

## Оценка глубины паразитной модуляции света в оптической кабельной системе с неоднородностями

В. В. Гришачев, канд. физ.-мат. наук; Ю. Д. Калинина;

А. А. Тарасов, д-р техн. наук

Институт информационных наук и технологий безопасности Российского государственного гуманитарного университета, Москва, Россия

*Оптические кабельные системы одновременно с тем, что являются средой передачи информации, представляют собой чувствительные измерители физических, в частности, акустических полей. Это их свойство определяет возможность образования каналов утечки 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. Защиту предложено строить на основе экранирования, фильтрации, зашумления и детектирования паразитных модуляций.*

*Ключевые слова:* оптические кабельные системы, паразитные модуляции света в оптоволокне, подслушивание переговоров.

Волоконно-оптические технологии находят широкое применение во многих областях деятельности человека [1, 2]. Одно из наиболее успешных применений состоит в использовании оптического кабеля в качестве транспортной среды в различных системах. Другое применение связывается с волоконно-оптическими датчиками и распределенными измерительными сетями, которые используются в технологическом мониторинге состояния зданий, сооружений, а также в экологическом мониторинге природных и искусственных объектов. С измерительными и транспортными возможностями волоконной оптики связывается внедрение в системы безопасности и защиты. К ним относятся волоконно-оптические системы охраны объектов, использование волоконно-оптических линий связи в системах видеонаблюдения и др.

Однако эти технологии определяют новые проблемы обеспечения информационной безопасно-

сти, которые связаны с недостаточным исследованием физических принципов формирования каналов утечки информации. Основное внимание обращается на защиту трафика в волоконно-оптических телекоммуникациях, перехват которого может принести максимальный вред, но кроме подобных угроз оптические кабельные системы несут опасность конфиденциальности информации внутри объектов вследствие измерительных возможностей оптического кабеля. Анализ подобной угрозы и принципам построения возможных средств защиты посвящена данная работа.

### Угрозы утечки информации через волоконно-оптические коммуникации

*Измерительные возможности волоконной оптики.* Физические поля оказывают влияние на прохождение света в оптоволокне. У нарушителя появляется возможность регистрировать паразитные наводки от окружающих физических полей и, анализируя их, получить доступ к циркулирующей на объекте 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 информации, используя зондирующие излучения в оптическом волокне. Канал утечки информации может быть реализован по оптической схеме на прохождение или на от-

---

**Гришачев Владимир Васильевич**, доцент.

Тел. 8 (495) 250-62-57.

E-mail: grishachev@mail.ru

**Калинина Юлия Дмитриевна**, аспирантка.

Тел. 8 (495) 250-62-57.

E-mail: abarakedavra@gmail.com

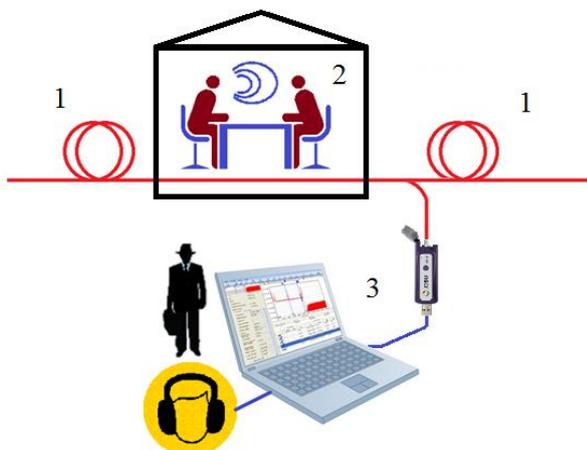
**Тарасов Александр Алексеевич**, профессор, директор.

Тел. 8 (495) 388-08-88.

Статья поступила в редакцию 18 марта 2016 г.

© Гришачев В. В., Калинина Ю. Д., Тарасов А. А., 2016

ражение света от места воздействия, также для реализации нарушитель может использовать как собственные зондирующие излучения, так и световые потоки легального информационного сигнала.



**Рис. 1.** Обобщенная схема подслушивания через оптическую кабельную сеть (1) переговоров (2) нарушителем (3) с помощью оптического рефлектометра

Применение различных схем зондирования позволяет нарушителю скрыть свои действия и не позволить обнаружить несанкционированное зондирование. Например, использование легальных световых потоков или оптического излучения на нерабочих длинах волн не позволяет обнаружить зондирование без специального оборудования. Схема зондирования от передатчика к приемнику дает возможность скрыть нарушителя.

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 которых зависит от параметров зондирующего излучения, таких как интенсивность, спектральный состав, поляризация, степень монохроматичности и когерентности. Наибольшей чувствительностью к внешним воздействиям обладает фаза света, изменение которой регистрируется интерференционными методами с точностью более  $10^{-6}$ , что позволяет измерять механические воздействия на волокно и акустические поля вблизи него. В основном поляризационные модуляции связываются с воздействием окружающих электромагнитных полей, а изменения спектра связаны с нелинейным рассеянием, которое зависит от температуры.

Таким образом, любое внешнее воздействие на волокно или окружающие его физические поля

оказывает паразитное влияние на процесс распространения света, которое может быть детектировано специальными техническими средствами. Сложность регистрации паразитных наводок компенсируется ценностью получаемой информации.

**Топология и инфраструктура волоконно-оптических коммуникаций в канале утечки информации.** На эффективность волоконно-оптического кабеля как распределенной измерительной системы большое влияние оказывает размещение кабеля в здании, использование инфраструктурных элементов для 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 имеют большое значение для нежелательных паразитных наводок на оптическое волокно.

