

ВОПРОСЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

4
(123)

Москва
2018

Основан
в 1974 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Инженерная криптография

- Шакурский М. В.* Свойства инвариантных двухкомпонентных стеганографических систем, использующих аддитивный алгоритм связи встраиваемых сигналов..... 3
- Ложников П. С.* О возможности обеспечения равной защиты документов на бумажном и электронном носителе биометрическими и криптографическими методами (*Обзор*) 10
- Жиленков А. А.* Анализ уязвимостей систем защиты информации, построенных на базе цифровых генераторов хаотического сигнала 20

Управление доступом

- Жумажанова С. С., Лукин Д. В., Белгородцев А. А.* Разработка методики выделения участков лица и шеи на термограммах и изображениях в видимом спектре для последующего анализа в целях выявления психофизиологического состояния субъекта (*Обзор*) 24
- Сулаво А. Е., Куприк А. И., Старков М. А., Стадников Д. Г.* Анализ методов распознавания образов человека по особенностям электроэнцефалограмм (*Обзор*) 36

Доверенная среда

- Гришачев В. В., Казарин О. В., Калинина Ю. Д.* Паразитные акустические модуляции световых потоков в разъёмных соединениях оптической сети объекта информатизации 47

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИИ И ОБЪЕКТОВ

- Скворцов В. Э., Василец В. И.* Технология управления процессами обеспечения безопасности информации промышленного объекта ... 57
- Гончаренко Г. Ю., Ермаков И. К., Ермолатий Д. А., Пителинский К. В.* Компьютерная психология или универсальный подход к уязвимостям конфиденциальной информации 62
- Кузнецов А. В.* Применение алгоритма комбинированной обработки потоков информации о событиях безопасности в автоматизированных системах специального назначения 69
- Потехецкий С. В., Кангер И. В.* Определение актуальных угроз безопасности информации для автоматизированных систем, обрабатывающих коммерческую тайну 74
- Рекунов И. С., Макаренко Ю. О., Гаврилов С. Н., Галушкин И. Б.* Разведдостоупность объектов защиты техническими средствами разведки при обеспечении защиты конфиденциальной информации 78
- Тараскин М. М., Зайцев Е. В.* Исследование способа воздействия систем радиосвязи на систему радиомониторинга (*Обзор*) 82

Главный редактор *В. Г. Матюхин,*

д-р техн. наук, первый заместитель генерального директора, научный руководитель ОАО "НИИАС"

Заместитель главного редактора *В. А. Коняевский,*

д-р техн. наук, акад. РАЕН, зав. кафедрой МФТИ

Ответственный секретарь *К. В. Трыкина,*

начальник отдела научных и информационных изданий ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

Редакционная коллегия:

М. М. Грунтович, канд. физ.-мат. наук, доц., руководитель обособленного подразделения ОКБ САПР; *С. В. Дворянкин,* д-р техн. наук, проф., акад. РАЕН, профессор кафедры Финансового университета; *С. М. Климов* д-р тех наук, проф., начальник управления 4 ЦНИИ МО; *В. П. Лось,* д-р воен. наук, проф., зав. кафедрой МТУ; *И. Г. Назаров,* канд. техн. наук, генеральный директор ОКБ САПР; *С. П. Панасенко,* канд. техн. наук, зам. генерального директора по науке и системной интеграции ООО Фирмы "АНКАД"; *Г. В. Росс,* д-р техн. наук, д-р эконом. наук, проф., профессор кафедры МТУ; *В. Ю. Скиба,* д-р тех наук, первый зам. начальника Главного управления информационных технологий ФТС России; *А. А. Стрельцов,* д-р техн. наук, д-р юр. наук, проф., зам. директора Института проблем информационной безопасности МГУ им. М. В. Ломоносова; *А. Ю. Стусенко,* канд. юр. наук, зам. директора по безопасности, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»; *А. М. Сычёв,* канд. техн. наук, доц., зам. начальника Главного управления безопасности и защиты информации ЦБ РФ; *Ю. С. Харин,* д-р физ.-мат. наук, чл.-кор. НАН Беларуси, директор НИИ прикладных проблем математики и информатики БГУ; *И. Б. Шубинский,* д-р техн. наук, проф., генеральный директор ЗАО "ИБТранс", советник генерального директора ОАО "НИИАС"; *Ю. К. Язов,* д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник управления ГНИИИ ПТЗИ ФСТЭК России.

Паразитные акустические модуляции световых потоков в разъёмных соединениях оптической сети объекта информатизации

В. В. Гришачев, канд. физ.-мат. наук; О. В. Казарин, д-р техн. наук; Ю. Д. Калинина

Институт информационных наук и технологий безопасности

Российского государственного гуманитарного университета, Москва, Россия

Представлено описание формирования канала утечки речевой информации на основе паразитных акустических модуляций и наводок в световом потоке, проходящем через штатное разъёмное соединение в оптических сетях. Оптический разъём описывается как механическая колебательная система с несколькими резонансными частотами, а стык волокон в адаптере моделируется в виде интерферометра Фабри-Перо, потери которого определяются величиной зазора. На основе модели рассчитывается чувствительность разъёма к акустическим воздействиям. Проведено сравнение с экспериментальными результатами исследования волоконно-оптического канала утечки речевой информации.

Ключевые слова: модель угроз конфиденциальности речевой информации, паразитные акустические модуляции и наводки, волоконно-оптический адаптер, воздушный и вибрационный акустический канал утечки речевой информации, волоконно-оптический канал утечки речевой информации.

Модель угроз безопасности речевой информации на объекте информатизации с волоконно-оптическими технологиями

Развитие волоконно-оптических технологий транспорта, измерения и обработки информации приводит к успешному вытеснению электронных и радиоэлектронных технологий [1—4]. Переход на новые технологии функционирования объектов информатизации, с одной стороны, повышает базовые параметры применяемых информационных систем, а с другой стороны, создает новые проблемы в таких областях, как информационная безопасность, что определяется их новизной.

Волоконно-оптический канал утечки речевой информации [5]. Одна из возможных угроз связывается с обеспечением безопасности речевой информации, циркулирующей на защищаемом объекте. Основой оптических информационных и измерительных сетей являются оптическое волокно и кабель, которые могут использоваться в одних случаях как распределенная измерительная система, а в других — как среда передачи информации. Таким образом, в оптических сетях

выполняются условия для конвергенции функций измерения и передачи информации, т. е. совмещения штатной функции передачи с нештатной функцией сбора информации, и наоборот. Оптические сети различного назначения размещаются внутри контролируемой зоны объекта информатизации в структурированных кабельных системах (СКС) и выходят далеко за пределы контролируемой зоны по технологии пассивных оптических сетей (PON, *passive optical network*).

