. Infrastructure optical inhomogeneities of cable



кабельной инфраструктуры и последующей эксплуатации. К ним относятся внутренние дефекты в виде локальных рассеивающих центров, внутренних трещин, внутренних напряжений, неидеальность формы волокна и т.д. Отличительной особенностью данного типа неоднородностей является их зависимость от качества используемого кабеля, качества монтажа и эксплуатации.

Инфраструктурные оптические неоднородности и дефекты (рис.3) связаны с выбором топологии и конструкцией кабельной системы. К ним относятся коммутационные узлы, разъемные и сварные соединения, угловые изгибы и скрутки кабеля, монтажные крепления кабеля и кабельных коробов и т.д. Каждый из элементов характеризуется собственным обратным излучением и потерями на прохождение света, которые существенно зависят от используемых технологий изготовления и установки, размещения, монтажа кабеля.

Индукцированные оптические неоднородности и дефекты (рис.4) вызваны непостоянными внешними воздействиями и полями, которые имеют естественное или искусственное

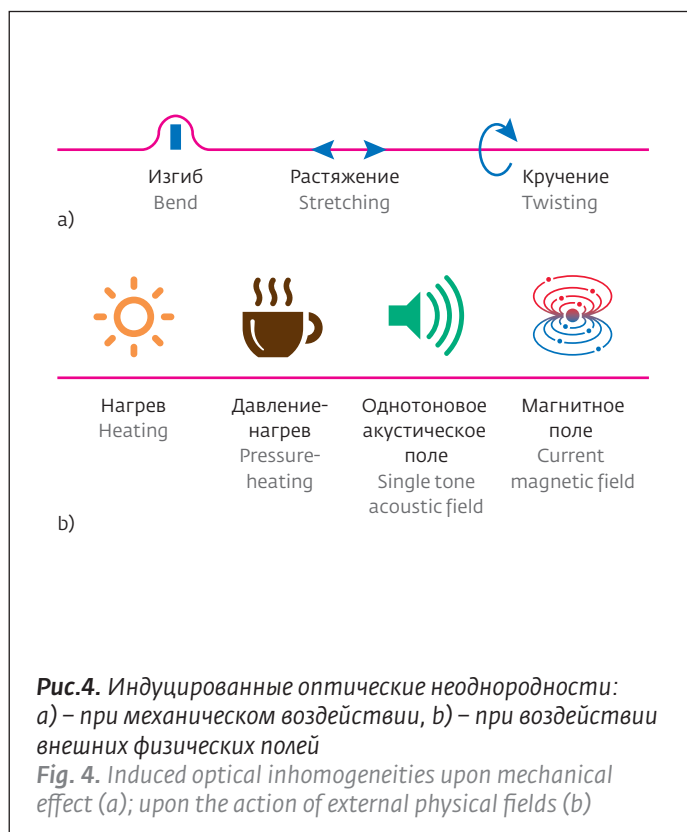
CHARACTERISTIC OF OPTICAL INHOMOGENEITIES IN INFORMATION LEAKAGE CHANNEL

Classification of Optical Inhomogeneities (Defects)

Role of optical inhomogeneities in the formation of confidential information leakage channels via undesirable, spurious crosstalk in fiber can be very significant and therefore it is necessary to analyze the types of inhomogeneities and their characteristics. All inhomogeneities can be divided into three groups.

Internal optical inhomogeneities (Fig.2) of optical fiber are connected with the existing defects formed during the production of fiber and cable, installation of cable infrastructure and following operation. Internal defects in the form of local scattering centers, internal cracks, internal stresses, nonideality of fiber shape etc. Distinctive feature of this type of inhomogeneity is its dependence on the quality of used cable, quality of installation and operation.

Infrastructure optical inhomogeneities and defects (Fig.3) are connected with the selection of