Одним из главных элементов канала утечки является подключение к зондируемой оптической сети. Для наиболее эффективного зондирования подключение должно быть прямым к оптическому каналу, что позволяет создать канал утечки на максимальные расстояния и с максимальной эффективностью. С этой целью нарушитель может воспользоваться конструктивными особенностями оптической сети, такими как разъемные соединения через адаптер, оптические абонентские розетки, оптические кроссы, соединительные муфты и др. Техника подобных соединений хорошо известна и представлена на рынке.

**Оптическая рефлектометрия в сборе информации.** Одним из основных способов регистрации паразитных наводок является метод оптической рефлектометрии, который широко используется как в измерительной технике, так и в системах мониторинга волоконно-оптических линий связи [3]. Метод состоит в зондировании волокна импульсным или непрерывным оптическим излучением и регистрации обратного излучения, т. е. излучения, образованного в результате

взаимодействия зондирующего излучения с оптическими неоднородностями, дефектами оптического волокна и направленного в противоположную (обратно) относительно зондирующего излучения сторону, которое связано с явлениями рассеяния, отражения и генерации (переизлучения) света. Оптическая схема на отражение позволяет по времени задержки обратного излучения (отклика)  $\tau$  определять расположение исследуемого участка оптического кабеля, что имеет важное значение для формирования канала утечки информации. Расстояние по кабелю до места наблюдения рассчитывается по формуле

$$L = \tau c / 2n, \quad (1)$$

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 зондирования применяется излучение различного спектрального состава, когерентности, поляризации. Подбор параметров зондирующего излучения и методов регистрации позволяет получить достоверную информацию о состоянии волокна и процессах в окружающей волоконно-оптической среде. В частности, временная рефлектометрия используется для контроля таких параметров оптической сети, как потери, наличия дефектов и другого; бриллюэновские рефлектометры на основе спонтанного и вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна позволяют фиксировать распределение натяжений и распределение температур по длине оптического кабеля; когерентная оптическая рефлектометрия применяется в системах вибро-акустического контроля.

**Неоднородности волоконно-оптической сети.** Эффективность методов оптической рефлектометрии значительно повышается при формировании обратного излучения в кабеле от оптических неоднородностей, дефектов, т. е. участков волокна с локальным изменением показателя преломления, коэффициентов поглощения и рассеяния по размерам, сравнимым с длиной волны зондирующего излучения. Наличие оптической неоднородности приводит к увеличению мощности обратного излучения и повышает чувствительность волокна к внешним воздействиям и физическим полям. В волоконно-оптических измерительных системах формируются специальные участки с повышенной чувствительностью,

например, на основе волоконных решеток Брэгга, которые позволяют проводить высокоточные измерения деформаций, температуры, в других случаях применяются оптические волокна с повышенной чувствительностью к электромагнитным полям (оптические волокна с большим значением постоянной Верде, Керра, Поккельса) и так далее. Подобные структуры возможно создать и в обычных оптических структурированных кабельных системах, правда со значительно меньшей чувствительностью к внешним полям. Любая неоднородность ведет к росту влияния внешних воздействий на параметры световых потоков в волокне, что может быть использовано для формирования канала утечки побочной информации. Повышение мощности зондирующего излучения вызывает рост обратного излучения, что позволяет проводить измерения более удаленных участков кабеля с пониженными требованиями к регистрирующей аппаратуре.

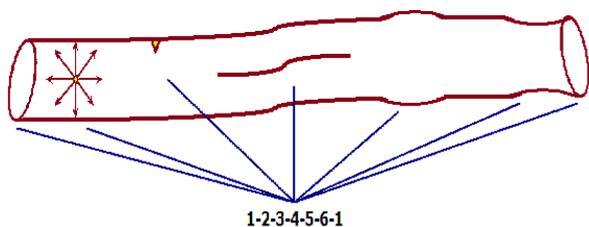
#### **Характеристика оптических неоднородностей в канале утечки информации**

Особенность волокна с оптической неоднородностью — увеличение чувствительности к внешним воздействиям локализованного участка волоконно-оптического кабеля, что значительно повышает эффективность регистрации информативных полей, циркулирующих вблизи неоднородности. Необходимо провести систематизацию оптических неоднородностей и выделить параметры, влияющие на эффективность формирования канала утечки.

**Классификация оптических неоднородностей (дефектов).** По типу возникновения, все неоднородности можно разделить на три группы, которые связаны с производством, инсталляцией и эксплуатацией волоконно-оптических кабельных систем.

- *Внутренние оптические неоднородности* (рис. 2) оптического волокна могут быть связаны с существующими дефектами, образованными при производстве волокна и кабеля, монтаже 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 оптической неоднородности волокна является их зависимость от качества используемого кабеля, качества монтажа и эксплуатации. Основной механизм образования обратных

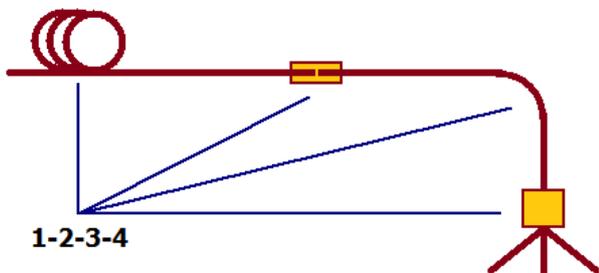
излучений связан с рассеянием Рэлея, которое равномерно распределяется по волокну. Но протяженные участки с повышенным или пониженным рассеянием формируют сигнал повышенной оптической мощности, который увеличивает его информативность.