Использование конвергенции функций оптических сетей позволяет реализовать волоконно-оптический канал утечки речевой информации, суть которого заключается в использовании штатной информационной пассивной оптической сети в качестве нештатной распределенной акустической измерительной сети. Путем подключения технических средств разведки к штатной сети нарушитель может получить скрытый доступ к циркулирующей на объекте речевой информации, находясь вне контролируемой зоны, а для зондирования использовать общедоступную технику оптической рефлектометрии.

Конфиденциальные источники речевой информации вблизи оптических кабелей СКС формируют оптические информативные сигналы, вызванные паразитными акустическими модуляциями и наводками в световых потоках. Эффективность функционирования волоконно-оптического канала утечки речевой информации значительно повышается при зондировании участков сети с оптическими неоднородностями, такими, как разъёмное соединение, изгиб, скрутка, перетяжка кабеля и т. д. Рост эффективности связан с увеличением уровня мощности отражаемого оптического сигнала, а

Гришачев Владимир Васильевич, доцент.

E-mail: grishachev@mail.ru

Казарин Олег Викторович, заведующий кафедрой "Комплексная защита информации".

E-mail: okaz2005@yandex.ru

Калинина Юлия Дмитриевна, аспирантка.

E-mail: abarakedavra@gmail.com

Статья поступила в редакцию 9 сентября 2018 г.

© Гришачев В. В., Казарин О. В., Калинина Ю. Д., 2018

также с повышением эффективности самих паразитных акустических модуляций и наводок на участке с оптической неоднородностью, что повышает информативность зондирования. Одним из наиболее опасных участков сети с неоднородностью являются разъемные оптические соединения, которые имеют широкое распространение, размещаются вблизи источников конфиденциальной речевой информации, обладают высокой чувствительностью к акустическим полям.

В данной работе авторы подробно обсуждают физико-технические проблемы формирования и функционирования волоконно-оптического канала утечки речевой информации вследствие паразитных акустических модуляций и наводок на световые потоки через разъемные соединения оптического кабеля.

Разъемное соединение оптических кабелей в оптических сетях

Успешное внедрение технологии пассивных оптических сетей в передачу информации связывают с решением ряда задач, таких, как оперативное соединение/разъединение оптического канала, деление/ответвление световых потоков, ограничение мощности, используя пассивные методы [1, 2]. Изготавливаемое из плавленого кварца телекоммуникационное оптическое волокно без защитных покрытий имеет общий диаметр по буферной оболочке 125 мкм с сердцевиной 7—10 мкм для одномодового волокна и 50 или 62,5 мкм для многомодового волокна. После формирования защитных покрытий диаметр увеличивается до 0,9 мм у оптического шнура (пигтейла). Оптическое волокно в защитных оболочках используют для изготовления оптического кабеля, в котором дополнительные структурные элементы защищают волокно от агрессивного воздействия внешней среды. Задача оперативного соединения/разъединения решается с помощью оконцевания оптического кабеля в виде коннектора и фиксации торцевого соединения оконцованных кабелей с помощью адаптера.

Конструкция оптического соединения волокон [1, 2]. Технология разъемного соединения двух волокон требует специального оконцевания, т. е. формирования наконечника волокна, удобного для осуществления торцевого физического контакта с другим оконцованным волокном, в результате которого получается пассивное устройство — оптический коннектор. Типичным является оптический коннектор с клеевой фиксацией волокна в сердечнике разъема с помощью эпоксидной смолы (рис. 1). Основу коннектора составляет сердечник (*ferrule*, феррула), представляющий собой керамический, стальной или полимерный цилиндр с тончайшим каналом в центре по диаметру оптического волокна (126—128 мкм). Сердечник закрепляется в полой металлической или пластмассовой "трубке" сложного сечения, к которой крепятся силовые элементы кабеля обычно при помощи стального кольца.

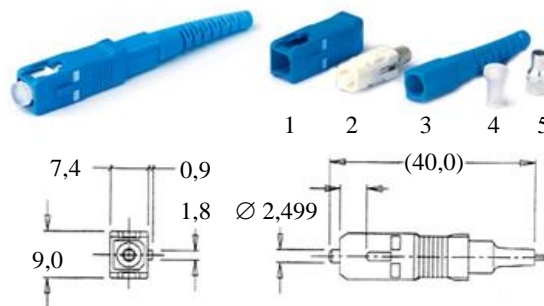


Рис. 1. Типичный оптический коннектор SC, 0,9 мм, simplex:

1 — внешний корпус (пластмасса); 2 — сердечник (керамика, сталь); 3 — защитный хвостик; 4 — защитный колпачок для ферруллы; 5 — крепежный элемент

Для непосредственного соединения оконцованных волокон в виде коннекторов используются переходные адаптеры, в которых отполированные торцы волокон в феррулах стыкуются внутри центрирующей втулки, прижимаются торцами друг к другу встроенными пружинами и закрепляются с помощью фиксаторов (рис. 2).

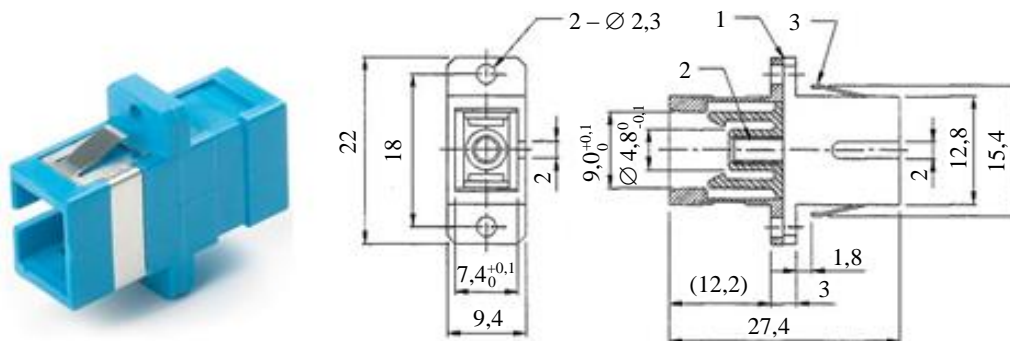


Рис. 2. Типичный переходной оптический адаптер SC-SC:

1 — корпус (пластмасса); 2 — направляющая центрирующая втулка (фосфорная бронза или керамика); 3 — фиксатор

Для фиксации положения торцов волокон используется несколько типов крепления: простая защелка (SC, LC), защелка с поворотом (ST), гайка (FC). Современная технология соединения оптических волокон обеспечивает многократное переоподключение (более 1000 переоподключений) с вносимыми прямыми потерями не более 0,2 дБ и возвратными потерями менее -55 дБ, что позволяет эффективно проводить оперативные подключения/отключения оптического оборудования, масштабирование оптической сети и реализовать другие возможности.