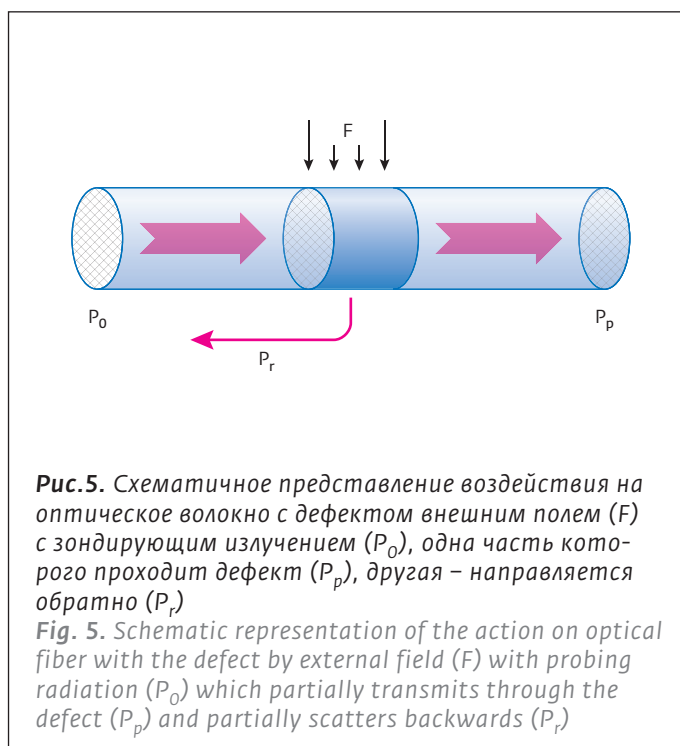
происхождение. Их можно разделить на два вида – механические воздействия на оптический кабель и воздействие внешних физических полей. К первым относятся различные изгибы, растяжения-сжатия, скручивание. Таким воздействиям может быть подвержен кабель с целью повышения чувствительности к внешним информативным полям. Ко вторым относятся акустические поля, постоянные электромагнитные поля, тепловое воздействие, радиация и др. Надо отметить, что одновременное действие двух полей, одно из которых несет информативный сигнал, создает ситуацию, когда первое воздействие инициирует рост обратного излучения, а второе – его модулирует. Оба поля могут иметь одну природу, но быть разделенными по какому-либо параметру, например частоте. Это позволяет разделить два воздействия и выделить информативный сигнал из общего сигнала утечки.

Параметры неоднородностей и физического поля в канале утечки информации

Сигнал утечки информации в канале утечки формируется физическим полем и воздействием, которое является информативным (рис.5). Физическое

topology and structure of cable system. Switching nodes, releasable and welded connections, cable bending and laying up, installation fastening of cable and cable trunks etc. refer to this category. Each element is characterized by its own backscattered radiation and loss of light propagation which considerably depend on used fabrication methods and methods of cable installation, allocation, mounting.

Induced optical inhomogeneities and defects (Fig.4) are caused by inconstant external effects and fields which have natural or artificial origin. They can be divided into two types: mechanical effects on optical cable and effect of external physical fields. The first type includes different bends, stretching-compression, kink, to which the cable can be subjected for the purposes of improvement of sensitivity to external informative fields. The second type includes acoustic fields, constant electromagnetic fields, thermal effect, radiation etc. It should be noted that simultaneous action of two fields, one of which carries the informative signal, creates the situation when the first effect initiates the growth of backscattered radiation and the second one modulates it. Both fields can have the same character but be divided by any parameter, for example, frequency. It allows dividing two effects and extracting the informative signal from the common leakage signal.





поле характеризуется некоторым силовым параметром G , имеющим постоянную составляющую $G_0 = \langle G \rangle$ и переменную составляющую δG , такую, что $\langle \delta G \rangle = 0$. Таким образом, физическое поле можно представить в виде $G = G_0 + \delta G$, которое содержит информативный сигнал с глубиной модуляции

$$g = \delta G / G_0.$$

Характерный размер однородности поля обозначим через Λ .

Геометрические параметры оптической неоднородности в волокне описываются характерным размером l и длиной волокна в нем L . Соотношение между ними: $l \leq L$. Например, длина скрученного волокна много меньше его диаметра. Важное значение имеет соотношение между характерными размерами неоднородности волокна и однородности поля: $l \leq \Lambda$, в этом случае можно считать, что весь дефект находится под однородным воздействием физического поля и пренебречь интерференционными процессами между различными частями волокна.

Оптические характеристики неоднородности волокна проявляются в уменьшении мощности

Parameters of Inhomogeneities and Physical Field in Information Leakage Channel

Information leakage signal in leakage channel is formed by the physical field and effect, which is informative (Fig. 5). The physical field is characterized by some force parameter G which has the constant component $G_0 = \langle G \rangle$ and variable component δG , that $\langle \delta G \rangle = 0$. Thus, the physical field can be represented in the form $G = G_0 + \delta G$ which contains the informative signal with the modulation depth

$$g = \delta G / G_0.$$

The typical dimensions of field inhomogeneity can be designated through Λ .

Geometrics of optical inhomogeneity in fiber are described by the typical dimensions l and fiber length in it L . Ratio between them: $l \leq L$. For example, the length of twisted fiber is much lower than its diameter. Ratio between the typical dimensions of fiber inhomogeneity and field homogeneity is very important: $l \leq \Lambda$, in this case it can be considered that the defect is located



проходящего излучения и формировании обратного излучения, которые даются коэффициентом потерь

$$\beta_p = P_p / P_0$$

и коэффициентом обратного излучения

$$\beta_r = P_r / P_0.$$

Здесь, P_0 - мощность зондирующего излучения, P_p - мощность излучения, прошедшего неоднородность, P_r - излучение рассеянное/отраженное/переизлученное в направлении, обратном зондирующему. Из общих представлений понятно, что полные потери включают потери на формирование обратного излучения, так что $\beta_p (\beta_r) > \beta_r$. В случае малых вариаций потерь можно утверждать, что

$$\delta\beta_p \sim \delta\beta_r.$$

Это важный вывод, так как в некоторых случаях позволяет провести замену анализа обратных излучений анализом мощности потерь, а это значительно упрощает процедуру вычисления.