**Рис. 2. Внутренние оптические неоднородности волокна:**

- 1 — эллиптичность; 2 — рассеивающий центр; 3 — трещина; 4 — неидеальность сердцевины при сварке; 5 — уширение; 6 — сужение

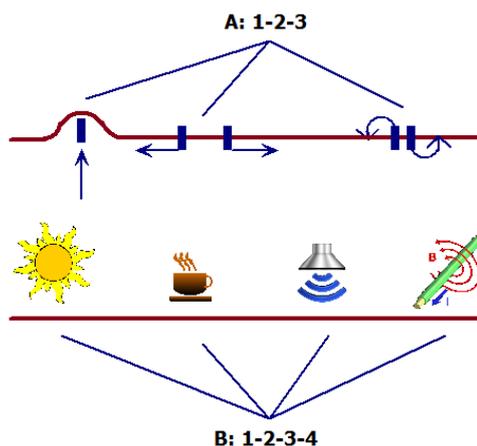
- **Инфраструктурные оптические неоднородности и дефекты** (рис. 3) связаны с выбором топологии и конструкцией кабельной системы. К ним относятся коммутационные узлы, разъемные и сварные соединения, угловые изгибы и скрутки кабеля, монтажные крепления кабеля и кабельных коробов и т. д. Каждый из элементов характеризуется собственным обратным излучением и потерями на прохождение света, которые существенно зависят от используемых технологий изготовления и установки, размещения, монтажа кабеля. В формировании паразитных модуляций данный тип неоднородностей имеет наибольшее разнообразие генерации информативных сигналов. Например, сварное соединение вносит локализованные потери около 0,1 дБ, по величине, равной суммарным потерям в оптическом волокне длиной порядка 1 км. Скрутка кабеля, его изгиб формируют механические напряжения в волокне, что вызывает появление в кварцевых волокнах двойного лучепреломления.



**Рис. 3. Инфраструктурные оптические неоднородности кабеля:**

- 1 — скрутка; 2 — разъем; 3 — изгиб; 4 — кросс

- **Индукцированные оптические неоднородности и дефекты** (рис. 4) вызваны непостоянными внешними воздействиями и полями, которые имеют естественное или искусственное происхождения. Их можно разделить на два вида — механические воздействия на оптический кабель и воздействие внешних физических полей. К первым относятся различные изгибы, растяжения-сжатия, скручивание, которым 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.



**Рис. 4. Индукцированные оптические неоднородности при механическом воздействии А:**

- 1 — изгиб; 2 — растяжение; 3 — кручение;
- при воздействии внешних физических полей В:**
- 1 — нагрев; 2 — давление-нагрев; 3 — одно тоновое акустическое поле; 4 — магнитное поле тока

Из всех типов оптических неоднородностей наибольшую угрозу несут индукцированные нарушения неоднородности. Они связаны с возможностью создания эффективных технических каналов утечки информации, которые определяются знанием топологии кабельной сети и воздействием на его элементы с целью повышения чувствительности к паразитным модуляциям и наводкам от информативных полей вблизи него.

**Параметры неоднородностей физического поля в канале утечки информации.** Сигнал утечки информации в канале утечки формируется физическим полем и воздействием, которое является информативным (рис. 5). Физическое поле характеризуется некоторым силовым параметром  $G$ , имеющим постоянную составляющую  $G_0 = \langle G \rangle$  и переменную составляющую  $\delta G$  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

$$g = \delta G / G_0. \quad (2)$$

Изменения параметров поля в пространстве характеризуется длиной однородности поля, которое обозначим как  $\Lambda$ .

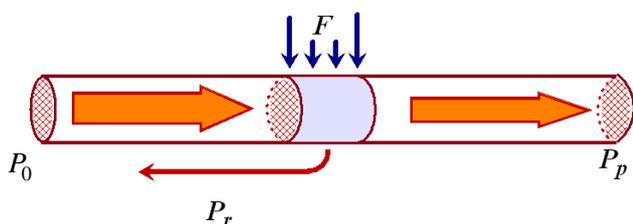


Рис. 5. Схематическое представление воздействия на оптическое волокно с дефектом внешним полем ( $F$ ) с зондирующим излучением ( $P_0$ ), часть которого проходит дефект ( $P_r$ ) и часть направляется обратно ( $P_r$ )

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. Большое 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 проходящего излучения и формировании обратного излучения, которые даются коэффициентом потерь

$$\beta_p = P_p / P_0 \quad (3)$$

и коэффициентом обратного излучения

$$\beta_r = P_r / P_0, \quad (4)$$

где  $P_0$  — мощность зондирующего излучения;  
 $P_p$  — мощность излучения, прошедшего неоднородность;

$P_r$  — мощность излучения, рассеянного/отраженного/переизлученного, 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

$$\delta \beta_p \sim \delta \beta_r. \quad (5)$$

Это важный вывод, так как в некоторых случаях позволяет заменить анализ обратных излучений на анализ мощности потерь, что может значительно упростить вычисления.

Внешнее переменное воздействие физического поля  $\delta G$  с глубиной модуляции  $g$  вызывает изменение мощности обратного излучения  $\delta P_r$  с глубиной модуляции

$$m = \delta P_r / P_r = \delta \beta_r / \beta_r. \quad (6)$$

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

$$\eta = m / g. \quad (7)$$

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

$$\delta P_r = (P_0 \beta_r \eta) g. \quad (8)$$

Полученное выражение показывает, что мощность сигнала утечки определяется мощностью зондирующего сигнала. Также справедливо утверждение, что возвращающаяся часть излучения полностью зависит от свойств оптической неоднородности. В некоторых случаях эта зависимость становится нелинейной, например, для бриллюэновской рефлектометрии, но в любом случае это основной параметр для формирования сигнала утечки. В формуле (8) 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

$$\tilde{m} = \delta P_p / P_p = \delta \beta_p / \beta_p, \quad (9)$$

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

### Волоконно-оптический канал утечки акустической информации

Близость оптических кабельных каналов к выделенным помещениям, где циркулирует конфиденциальная речевая информация, позволяет сформировать канал её утечки через волоконно-оптические коммуникации объекта путем акустического воздействия на световые потоки в волокне оптического кабеля.