Разъемные соединения различаются размерами, материалами, конструкцией. Среди названных разъемных соединений наименьший размер имеют коннекторы типа LC, наибольшее распространение получил SC, встречаются коннекторы и адаптеры одиночные, сдвоенные и многоконтактные. Кроме названных коннекторов, используются специальные типы соединения, которые менее распространены.

Потери соединения [1, 2]. Техническое назначение разъемного соединения состоит в передаче светового потока из одного кабеля в другой без существенных потерь путем торцевого оптического контакта соединяемых волокон. Из-за малого диаметра оптического канала (сердцевины) в волокне это сложная, но решаемая проблема. Торцевое соединение волокон неизбежно сокращает проходящую через соединение оптическую мощность, которая характеризуется коэффициентом вносимых (прямых) потерь:

$$PL = P_1 / P_0, \quad (1)$$

где P_0 , P_1 — мощность оптического излучения на входе и на выходе соединения. Некоторая часть мощности оптического излучения P_2 , меньшая вносимых потерь P_1 , вследствие френелевского отражения от стыкуемых поверхностей будет направляться в обратную от соединения сторону. Ее доля характеризуется коэффициентом возвратных (обратных) потерь

$$RL = P_2 / P_0. \quad (2)$$

Потери в оптическом соединении связаны с дефектами оптического контакта при физической торцевой стыковке волокон. Также к потерям приводят геометрические неидеальности изготавливаемого волокна, такие, как некруглость (эллиптичность) сердцевины и оболочки, определяемая как разность максимального и минимального диаметров сердцевины (оболочки), деленная на номинальный радиус, выраженная в процентах, неконцентричность сердцевины и оболочки (расстояние между центрами сердцевины и оболочки).

Все дефекты соединения сводятся к пяти видам (рис. 3). Это осевое смещение волокон на s при диаметре сердцевин d , которое может быть связано с геометрическими неидеальностями изготавливаемого волокна, что приводит к потере части светового потока при переходе из одного волокна в другое из-за неполного пересечения сердцевин. При плохой обработке поверхностей стыка волокон или их загрязнении происходит неплотный физический контакт торцов волокон, что вызывает потери мощности из-за расхождения выходящего потока при больших радиальных смещениях h и вследствие интерференционных явлений. При геометрических неидеальностях изготовления или полировки торцов со скосами происходит угловое смещение ϑ направления осей волокон и, как следствие, радиальное смещение h , что вызывает схожие с предыдущими вкладами потери. Использование в оптической сети волокон с различными параметрами приводит к оптическому рассогласованию. Например, при соединении волокон с различными апертурами $NA_1 \neq NA_2$, т. е. с различными входными и выходными конусами световых потоков, не весь световой поток переходит из волокна в волокно. Аналогичные процессы происходят при соединении волокон с разными диаметрами сердцевин $d_1 \neq d_2$, например при соединении одномодового и многомодового волокон.

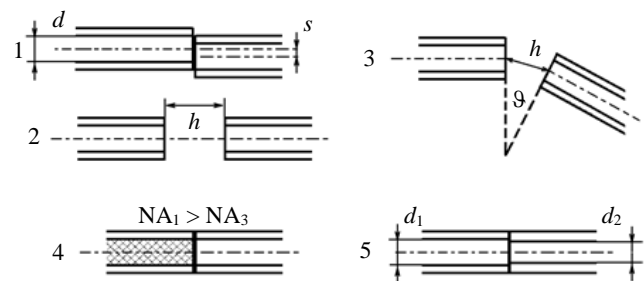


Рис. 3. Типичные дефекты оптического соединения волокон в переходном адаптере:

1 — осевое смещение оптических волокон с диаметром сердцевин d на s ; 2 — радиальное смещение h ; 3 — угловое смещение ϑ ; 4 — рассогласование волокон по числовым апертурам NA_1 , NA_2 ; 5 — рассогласование волокон по диаметру сердцевин d_1 , d_2

На вносимые и возвратные потери значительное влияние оказывает способ полировки наконечника оптического коннектора (феррулы) (рис. 4). Различают полировку с плоским профилем торца феррулы с различным качеством PC (Physical Contact) и SPC (Super Physical Contact), не позволяющим реализовать контакт без воздушного зазора и дающим максимальные значения потерь. Данный тип полировки применяется в полевых условиях при

ручной и механической полировке, но используется и при изготовлении оконцованных оптических кабелей в заводских условиях.

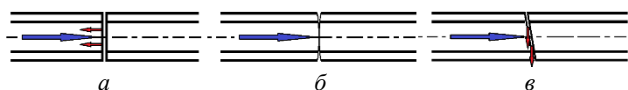


Рис. 4. Типы полировок торцов наконечника оптического коннектора (феррулы):

a — простая (PC) и улучшенная (SPC) полировка с плоским профилем торца феррулы; *б* — полировка UPC с закругленным профилем торца феррулы; *с* — полировка APC с плоским скошенным под углом 8° профилем торца феррулы

Полировка UPC (Ultra Physically Contact) торца коннектора с выпуклым закруглением радиусом порядка 15—20 мм позволяет значительно уменьшить воздушный зазор между торцами феррул и, как следствие, вносимые потери. Полировка APC (Angled Physically Contact) со скошенными под углом около $8\text{--}12^\circ$ торцами позволяет свести к минимуму возвратные потери, которые оказывают сильное влияние на работу оборудования. Последний тип полировки не совместим с другими типами и может привести к их повреждению. Характерные параметры разъемного соединения приведены в таблице.

Зависимость вносимых потерь Π и возвратных потерь RL от вида полировки торца оптического коннектора в разъемном соединении волокон (обобщенные данные различных производителей)

Полировка	Π , дБ	RL , дБ
PC	0,2	-25 ... -30
SPC	0,2	-35 ... 0
UPC	0,2	-45 ... -50
APC	0,3	-60 ... -70

Обобщая представленные данные, можно сделать вывод об успешном решении проблемы разъемного соединения оптических кабелей, которое во многом повторяет технологию соединения медных кабелей, хотя с некоторыми сложностями реализации.