Внешнее переменное воздействие физического поля δG с глубиной модуляции g вызывает изменение мощности обратного излучения δP_r с глубиной модуляции

$$m = \delta P_r / P_r = \delta\beta_r / \beta_r.$$

Таким образом, оптическая неоднородность может характеризоваться абсолютной чувствительностью ($\delta P_r / \delta G$) или нормированной чувствительностью

$$\eta = m / g.$$

Мощность обратного излучения является сигналом утечки информации, так как оно переносит конфиденциальную информацию о процессах вблизи от оптического кабеля. Абсолютное значение модулированной части обратного излучения, исходя из введенных определений, выражается формулой

$$\delta P_r = (P_0 \cdot \beta_r \cdot \eta) \cdot g.$$

Видно, что мощность сигнала утечки определяется мощностью зондирующего сигнала. Справедливо также утверждение, что возвращающаяся часть излучения полностью зависит от свойств оптической неоднородности. В некоторых случаях эта зависимость становится нелинейной, например для бриллюэновской

under the homogeneous effect of physical field and the interference processes between various fiber parts can be neglected.

Optical characteristics of fiber inhomogeneity are shown in the decrease of propagating radiation power and formation of backscattered radiation which can be obtained through the loss factor

$$\beta_p = P_p / P_0$$

and coefficient of backscattered radiation

$$\beta_r = P_r / P_0.$$

Here, P_0 is the probing radiation power, P_p is the power of radiation which passed inhomogeneity, P_r is the radiation scattered/reflected/ reradiated in the direction which is reverse to the probing one. It is understandable from the general concepts that overall loss includes the loss connected with the formation of backscattered radiation, so $\beta_p (\beta_r) > \beta_r$. In case of small variation of loss it can be stated that

$$\delta\beta_p \sim \delta\beta_r.$$

This is important conclusion because in some cases it can replace the analysis of backscattered radiations by the analysis of loss power and it can considerably simplify the calculations.

External variable effect of physical field δG with the modulation depth g causes the variation of backscattered radiation power δP_r with the modulation depth

$$m = \delta P_r / P_r = \delta\beta_r / \beta_r.$$

Thus, the optical inhomogeneity can be characterized by the absolute sensitivity ($\delta P_r / \delta G$) or standardized sensitivity

$$\eta = m / g.$$

Power of backscattered radiation is the information leakage signal because it carries the confidential information on the processes near the optical cable. The absolute value of modulated part of backscattered radiation proceeding from the introduced definitions is expressed by the formula

$$\delta P_r = (P_0 \cdot \beta_r \cdot \eta) \cdot g.$$



рефлектометрии, но в любом случае – это основной параметр для формирования сигнала утечки. В формуле второй множитель определяется свойствами дефекта, а третий зависит от модуляционных параметров исследуемого участка кабеля, его чувствительности к внешнему полю. Их значение может быть увеличено путем дополнительного воздействия или подбором параметров зондирующего излучения, наиболее чувствительного к данному типу наводки.

Аналогично можно ввести глубину модуляции потерь прошедшего излучения:

$$\tilde{m} = \delta P_p / P_p = \delta \beta_p / \beta_p,$$

которая, в общем случае, будет пропорциональна глубине модуляции обратного излучения m .

Продолжение следует...

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фриман Р.** Волоконно-оптические системы связи. – М.: Техносфера, 2003.
2. Волоконно-оптические датчики/Под ред. Э.Удда – М.: Техносфера, 2008.
3. **Листвин А.В., Листвин В.Н.** Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРпт, 2005.

Obtained expression shows that the leakage signal power is determined by the power of probing signal. And the statement concerning the complete dependence of backscattered radiation part on optical inhomogeneity properties is valid. In some cases this dependence becomes nonlinear, for example, for Brillouin reflectometry but in any event this is the main parameter for the leakage signal formation. In the formula, the second factor is determined by the defect properties and the third one depends on the modulation parameters of studied cable section, its sensitivity to the external field. Their value can be increased through the additional effect or selection of the parameters of probing radiation which is the most sensitive to this type of crosstalk.

In analogous manner, the modulation depth of passing radiation loss can be introduced

$$\tilde{m} = \delta P_p / P_p = \delta \beta_p / \beta_p.$$

which in general case will be proportional to the depth of backscattered radiation modulation m .

To be continued...