**Паразитная акустическая модуляция.** Обсудим возникновение паразитных модуляций световых потоков на оптических неоднородностях в кабеле [4]. Звуковая волна является периодическим процессом упругих возмущений в среде в диапазоне частот приблизительно от 10 Гц до 20 кГц. В воздухе это — упругое сжатие-расширение с длиной волны от 34 м до 1,7 см, характеризующееся уровнем звукового давления (*sound pressure level* — *SPL*) в дБ относительно опорного значения 20 мкПа. За характерную частоту процесса можно принять 1,0 кГц с длиной волны 34,0 см, так что характерную длину однородности поля можно принять  $\Lambda = 17,0$  см, а *SPL* — 60 дБ (спокойный разговор). В этом случае большинство оптических неоднородностей  $l \ll \Lambda$ , поэтому процесс взаимодействия можно считать пространственно однородным.

Звуковая волна оказывает механическое воздействие на волокно, отклик которого характеризуется упругими свойствами оптического кабеля и дефекта в нем. Обозначим через  $x$  некоторую степень свободы внутри дефекта, которая оказывает влияние на коэффициент обратного излучения  $\beta_r$  и изменяется при внешнем воздействии акустического поля — акустического давления  $\delta p$ . Изменение давления в волне  $\delta p$  вызывает изменение параметра на  $\delta x$ , что, в свою очередь, изменяет

мощность обратного излучения на  $\delta \beta_r$ . Глубина модуляции определяется относительными изменениями коэффициента  $\beta_r$  так, что

$$m = \delta \beta_r / \beta_r = \delta x / x_0, \quad (10)$$

где  $x_0$  — некоторое характерное невозмущенное значение смещения в колебательной системе с линейной зависимостью  $\beta_r \sim x$ .

Основное действие акустического поля состоит в механическом воздействии на дефект, его сжатии-расширению изменяющимся давлением воздуха. Дефект как механическая система обладает резонансным откликом на механическое воздействие с набором собственных частот  $\{2\pi f_n\}$  и соответствующих им резонансным частотам. Тогда зависимость глубины модуляции от частоты внешнего воздействия для  $n$ -го резонанса будет иметь вид

$$m_n = \frac{\delta x_n}{x_0} = \frac{x_n f_n \gamma}{x_0 \pi (f_n^2 - f^2 + i f \gamma / \pi)}, \quad (11)$$

где  $x_n = S \delta p_0 / 4\pi M \gamma f_n$  — амплитуда резонанса на частоте  $f_n$  и амплитуде акустического давления  $\delta p_0$  для оптического дефекта массой  $M$  при площади поперечного сечения  $S$  и коэффициенте затухания механических колебаний  $\gamma$ .

Общая глубина модуляции  $m$  в виде отклика на широкополосное воздействие акустического поля определяется как среднее квадратичное значение от  $m_n$  по всему спектру частот, которое зависит от самого воздействия.

**Разъемное соединение.** В инфраструктуре кабельной сети разъемные соединения обеспечивают развитие информационной системы путем наращивания дополнительных элементов через разъемы и переходники. Это создает дополнительные опасности утечки речевой информации через паразитные модуляции акустическим полем на разъемах. Акустическая волна от источника звука, воздействуя на разъем, изменяет расстояние между волокнами, вызывает угловое и радиальное смещение соединяемых волокон. Формирование обратного излучения связано с отражением от тонкого слоя, который образуется при контакте двух волокон (рис. 6). Моделью подобной системы является интерферометр Фабри-Перо [2] на тонком слое толщиной  $d$  и показателем преломления  $n_0$ . В этом приближении коэффициент обратного из-

лучения определяется формулой Эйри для многолучевой интерференции на отражение

$$\beta_r = \frac{[4R \cdot \sin^2(\Delta\varphi/2)]}{[(1-R)^2 + 4R \cdot \sin^2(\Delta\varphi/2)]}, \quad (12)$$

где  $R$  — коэффициент отражения от границ слоя;  
 $\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} n_0 d \cos A$  — разность фаз соседних отраженных лучей;  
 $\lambda$  — длина волны света;  
 $A$  — угол падения света на слой.

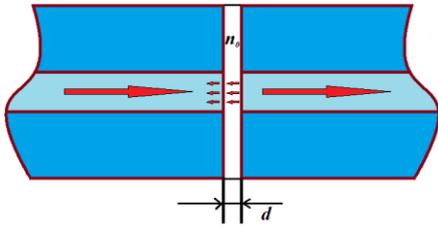


Рис. 6. Схематическое изображение разъемного контакта двух волокон, разделенных промежутком  $d$  с показателем преломления  $n_0$

В идеальном случае нормального падения ( $A = 0$ ) на плоскопараллельный слой (без клиновидности) толщиной менее длины волны света ( $d \ll \lambda$ ) с показателем преломления воздушной прослойки  $n_0 \approx 1,0$  и малым отражением от границы воздух—плавленый кварц  $R \approx 0,04 \ll 1$  получим

$$\beta_r \approx 6,4(d/\lambda)^2. \quad (13)$$

Глубина модуляции, вызываемая внешним акустическим воздействием, будет определяться выржением

$$m = 2\delta d / d_0 \leq 2d_m / d_0, \quad (14)$$

где  $d_0$  — расстояние между волокнами в невозмущенном состоянии;  
 $\delta d$  — возмущение;  
 $d_m \sim \delta p_0$  — резонансное осевое смещение волокон.