Разъемное соединение как элемент волоконно-оптического канала утечки речевой информации

Разъемное оптическое соединение — механическая колебательная система [6]. Типичная обобщенная модель соединения оконцованных оптических кабелей с помощью адаптера представляет собой плотно сжатые отполированные торцы волокон в феррулах до физического контакта с помощью двух пружин (рис. 5) и является механической

колебательной системой с нелинейной зависимостью восстанавливающей силы от смещения между торцами волокон внутри направляющего и центрирующего цилиндрического канала.

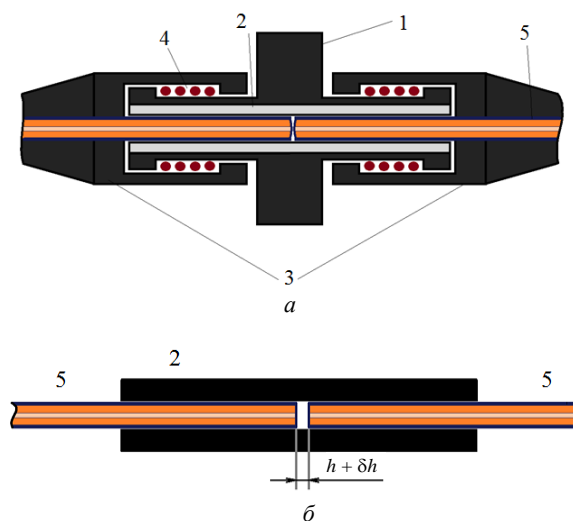


Рис. 5. Схема конструкции проходного соединителя в оптическом адаптере двух оптических кабелей с коннекторами (а) и их модельное приближение с воздушным промежутком $h + \delta h$ между торцами волокон (б):

1 — корпус оптического адаптера с фиксатором; 2 — центрирующая втулка; 3 — коннекторы; 4 — стягивающие пружины; 5 — феррула, наконечник оптического волокна

Паразитные акустические модуляции и наводки на световые потоки через оптический адаптер вызываются прямым механическим воздействием звуковой волны в воздухе на оптический адаптер или вибрационным воздействием структурного звука в местах крепления адаптера в кабельных каналах к конструкциям здания.

При воздействии звуковой волны на адаптер возникает радиальное смещение волокон внутри центрирующей втулки, которая обладает высокой жесткостью, так что иными видами динамического смещения волокон можно пренебречь. Хотя другие неидеальности стыковки волокон по-прежнему вносят вклад в формирование статических прямых и возвратных оптических потерь, их вклад остается постоянным из-за центрирующей втулки, которая нивелирует все смещения, кроме радиального.

В механической колебательной системе роль восстанавливающей силы выполняют силы поверхностного взаимодействия между торцами, силы упругости сжимающих пружин и корпуса адаптера.

В величине восстанавливающей силы можно выделить три участка с различными значениями коэффициента жесткости k в зависимости от радиального смещения волокон h (рис. 6).

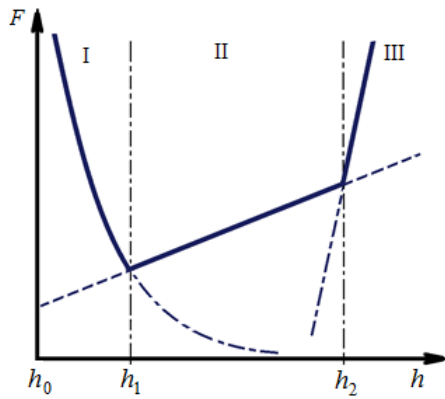


Рис. 6. Качественная зависимость стягивающей силы F от расстояния h между стыкуемыми оптическими волокнами в адаптере типа SC-SC с тремя областями типа восстанавливающей силы:

I — область $h_0 < h < h_1$ сцепления стыкуемых поверхностей силами Ван-дер-Ваальса; II — область $h_1 < h < h_2$ упругих сил сжимающих пружин адаптера; III — область $h > h_2$ упругих сил пластмассового корпуса, ограничивающих смещение волокон

Первая область восстанавливающих сил при радиальных смещениях ($h_0 < h < h_1$) связана с силами Ван-дер-Ваальса между стыкуемыми поверхностями сердечника с волокном (феррула). Сила взаимодействия (притяжения) между плоскими телами площадью S на расстоянии h между ними определяется выражением [7]

$$F = -A \frac{S}{h^3}, \quad (3)$$

где A — материальная константа. С увеличением расстояния h восстанавливающая сила убывает. Такая механическая система является нелинейной механической колебательной системой с мягкой характеристикой восстанавливающей силы. Таким образом, коэффициент жесткости в области смещений от минимального сближения h_0 до смещения h_1 , при котором силы Ван-дер-Ваальса сравниваются с упругими силами сжимающей пружины коннектора, будет определяться выражением

$$k_1 = AS/h^4. \quad (4)$$

Во второй области радиальных смещений до ограничивающего действия корпуса адаптера h_2 коэффициент жесткости постоянен, $k_2 = \text{const}$, и определяется упругими свойствами сжимающей пружины коннектора. Ширина второй области $h_1 < h < h_2$ определяется конструкцией адаптера и коннекторов и позволяет радиально двигаться ферруле в направляющей втулке адаптера. Она имеет наибольшее значение, превышающее миллиметр, и определяется ходом коннектора в адаптере.

Последняя, третья область со смещениями выше h_2 , достижимая в разъёмных соединениях при раздвижении феррул до ограничивающих упоров, имеет наибольшую жесткость из всех областей восстанавливающей силы ($k_3 = \text{const} \gg k_2, k_1$), которая определяется жесткостью материала самого адаптера.

Различные значения величины жесткости k при разных величинах зазора между торцами волокон в адаптере приводят к нелинейному характеру резонансной кривой, на которой можно выделить несколько областей резонансных частот.

Паразитные акустические модуляции и наводки в оптическом разъеме [6]. Звуковая волна, распространяющаяся в воздухе или преобразованная в структурный звук в конструкциях здания, воздействует на оптический адаптер как на механическую колебательную систему со сложным видом восстанавливающей силы, которая имеет набор резонансных частот $\{2\pi f_i\}$ и соответствующих значений добротности $\{Q_i\}$ [9]. Вызываемые звуком вариации ширины зазора δh_i между торцами волокон в центрирующей втулке адаптера для i -го резонанса будут определяться выражением

$$\delta h_i(f) = \delta h_{mi} / \sqrt{Q_i^2 [1 - (f/f_i)^2]^2 + (f/f_i)^2}, \quad (5)$$

где δh_{mi} — амплитуда изменения зазора i -го резонанса, определяемая уровнем звукового давления (SPL);
 f — частота звуковой волны.

Общая вариация ширины зазора под действием звуковой волны

$$\delta h(f) = \sum_i \delta h_i(f). \quad (6)$$

Определим амплитуду изменения ширины зазора под действием звука при заданном $\text{SPL} = 10 \lg(I/I_0)$ дБ, относительно порога слышимости $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м², которое соответствует интенсивности звуковой волны

$$I = 2\pi^2 z_a f^2 \xi_m^2,$$

где ξ_m — амплитуда акустического смещения частиц в среде; z_a — акустическое сопротивление среды.

Амплитуда акустического смещения частиц в среде

$$\xi_m = \sqrt{I / 2\pi^2 z_a f^2}. \quad (7)$$

Если учесть, что амплитуда акустического смещения частиц в среде ξ_m приближается к амплитудной вариации ширины зазора вдали от резонансов

в низкочастотной области, когда $f_i > f \rightarrow 0$, то амплитудное смещение в области резонанса можно принять равным

$$\delta h_{mi} \approx \xi_m Q_i. \quad (8)$$

Следовательно, при воздействии звуковой волны интенсивностью I вариации зазора δh будут определяться выражением

$$\delta h(f) \approx \sqrt{I/2\pi^2 z_a f^2 \sum_i 1/\sqrt{[1-(f/f_i)^2]^2 + (f/Q_i f_i)^2}}. \quad (9)$$

Разъемное оптическое соединение — интерферометр Фабри-Перо [1, 3, 6]. С одной стороны, разъемное оптическое соединение коннекторов в адаптере является механической колебательной системой, а с другой стороны, оптический контакт торцов волокон можно считать интерферометром Фабри-Перо с изменяемым расстоянием (зазором) между слабо отражающими поверхностями, в котором формируются вносимые и возвратные потери. При механических воздействиях ширина зазора меняется и с ней меняются потери оптической мощности в адаптере, создавая паразитные акустические модуляции и наводки на световые потоки через разъемное оптическое соединение [6].

Коэффициент прохождения оптического излучения через зазор в приближении интерферометра Фабри-Перо определяется величиной фазовой задержки между интерферирующими лучами (рис. 7).

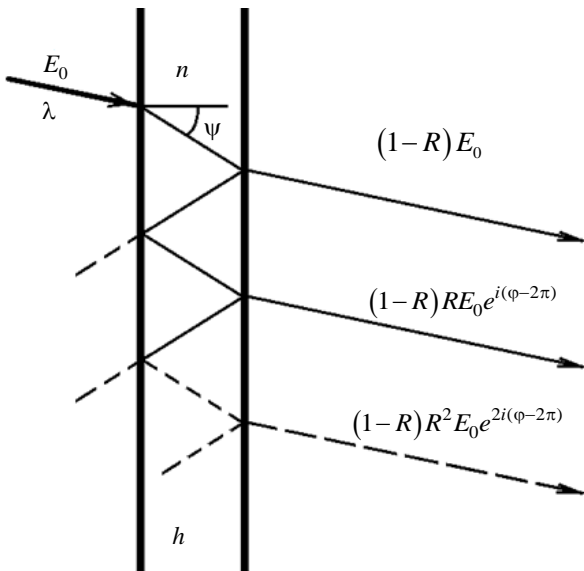


Рис. 7. Ход лучей в интерферометре Фабри-Перо в двулучевом приближении при коэффициенте отражения $R \ll 1$ и $o(R^2)$:

E_0 — напряженность поля волны; λ — длина волны; h — ширина зазора; n — показатель преломления среды зазора; ψ — угол падения; φ — разность фаз между соседними лучами

При ширине h , показателе преломления среды n в зазоре и угле ψ падения лучей на границу сред разность фаз между соседними лучами составит:

$$\varphi = (4\pi hn/\lambda \cos \psi) - 2\pi, \quad (10)$$

где λ — длина волны зондирующего излучения, а 2π добавлены вследствие двух отражений от более плотной оптической среды. При коэффициенте отражения R от границы раздела сред зазора получим для напряженности поля, в комплексном виде прошедшего интерферометр:

$$E_t = E_0 \left[(1-R) + (1-R)R \exp(i\varphi) + \dots \right], \quad (11)$$

где E_0 — напряженность поля зондирующей волны.

Коэффициент отражения от поверхности стекла на воздухе составляет менее 4 %. Поэтому в приближении $o(R^2)$ (бесконечно малой второго порядка по $R \ll 1$) всеми интерферируемыми лучами с напряженностью поля, пропорциональной R^2 , можно пренебречь. Тогда интерференция сведется к двулучевой интерференции с напряженностью поля

$$E_t \approx E_0 \left[1 - 2iR \sin(\varphi/2) \exp(i\varphi/2) \right] \quad (12)$$

и мощностью проходящего света

$$P_t \approx P_0 \left[1 - 4R \sin^2(\varphi/2) \right], \quad (13)$$

т. е. имеем мощность, совпадающую с формулой Эйри для интерференции лучей в тонком слое в приближении $o(R^2)$ для монохроматического зондирующего излучения.

Используя данное приближение, произведем оценку ширины зазора соединения волокон. Поскольку вносимые потери имеют порядок $0,2 \text{ дБ} = -10 \lg(P_t/P_0)$, получаем $\sin(\varphi/2) = \pm 0,53$ и $h = \lambda \cos \psi \left[(\varphi + 2\pi)/4\pi \right] = 117; 538; 772 \text{ нм}$ и более при $\lambda = 1310 \text{ нм}$, $n = 1$ (воздух), $\psi = 0 \text{ рад}$, а разность фаз принимает значения $\varphi = 1,12 - 2\pi; -1,12; 1,12 \text{ рад}$ и т. д. Таким образом, ширина зазора h может принимать значения $117; 538; 772 \text{ нм}$ и более. В нашем приближении толщина зазора минимальна, иначе вносимые потери будут значительно меняться от соединения к соединению.

Изменение толщины зазора h на δh приводит к паразитным модуляциям мощности δP светового потока, проходящего интерферометр:

$$|\delta P| = 2P_0 R |\varphi \sin \varphi| (\delta h/h). \quad (14)$$

Таким образом, паразитные акустические модуляции мощности света при прохождении оптического разъема зависят от интегральной мощности

зондирующего излучения P_0 , коэффициента отражения на торце коннектора R , разности фаз φ в оптическом зазоре и глубины модуляции механических колебаний зазора $\delta h/h$ под действием звука.