В предлагаемой модели не учитываются угловые и радиальные смещения волокон, которые вносят дополнительные паразитные модуляции, а также не учитывается угловое расхождение падающего света на отражающий слой. Но принятое приближение позволяет оценить опасность данного канала утечки информации. Во-первых, отражение  $\beta_r$  зависит от длины волны, что позволяет уменьшением длины волны зондирующего излучения увеличить мощность сигнала утечки, при

этом глубина модуляции не изменится. Во-вторых, если принять длину волны зондирующего излучения  $\lambda = 1$  мкм, то резонансное осевое смещение волокон можно оценить как  $d_m \ll d_0 \ll \lambda$ . На самом деле, при акустическом давлении  $\delta p_0 = 2 \cdot 10^{-2}$  Па (60 дБ SPL), если принять, что колебательную систему образует волокно длиной порядка  $l \approx 0,001$  м, плотностью  $\rho = M/Sl = 2,1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> (плавленый кварц), которая имеет резонансную частоту  $f_0$  и коэффициент затухания  $\gamma < f_0$  (примем  $\gamma = f_0 / \pi$ , что соответствует добротности  $Q = \pi^2$ ), тогда

$$d_m = C / f_0^2, \quad (15)$$

где  $C = Q\delta p_0 / 4p^2 \rho l \approx 2,4 \cdot 10^{-3}$  м·Гц<sup>2</sup> — константа в приближении для данного разъемного соединения.

В этом случае для резонансной частоты  $f_0 = 500$  Гц получим резонансное осевое смещение волокон  $d_m \approx 0,01$  мкм, а глубину модуляции можно оценить  $m \leq 20$  %, если оценить расстояние между волокнами в невозмущенном состоянии  $d_0 \approx 0,1$  мкм. При мощности обратно отраженного света  $10 \lg(P_r / P_0) = -50$  дБ для одномодового волокна получим, что мощность оптического сигнала утечки составит  $10 \lg(\delta P_r / P_0) \leq -57$  дБ, что вполне может быть зарегистрировано. В случае уменьшения оценки расстояния между волокнами в невозмущенном состоянии до значения, на порядок меньший ( $d_0 \approx 0,01$  мкм, случай хорошей обработки контактирующих поверхностей), получим мощность оптического сигнала утечки  $10 \lg(\delta P_r / P_0) \leq -50$  дБ при глубине модуляции  $m \leq 100$  %. В случае разъемного соединения многомодовых волокон отражение вырастает на два порядка и повышается глубина модуляции.

В обсуждаемой модели модуляции обратного и проходящего светового потоков акустическим полем являются связанными процессами. Рост отражения от контакта ведет к росту потерь на прохождение, так что  $|\delta P_p| = |\delta P_r|$ . Следовательно, глубина модуляции прошедшего излучения

$$\tilde{m} = (\beta_r / \beta_p) m \ll m. \quad (16)$$

Таким образом, глубина модуляции прошедшего излучения значительно меньше глубины отраженного излучения (т. е.  $\tilde{m} \ll m$ ), что объясняется тем, что мощность прошедшего контакт излучения значительно больше отраженного, а их изменения по абсолютной величине одинаковы (т. е.  $\beta_r \ll \beta_p$ ). Подобный результат показывает, что рефлектометрические методы формирования

канала утечки акустической информации более эффективны по сравнению с регистрацией паразитных модуляций проходящего светового потока.

Оценка эффективности канала утечки акустической информации по глубине модуляции показывает высокую опасность подобного подслушивания переговоров. Паразитная модуляция имеет значительную шумовую составляющую, которая связана с возможными искажениями вследствие нелинейности процесса с несколькими механизмами модуляции, с расхождением светового потока, так что сигнал утечки будет характеризоваться значительно меньшей общей эффективностью распознавания смысла речи или значения звука.

**Сравнение с экспериментом.** Проведенные ранее экспериментальные исследования глубины модуляции света на оптическом контакте многомодовых волокон подтверждают приведенные оценки [5]. Исследования проводились на экспериментальной установке (рис. 7), состоящей из оптического кросса, в котором размещался SC-SC адаптер многомодовых волокон, источник звука, микрофон контроля уровня звукового давления. На SC-SC адаптер поступало стабилизированное лазерное излучение, которое на выходе регистрировалось фотоприемником с селективным нановольтметром или интегрирующим вольтметром. В оптическом кроссе формировалось акустическое поле со спектром белого шума, что позволяло возбуждать все механические резонансы в оптическом контакте многомодовых волокон. Белый шум формировал паразитные модуляции интенсивности света, которые регистрировались фотоприемником. Применение селективного нановольтметра позволяло выполнять спектральные исследования световых модуляций с шириной полосы 25 дБ октавы.

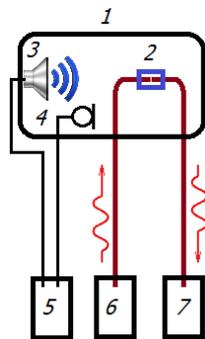


Рис. 7. Экспериментальная установка по исследованию паразитных модуляций в оптическом адаптере под действием звука:

1 — оптический кросс; 2 — SC-SC адаптер соединения многомодовых кабелей; 3 — источник звука; 4 — микрофон; 5 — генератор и приемник звука; 6 — волоконно-оптический источник света; 7 — волоконно-оптический фотоприемник

Результаты исследований представлены на графиках спектральной зависимости глубины модуляции (рис. 8) нахождение  $\tilde{m}(f)$  при фиксированных SPL белого шума и зависимости (рис. 9) глубины модуляции от уровня звукового давления  $\tilde{m}(SPL)$  для длин волн лазера  $\lambda = 850$  нм и 632,8 нм. Из первого графика можно получить, что данный SC-SC адаптер имеет глубину модуляции  $\tilde{m} \approx 0,9 \cdot 10^{-6}$  на резонансной частоте  $f_0 \approx 3$  кГц. Если принять  $(\beta_r / \beta_p) = 40$  дБ, что соответствует отношению мощностей отраженного и прошедшего излучения через контакт многомодовых волокон, тогда на резонансной частоте  $f_0 \approx 3$  кГц (это в 6 раз больше взятой для оценки частоты резонанса ранее) получим оценку резонансного смещения волокон  $d_m \approx 0,0003$  мкм и глубины модуляции  $\tilde{m} \approx 0,6 \cdot 10^{-6}$ . Это соответствует глубине модуляции отраженного излучения  $m \leq 0,6\%$ .