Чувствительность системы регистрации к паразитным акустическим модуляциям и наводкам

Исследование параметров разъемного оптического соединения волокон эффективно можно проводить, так же как для акустического датчика [3, 4, 9], с помощью понятия чувствительности CSL системы регистрации оптического разъема к паразитным акустическим модуляциям и наводкам, определяемой как отношение переменного напряжения δU_0 , генерируемого фотоприемником системы регистрации, к акустическому давлению p_0 в информативной звуковой волне:

$$CSL = \delta U / p_0, \text{ В/Па}, \quad (15)$$

которую также можно называть чувствительностью волоконно-оптического канала утечки речевой информации. Понятие чувствительности CSL аналогично понятию чувствительности микрофона, что позволяет сравнивать эффективность функционирования канала утечки с работой микрофона.

Пусть сформированный в результате паразитных акустических модуляций и наводок информативный оптический сигнал детектируется в фотоприемном устройстве на основе фотодиода [9]. Если принять дифференциальную вольт-ваттную чувствительность фотодиода системы регистрации равной S_V (в В/Вт), то напряжение фотодиода будет иметь переменную составляющую с амплитудой

$$\delta U = |\delta P_T| S_V = 2P_0 S_V R |\varphi \sin \varphi| (\delta h/h). \quad (16)$$

С учетом механических вариаций зазора с одним резонансом на частоте f_0 с добротностью Q_0 напряжение фотодиода составит

$$\delta U(v) = \delta U_m / \sqrt{v^2 \left[(1-v^2)^2 + (v/Q_0)^2 \right]}, \quad (17)$$

где $v = (f/f_0)$ — нормированная частота акустического сигнала;

$$\delta U_m = \sqrt{(2I/\pi^2 h^2 f_0^2 z_a)} R |\varphi \sin \varphi| P_0 S_V \quad (18)$$

есть напряжение фотодиода в области низких частот вдали от резонансов.

Резонансное напряжение на частоте f_0 составит

$$\delta U_0 = \delta U_m Q_0. \quad (19)$$

Видно, что спектр выходных напряжений фотодиода зависит от интенсивности звука I , акустического сопротивления z_a среды, через которую передаются звуковые колебания (воздух или материал коннектора), разности фаз $\varphi = (4\pi h/\lambda) - 2\pi$ для световых волн в зазоре с общей толщиной h , коэффициента отражения материала волокна R , добротности Q_0 и резонансной частоты f_0 адаптера, мощности зондирующего оптического излучения P_0 , вольт-ваттной чувствительности фотодиода S_V и частоты звуковой волны f .

Полученное выражение справедливо при спектральных исследованиях, когда воздействующий звук монохромен по частоте, т. е. при однотональных исследованиях. При воздействии не тонального сигнала, такого, как белый шум, необходимо провести среднеквадратичное усреднение по конечному спектру в полосе $f \pm f$, т. е. вычислить интеграл

$$\delta U = \sqrt{\langle \delta U^2(f) \rangle} = \sqrt{\frac{1}{2\Delta f} \int_{f-\Delta f}^{f+\Delta f} \delta U^2 df}. \quad (20)$$

Использование для измерения оптической мощности фотодиода в фотовольтаическом режиме включения (т. е. без внешнего напряжения смещения) позволяет уменьшить шумы регистрации, а также получить линейную характеристику преобразователя, которая определяется дифференциальной вольт-ваттной чувствительностью S_V .

Выходное напряжение U фотодиода в фотовольтаическом режиме связано логарифмической зависимостью с мощностью P_0 , падающей на фотоплощадку при интенсивном световом потоке [9], поэтому изменение напряжения δU будет иметь линейную зависимость от изменения мощности δP светового потока:

$$\delta U = \varphi_T (\delta P/P_0), \quad (21)$$

где $\varphi_T = (kT/e)$ — температурный (тепловой) потенциал (напряжение, соответствующее энергии тепловых колебаний в материале фотоприемника);
 $\delta P/P_0$ — глубина паразитной акустической модуляции мощности светового потока.

Из полученных выражений можно определить теоретическую чувствительность CSL оптического разъема к паразитным акустическим модуляциям и наводкам при регистрации фотодиодом в фотовольтаическом режиме включения:

$$CSL = S_0 |\varphi \sin(\varphi)|, \quad (22)$$

где введена константа системы регистрации

$$S_0 = \varphi_T R Q_0 / \pi f_0 h z_a. \quad (23)$$

Видно, что чувствительность CSL не зависит от мощности P_0 зондирующего излучения, а определяется исключительно механическими характеристиками оптического разъема как колебательной системы (т. е. добротностью Q_0 на резонансной частоте f_0), плотностью стыковки торцов коннекторов $|\varphi \sin \varphi|/h$. Другие параметры, такие, как $\varphi_T = (kT/e) \approx 26$ мВ, фиксированы температурой окружающей среды (~ 300 К) и $R \approx 3,4$ % — коэффициентами преломления стекла ($\sim 1,45$) и воздуха (~ 1).

Влияние среды на чувствительность CSL канала утечки связывается с акустическим сопротивлением z_a среды, в которой происходит формирование паразитных акустических модуляций и наводок в оптическом канале. Акустическое сопротивление воздуха более чем на четыре порядка меньше акустического сопротивления твердых сред, что приводит к росту чувствительности CSL в воздухе относительно твердых сред на те же четыре порядка. Таким образом, разъемное оптическое соединение волокон в адаптере в воздушной среде в 10000 раз чувствительнее к воздействию звука, чем при плотном акустическом контакте с твердыми средами. Поэтому при формировании паразитных акустических модуляций колебательная система коннектор—адаптер—коннектор с ростом уровня звукового давления переходит из линейных колебаний в нелинейные, а затем в состояние с предельными смещениями, что проявляется в убывании разборчивости речи при превышении уровня громкости спокойного разговора (порядка 60 дБ). Данное явление наблюдалось во всех выполненных ранее практических исследованиях на соединениях оптических волокон с помощью адаптера SC-SC [5, 6, 8, 10, 11].

С другой стороны, формирование акустических паразитных модуляций и наводок при вибрационном воздействии связано со значительно меньшей чувствительностью CSL, но оно происходит со значительно меньшими искажениями и позволяет получить 100%-ю разборчивость в широком динамическом диапазоне уровней громкости.

Влияние длины волны зондирующего излучения [10] на чувствительность CSL системы регистрации связывается с разностью фаз φ , зависящей от длины волны λ и ширины зазора h , так что $CSL \sim [(C/\lambda) - 2\pi] \sin(C/\lambda)$, где C — независимая от длины волны константа. При условии малости константы $C \ll 1$ получим

$$CSL \sim 2\pi(C/\lambda). \quad (24)$$

Следовательно, с уменьшением длины волны эффективность растет, так как растут разность хода в интерферометре и разность фаз φ , что приводит к росту глубины модуляции света в интерферометре.

Влияние когерентности зондирующего излучения на чувствительность CSL системы регистрации определяется интерференционными процессами в зазоре при контакте волокон, который можно представить как интерферометр Фабри-Перо в двулучевом приближении при $R \ll 1$ (см. рис. 7).

Для некогерентного светового потока в приближении прямоугольного спектра $\omega \pm \Delta\omega$, (где ω — центральная частота; $\Delta\omega$ — полуширина спектра) с разностью фаз между соседними лучами $\varphi = (2h n \omega / c \cos \psi) - 2\pi$ напряженность интерференционного поля получается путем интегрирования по спектру:

$$E_t = \frac{E_0}{2 \Delta\omega} \int_{\omega - \Delta\omega}^{\omega + \Delta\omega} [1 - R + R \exp(i\varphi)] d\omega. \quad (25)$$

Отсюда получаем

$$E_t \approx E_0 [1 - R + R \operatorname{sinc}(\varphi \Delta\omega / \omega) \exp(i\varphi)], \quad (26)$$

где использована функция $\operatorname{sinc}(x) = \sin x/x$. При переходе от частот к длинам волн ($\Delta\omega/\omega = -\Delta\lambda/\lambda$) для мощности прошедшего излучения получим

$$P_t \approx P_0 [1 - 2R + 2R \operatorname{sinc}(\varphi \Delta\lambda / \lambda) \cos(\varphi) + o(R^2)]. \quad (27)$$

При $(\Delta\lambda/\lambda) \rightarrow 0$ она переходит в приближение с $o(R^2)$, полученное ранее по формуле Эйри для монохромного излучения.

Модуляция δP_t мощности P_0 прошедшего интерферометра света при изменении ширины зазора h на δh определяется выражением

$$\begin{aligned} \delta P_t &= \\ &= 2P_0 R \left| \operatorname{sinc}(\varphi \Delta\lambda / \lambda) [1 + \varphi \sin(\varphi)] - \cos(\varphi \Delta\lambda / \lambda) \right| \times (\delta h / h). \end{aligned} \quad (28)$$

Таким образом, чувствительность оптического соединения к паразитным акустическим модуляциям при зондировании оптическим излучением с прямоугольным спектром в полосе $\lambda \pm \Delta\lambda$ и регистрации фотодиодом в фотовольтаическом режиме включения равна

$$\begin{aligned} CSL &= \\ &= S_0 \left| \operatorname{sinc}(\varphi \Delta\lambda / \lambda) [1 + \varphi \sin(\varphi)] - \cos(\varphi \Delta\lambda / \lambda) \right|. \end{aligned} \quad (29)$$

В частном случае зондирования лазерным излучением с $\varphi\Delta\lambda/\lambda \ll 1$, т. е. конечной длиной когерентности, получаем

$$CSL = S_0 \left| \varphi \sin(\varphi) + (1/6)(\varphi\Delta\lambda / \lambda)^2 [1 - \sin(\varphi)] \right|. \quad (30)$$

Полученные выражения переходят в ранее полученные для монохроматического излучения с нулевой шириной полосы, т. е. при $(\Delta\lambda/\lambda) \rightarrow 0$.

В выражении для чувствительности CSL второе слагаемое определяет влияние длины когерентности на чувствительность оптического соединения к паразитным акустическим модуляциям. При уменьшении длины когерентности растет $\Delta\lambda/\lambda$ и второе слагаемое, что может привести как к росту чувствительности CSL, так и к падению в зависимости от знака φ . В экспериментах авторов чувствительность CSL уменьшалась, причем значительно, что говорит об отрицательности φ . В других случаях путем подбора начальной ширины зазора h , длины волны λ и ширины полосы $\Delta\lambda$ зондирующего оптического излучения можно значительно увеличить чувствительность.

Экспериментальное исследование паразитных акустических модуляций и наводок в оптическом адаптере

Экспериментальные исследования паразитных акустических модуляций и наводок на световые потоки через оптический адаптер типа SC-SC (SM) проводились на прохождение с помощью зондирующего излучения от гелий-неонового лазера с длиной волны 632 нм мощностью 0,5 мВт путем регистрации фотодиодом ФД-21КП в фотовольтаическом режиме включения и измерения напряжения селективным нановольтметром типа UNIPAN в полосе частот 54 дБ на октаву. В качестве акустического сигнала использовался белый шум с уровнем звукового давления порядка 60 дБ, что соответствует уровню звукового давления $2 \cdot 10^{-2}$ Па. Ранее по данной методике были проведены многие исследования функционирования волоконно-оптического канала утечки (акустической) речевой информации [5, 6, 8, 10, 11].

Результаты спектральных исследований представлены на рис. 8. В зависимости $\delta U(f)$ можно выделить три спектральные области со сложной структурой резонанса на частотах вблизи 300, 1000 и 3000 Гц с амплитудами напряжений порядка 220, 80 и 60 мкВ соответственно. По спектральной зависимости можно оценить добротности резонансов в 11, 4 и 3 как отношения амплитуды при резонансе к напряжению при низких частотах.

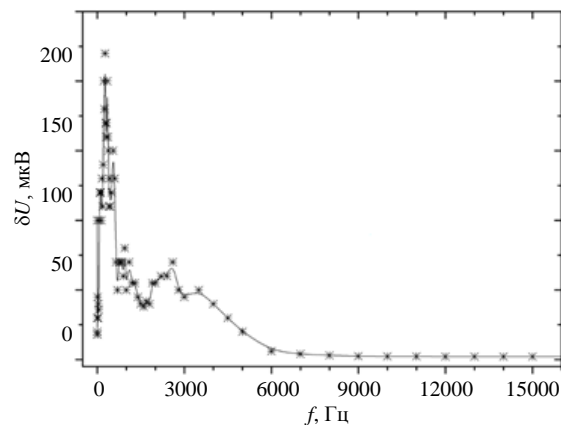


Рис. 8. Результаты спектральных измерений вариаций напряжения фотодиода в зависимости от частоты акустического сигнала $\delta U(f)$

Определим максимальную чувствительность оптического разъема (на частоте 300 Гц) по экспериментальным данным и полученным расчетным формулам. По определению чувствительности, получим $CSL = 11$ мВ/Па (эксперимент). Для определения по расчетным формулам оценим параметры колебательной системы и системы регистрации: $\varphi_T = kT/e \approx 26$ мВ, $R \approx 3,4$ % (граница стекло/воздух), $z_a = 413$ кг/(м²·с) (воздух), $h = 117$ нм, $\lambda = 632$ нм, $\varphi = -2\pi + 4\pi h/\lambda = 4$ рад и $|\varphi \sin \varphi| = 3$. Оценки некоторых из них были выполнены ранее. Тогда получаем $S_0 = 21$ мВ/Па, и $CSL = 62$ мВ/Па (расчет). Сравнение экспериментального и расчетного значений чувствительности CSL оптического соединения на основе адаптера типа SC-SC (SM) к паразитным акустическим модуляциям при уровне звукового давления 60 дБ на резонансных частотах показывает совпадение по порядку величины. Различия может быть связано с грубостью предварительных оценок.