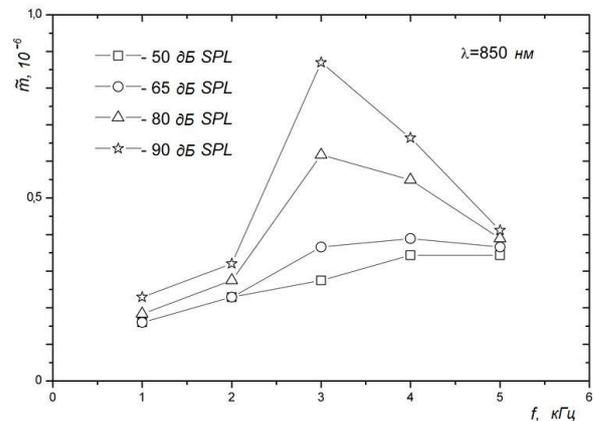


Рис. 8. Спектр глубины модуляции  $\tilde{m}(f)$  лазерного излучения на длине волны  $\lambda = 850$  нм в оптическом SC-SC адаптере многомодовых волокон при воздействии белого шума с различными уровнями звукового давления SPL

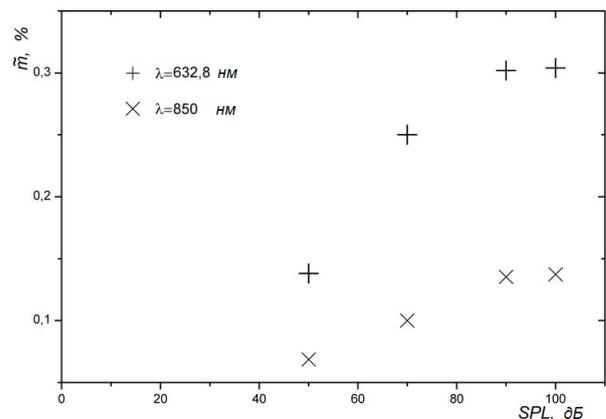


Рис. 9. Глубина модуляции  $\tilde{m}$  лазерного излучения на длинах волн  $\lambda = 850$  нм (полупроводниковый лазер) и 632,8 нм (гелий-неоновый лазер) в оптическом SC-SC адаптере многомодовых волокон при воздействии белого шума с различными уровнями звукового давления SPL

Сравнивая экспериментальное и теоретическое значения  $\tilde{m}$ , имеем совпадение порядков, а различие в 1,5 раза может быть связано с учетом других механизмов паразитных модуляций. Из второго графика следует подтверждение влияния длины волны зондирующего излучения на глубину модуляции, а также наблюдается насыщение при росте  $SPL$  белого шума, что соответствует насыщению механической колебательной системы. Но основной вывод состоит в том, что общая глубина модуляции излучения на прохождении контакта многомодовых волокон, связанная с вкладами по всему спектру, на четыре порядка превышает максимальную глубину модуляции на резонансной частоте. Следовательно, при переходе к рефлектометрическому методу регистрации глубина модуляции отраженного излучения может достигать 100 %. Приближение глубины модуляции к 100 % вызывает неизбежные нелинейные искажения, которые воспринимаются как дополнительный шум. Это существенно снижает разборчивость речи при замене белого шума речевым сигналом.

Заметим, что сравнение экспериментальных зависимостей (см. рис. 8) и теоретических оценок на основе резонансной кривой (формула 11, 14 и 15) возможно только для амплитуды и частоты ярко выраженного резонанса. Форма экспериментальной кривой  $\tilde{m}(f)$  отличается от формы резонансной кривой значительно, что связывается с особенностями измерения. Во-первых, селективный вольтметр измеряет интегральное действующее напряжение в заданной полосе частот пропорциональной ширине октавы. Если октава с центральной частотой  $f$  имеет ширину  $f/1,5$ , тогда для 25 дБ на октаву ширина полосы будет меньше октавы в 316 раз. Таким образом, ширина полосы вольтметра растет линейно с ростом центральной частоты  $f$ , что приводит к линейному росту измеряемого напряжения при воздействии сигнала со спектром белого шума, как зависимость  $\tilde{m}(f)$  на рис. 8. Во-вторых, механическая система оптический кросс-разъем обладает множеством резонансов с различными добротностями. При воздействии белого шума все они возбуждаются и формируют общий отклик, спектр которого является наложением друг на друга всех резонансов. В результате экспериментальная зависимость  $\tilde{m}(f)$  не совпадает с обычной резонансной кривой, например, на рис. 8 в зависимостях  $\tilde{m}(f)$ , кроме ярко выраженного резонанса на 3 кГц, наблюдается искажения на 4 кГц, что можно интерпретировать как дополнительный резонанс с меньшей добротностью. В-третьих, генерирующая белый шум акустическая система совместно с оптиче-

ским кроссом составляет собственную колебательную механическую систему, резонансы которой существенно искажают спектр белого шума. Кроме того, исследования проводились в обычной комнате, в которой собственный акустический фон достигал 50 дБ, что также влияло на форму экспериментальной кривой.

Аппроксимация экспериментальной зависимости  $\tilde{m}(f)$  в приближении единственного резонанса на частоте  $f_0$  и добротности  $Q$  при воздействии неискаженного белого шума описывается формулой

$$\tilde{m}(f) = \tilde{m}_{\max} \left| \frac{f_0 Q^{-1} f}{f_0^2 - f^2 + i f_0 Q^{-1} f} \right|, \quad (17)$$

где  $\tilde{m}_{\max}$  — максимальная глубина модуляции.

Результаты аппроксимации  $\tilde{m}(f)$  представлены на рис. 10 для добротности  $Q = 2$  и частоте резонанса  $f_0 = 3$  кГц (сплошная кривая), а также приведена линейная аппроксимация для механической системы без резонансов (пунктирная линия). Аппроксимация достаточно точно совпадает с экспериментальными результатами для белого шума 80 дБ  $SPL$ , что подтверждает механизм формирования паразитных модуляций света в оптическом разъеме при воздействии звука.

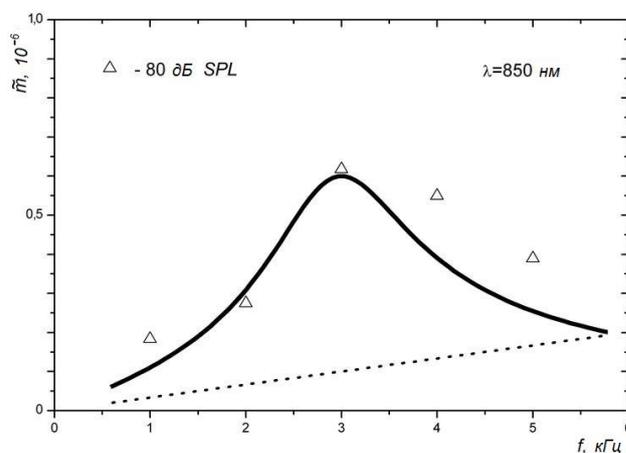


Рис. 10. Аппроксимация экспериментального спектра глубины модуляции  $\tilde{m}(f)$  при воздействии белого шума с 80 дБ  $SPL$  (сплошная линия — для механической системы добротностью  $Q = 2$  с частотой резонанса  $f_0 = 3$  кГц и пунктирная линия — для механической системы без резонанса)

В колебательной системе, образованной элементами оптического кабеля, существование механических резонансов в области частот речевого сигнала (как в данной случае, основная резонансная частота 3 кГц) должно значительно повышать

эффективность подслушивания вблизи оптического кабеля. При подаче речевого сигнала в акустическую систему экспериментальной установки и выводе детектированного сигнала с селективного нановольтметра на наушники получали речевой сигнал с разборчивостью слов до 100 %. Причем прослушивание может проводиться как в схеме зондирования на прохождение света, так и в схеме отражения, которое дает лучший результат разборчивости речи. Речь начинает прослушиваться с *SPL* от акустической системы порядка 40 дБ у кабеля (тихий разговор в тихой комнате). Это позволяет оценить расстояние не менее 5 м от источника речевого сигнала до оптического кабеля для нормального *SPL* речи, которое связано с ослаблением звукового сигнала вследствие свободного пространства. Если учесть дальность действия современных рефлектометров (до 250 км), то можно сделать вывод о возможности подслушивания переговоров вблизи оптического кабеля с расстояния более 100 км вдоль кабеля. При этом пространственное разрешение рефлектометра не влияет на зондирование, что связано с преобладающим уровнем отклика от самой неоднородности оптического канала по сравнению с другими однородными участками при формировании сигнала утечки.

На подобных физических принципах функционируют распределенные волоконно-оптические измерительные сети виброакустических колебаний, которые применяются в системах охраны территорий, трубопроводного транспорта и других объектов. Они позволяют выявлять нарушителя вблизи охраняемого объекта по механическому воздействию на расстоянии в несколько десятков километров. Простейший способ реализации прослушивания через волоконно-оптические коммуникации может быть осуществлен с помощью волоконно-оптического телефона с аналоговой модуляцией в речевом диапазоне. Например, на основе тестера-телефона волоконно-оптического Рубин-021 (НПП «ИТС», г. Санкт-Петербург) была реализована оптическая схема экспериментальной установки, описанная выше, и были получены результаты. Оптический тестер-телефон существует в компактном корпусе, и в нем реализованы функции, необходимые для зондирования непрерывным излучением в оптических схемах, описанных ранее.

#### Методы защиты акустической информации [4—8]

Защита объекта от утечки акустической информации через волоконно-оптические коммуни-

кации во многом дублирует стандартные методы защиты кабельных систем, но ей присущи свои особенности. Большое значение имеет структура канала утечки и физические принципы модуляции света.

**Структура канала утечки акустической информации.** В структуре такого канала утечки можно выделить три главных элемента:

- модуляция света в оптоволокне акустическими полями от источника информации;
- распространение сигнала по оптическим кабельным системам за пределы контролируемой зоны;
- зондирование и регистрация сигнала утечки нарушителем.

Каждый элемент канала утечки имеет свои слабые и сильные стороны в защите конфиденциальности информации, которые позволяют построить эффективную защиту.

Защиту может основываться на следующих императивах:

- минимизация паразитных наводок (модуляций) в оптической кабельной системе;
- ограничение выхода сигнала утечки за пределы контролируемой зоны;
- предотвращение или выявление нелегального подключения к оптической сети.

Для этих целей могут быть использованы методы экранирования кабельной системы от внешних физических воздействий и полей; фильтрация и зашумление сигнала утечки; детектирование паразитных модуляций и попыток зондирования.

Дальнейшее обсуждение методов защиты ориентировано на оптические кабельные системы связи (они более распространены и более часто встречаются по сравнению с волоконно-оптическими измерительными системами, системами безопасности и интерфейсами). Однако приводимые рассуждения остаются в силе для всех применений оптического кабеля.