Представленные ранее результаты [11], полученные при похожих условиях (воздействие белого шума с уровнем звукового давления 65 дБ), с представленными в этой работе (рис. 8), имеют существенное расхождение по резонансным частотам и амплитудам (в [11] это 0,5 кГц с максимумом 200 мкВ и 3,5 кГц с максимумом 80 мкВ), что можно связать с неконтролируемыми изменениями условий проведения эксперимента, характерными для паразитных модуляций. Это еще раз показывает, что любой технический канал утечки информации на основе паразитных акустических модуляций и наводок имеет неконтролируемое функционирование вследствие множества условий, влияющих на его эффективность. В своих экспериментах авторы старались сохранять условия эксперимента максимально неизменными, но неконтро-

лируемое изменение акустического фона, самого акустического сигнала, взаимное расположение акустических и оптических элементов, разъединение/соединение оптического разъема и т. д. приводят к существенному изменению воздействия звука на разъем.

Особенности функционирования волоконно-оптического канала утечки речевой информации. Проведенные качественные и практические исследования воздействия внешних акустических полей речевого диапазона на оптический адаптер показывают, что при этих воздействиях формируются значительные паразитные акустические модуляции световых потоков в оптических кабельных системах, которые формируют информативный сигнал с высоким уровнем угрозы конфиденциальности речевой информации, циркулирующей на объекте вблизи оптической сети. Чувствительность адаптера к паразитным акустическим модуляциям и наводкам при прямом (воздушном) воздействии приводит к нелинейным искажениям информативного сигнала уже при превышении уровня громкости речи выше спокойного разговора, что связано с малыми возможными амплитудами колебаний зазора в адаптере. При вибрационном воздействии на адаптер информативный сигнал менее подвержен искажениям, так как вызывает на несколько порядков меньшие колебания зазора, что повышает его разборчивость при декодировании. Поэтому при расположении адаптера в комнате с низким уровнем фонового шума он может регистрировать паразитные акустические модуляции и наводки от удаленных от него выделенных помещений здания, создавая угрозу безопасности переговоров.

Заключение

Проведенные исследования разъемного соединения оптического кабеля показывают, что данный тип неоднородности обладает микрофонным эффектом с высокой чувствительностью к воздей-

ствию звука в воздухе. Характеристики информативного сигнала на основе паразитных акустических модуляций и наводок на световые потоки сильно зависят от многих параметров канала утечки: состояния окружающей среды, параметров зондирующего излучения, свойств разъема и т. д. Это дает нарушителю широкие возможности по формированию эффективного волоконно-оптического канала утечки речевой информации.

Литература

1. Убайдуллаев Р. Р. Волоконно-оптические сети. — М.: Эко-Трендз, 2001. — 267 с.
2. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и перспективы: сб. статей / под ред. Дмитриева С. А., Слепова Н. Н. — М.: ООО "Волоконная оптическая техника", 2005. — 576 с.
3. Кульчин Ю. Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. — М.: Физматлит, 2001. — 272 с.
4. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / под ред. Удда Э. / Пер. с англ. — М.: Техносфера, 2008. — 520 с.
5. Гришачев В. В., Халяпин Д. Б., Шевченко Н. А. Анализ угроз утечки речевой информации через волоконно-оптические коммуникации // Вопросы защиты информации. 2008. № 4. С. 12—17.
6. Гришачев В. В., Калинина Ю. Д., Тарасов А. А. Оценка глубины паразитной модуляции света в оптической кабельной системе с неоднородностями // Вопросы защиты информации. 2016. № 1. С. 62—73.
7. Бараиш Ю. С., Гинзбург В. Л. Электромагнитные флуктуации в веществе и молекулярные (ван-дер-ваальсовы) силы между телами // УФН. 1975. Т. 116. С. 5—40.
8. Гришачев В. В., Косенко О. А. Количественная оценка эффективности канала утечки информации по техническим параметрам каналов связи // Вопросы защиты информации. 2010. № 4. С. 9—17.
9. Джексон Р. Г. Новейшие датчики / Пер. с англ. — М.: Техносфера, 2007. — 384 с.
10. Гришачев В. В., Косенко О. А. Практическая оценка эффективности канала утечки акустической (речевой) информации через волоконно-оптические коммуникации // Вопросы защиты информации. 2010. № 2. С. 18—25.
11. Гришачев В. В., Калинина Ю. Д., Тарасов А. А., Шапкова О. А. Анализ волоконно-оптических каналов утечки речевой информации по физическим параметрам информационного сигнала // Вопросы защиты информации. 2015. № 4. С. 34—42.

Spurious acoustic modulation of light streams to the detachable connections of optical network of informatization object

V. V. Grishachev, O. V. Kazarin, Ju. D. Kalinina

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

Description of the formation of the speech information leakage channel on the basis of spurious acoustic modulation and crosstalk in the light streams passing via a standard plug connection in optical networks is presented. The optical connector is described as a mechanical oscillation system with several resonant frequencies, and the fiber junction in the adapter is modeled as a Fabry-Perot interferometer, the loss of which is determined by the gap. Based on the model calculated the sensitivity of connector to acoustic influences and presented a comparison with the experimental results of the fiber optic channel of the speech information leakage.

Keywords: threat model of the speech information privacy, spurious acoustic modulation and crosstalk, fiber optical adapter, air and vibration acoustic channel of the speech information leakage, fiber optic channel of the speech information leakage.

Bibliography — 11 references.

Received September 9, 2018

Вопросы защиты информации: Науч.-практ. журн. / ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2018.
Вып. 4 (123). С. 1—92.

Редактор *О. А. Константинова*
Компьютерная верстка: *Н. В. Ильина, К. В. Трыкина*

Подписано в печать 4.12.2018. Формат 60x84 1/8.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,7. Уч.-изд. л. 11,1.
Тираж 400 экз. Заказ 1919. Свободная цена.
Адрес редакции: 125424, Москва,
Волоколамское ш., 77. ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».
<http://ntskompass.ru>
Отпечатано в ООО "РАПИТОГРАФ".
117342, Москва, ул. Бутлерова, д. 17Б.
Индекс 79187.