**Акустическая экранировка оптического кабеля,** т. е. звукоизоляция, ослабление акустического контакта внешнего акустического поля с оптическим кабелем путем использования звукопоглощающих/отражающих материалов, применением оптического кабеля высокого качества, удалением кабеля от источника звука. Монтаж структурированной кабельной системы в офисе и здании производится с использованием кабельных коробов, лотков, коммутационных кроссов, терминальных элементов и т. д., где в оптическом кабеле образуются все типы неоднородностей. Основная часть неизбежна по конструкции сети. А другая часть неоднородностей может быть

создана нарушителем на необходимое время путем различных воздействий, а затем оптическая однородность быстро восстанавливается, поэтому акустическое экранирование неэффективно без постоянного контроля состояния структурированной кабельной системы. Основные рекомендации для экранирования состоят в следующем: вблизи источников конфиденциальной речевой информации качество кабеля должно быть наивысшим; топология сети включает минимальное число изгибов с максимально большим радиусом; все коммутационные элементы удалены, в противном случае на них должны быть установлены заглушки с акустическим экранированием.

**Фильтрация и зашумление сигнала утечки информации** [6, 7], т. е. отсечение паразитных модуляций и добавление к полезному сигналу шума, с помощью специального оборудования. Данный метод относится к активным методам и, как правило, требует прямого включения в оптическую сеть промежуточного активного оборудования, что противоречит концепции технологии пассивных оптических сетей. В некоторых случаях устройство защиты может не входить в состав оптической сети непосредственно, например, когда зашумление производится путем прямого воздействия внешнего шумового физического поля на сам кабель. В этом случае воздействие включается только в требуемые моменты времени и с требуемой мощностью. Отличительной особенностью фильтрации является возможность ее применения для любой сети, в том числе и неизвестной на паразитные модуляции.

**Обнаружение паразитных наводок (модуляций) и зондирующих излучений** [4, 8]. Защита акустической информации от утечек по оптической кабельной сети при паразитных акустических модуляциях света может быть построена на выявлении угрозы. Любая угроза утечки информации связана с двумя факторами: наличием эффективной паразитной модуляции в области, где она исключается; наличием зондирующих излучений. Первая особенность показывает на саму возможность такой утечки, вторая — указывает на реализацию угрозы. Особенностью утечки речевой информации является тот факт, что его источник, как правило, находится вблизи терминального сетевого оборудования. Это позволяет совместить трансивер с устройством защиты, когда в терминальном трансивере производится анализ световых потоков в сети и по фактам наличия паразитной модуляции и зондирующих излучений делается вывод об угрозах подслушивания.

**Нейтрализация информативных возвратных излучений** [9]. Одним из эффективных методов

зондирования является оптическая рефлектометрия, которая позволяет выделять информативный сигнал от конкретного участка кабеля. Противодействие каналам утечки на основе рефлектометрических методов является зашумление возвратных излучений, когда зондирующий сигнал рефлектометра следует по незашумленному участку, а возвратные излучения по участку с 100%-ым зашумлением. Создание такого устройства реализуется путем встречного несимметричного соединения 2-х выходов ответвителя 1X2 с ответвлением менее 10 % с 2-мя выходами такого же ответвителя, таким образом, что основной канал соединяется с ответвлением. В этом случае световой поток в прямом и обратном направлениях будет следовать по разным участкам устройства. При установлении генератора шума в одном участке получим слабо зашумленный поток (в прямом) для зондирующего излучения и сильно зашумленный поток (в обратном) для информативного сигнала.

## Заключение

Обсуждены физические принципы паразитных модуляций света в оптоволокне внешними физическими полями и акустической волной, в частности. Сделанная оценка возможной глубины модуляции сигнала утечки акустической информации при отражении от разъемного соединения показывает значительную опасность подслушивания через волоконно-оптические коммуникации. Из методов защиты выделяются детектирование угрозы подслушивания по мониторингу световых потоков в оптическом кабеле и несимметричное зашумление световых потоков при использовании рефлектометрических методов зондирования.

## Литература

1. Фриман Р. "Волоконно-оптические системы связи". — М.: Техносфера, 2003. — 514 с.
2. "Волоконно-оптические датчики" / Под ред. Э. Уда. — М.: Техносфера, 2008. — 520 с.
3. Листвин А. В., Листвин В. Н. "Рефлектометрия оптических волокон". — М.: ЛЕСАРпт, 2005. — 150 с.
4. Grishachev V. V. "Detecting threats of acoustic information leakage through fiber optic communication" // Journal of Information Security. 2012. No 3. P. 149—155. doi.org/10.4236/jis.2012.32017
5. 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.
6. Гришачев В. В., Халютин Д. Б., Шевченко Н. А. "Способ и устройство активной защиты конфиденциальной речевой

информации от утечки по акусто-опто-волоконному каналу на основе внешнего оптического зашумления" // Патент на изобретение РФ № 2 416 167 с приоритетом 27.04.2009.

7. Гришачев В. В., Халютин Д. Б., Шевченко Н. А. "Способы и устройства активной защиты речевой информации от прослушивания по акусто-опто-волоконному каналу утечки" // Патент на изобретение РФ № 2 416 166 с приоритетом 27.04.2009.

8. Гришачев В. В. "Волоконно-оптический детектор угроз утечки речевой информации через волоконно-оптические коммуникации" // Патент РФ на изобретение № 2 428 798 с приоритетом 14.09.2009.

9. Гришачев В. В. "Устройство защиты оптической сети от несанкционированного зондирования методами оптической рефлектометрии" // Патент РФ на изобретение № 2 551 802 с приоритетом 18.12.2012.

## Evaluation of depth of extraneous modulation of the light in optical cable system with heterogeneity

V. V. Grishachev, Yu. D. Kalinina, A. A. Tarasov

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

*Optical cable systems simultaneously with the fact that are data transmission medium, constitute a sensitive measurers of physical fields and acoustic fields, in particular. Their this property determines the possibility of voice information leakage channels. Based on the split optical fiber connections is shown danger eavesdropping talks by optical reflectometry of spurious acoustooptical modulations of light 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.*

*Keywords:* optical cable systems, spurious light modulation in optical fiber, eavesdropping talks.

Bibliography — 9 references.

*Received March 18, 2016*