

УДК 621.383:004.721

ПЕРЕХВАТ СИГНАЛА С БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

В. В. Шубин

(ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", г. Саров Нижегородской области)

Рассмотрены способы перехвата информации с боковой поверхности оптического волокна: пассивные, активные и компенсационные. Показано, что пассивные способы применяются только для многомодовых волокон. Для кабелей дальней связи с одномодовыми волокнами характерны только активные и компенсационные способы перехвата сигнала из сердцевины волокна. Представлена аналитическая зависимость для активных способов перехвата излучения, приведены экспериментальные и литературные данные для *интрузивных* и *неинтрузивных* способов. Представлен универсальный показатель эффективности и скрытности для всех способов перехвата. Рассмотрены компенсационные способы перехвата излучения для одноканальных и многоканальных волоконно-оптических систем.

Ключевые слова: боковое излучение, устройства вывода и сбора, ввода излучения, боковая поверхность оптического волокна, многомодовое градиентное и одномодовое оптическое волокно, пассивные, активные и компенсационные способы перехвата.

Введение

Перехват информации с оптического волокна кабеля занимает специалистов с момента появления волоконно-оптических систем передачи (ВОСП). Считалось, что применение оптических волокон вместо электрических устройств уже гарантирует защиту передаваемой информации от перехвата. Это утверждение имело основание, так как одномодовые оптические волокна не имеют побочного электромагнитного излучения и наводок. Но в наше время снятие информационного сигнала с любого волокна оптического кабеля даже на работающей ВОСП для специалиста в данной области не вызывает особых затруднений. Это доказано многократными экспериментами по перехвату информации с оптических волокон и кабелей работающей ВОСП [1–4].

Для информационных систем сегодня применяются два типа оптических волокон и кабелей. Для передачи информации на объектах информатизации применяются преимущественно многомодовые градиентные волокна [5]. Они используются вместе со светодиодными передатчиками и лазерами с широким спектром, приемниками на основе PIN фотодиодов и трансим-

педансных усилителей. Основным критерием здесь выступает их низкая стоимость (по сравнению с устройствами для одномодовых кабелей). Но они ограничивают скорость передачи (до 10 Гбит/с) и дальность (несколько сотен метров). Для дальней связи используют только кабели с одномодовыми волокнами. Они более дорогостоящие, но не имеют ограничений по скорости и дальности передачи.

Волокна различаются между собой не только по диаметру и профилю сердцевины (диаметр сердцевины 50 мкм для многомодовых волокон и 8 мкм для одномодовых), но по количеству мод и, как следствие, возможности существования естественного бокового излучения. В многомодовых волокнах существуют протяженные участки с повышенным естественным боковым излучением, в одномодовых волокнах это излучение отсутствует. Для снятия сигнала с одномодовых волокон необходимо вывести излучение из сердцевины, где оно участвует в передаче информации в системе. Следовательно, вносятся дополнительные потери в волоконно-оптическую линию передачи.

Одномодовые волокна и кабели всех производителей имеют разные параметры, форму пока-

зателей преломления и составы, но соответствующим классификации, связанной с рекомендациями Международного союза электросвязи, сектор телекоммуникаций (МСЭ-Т) [6–11]. Все современные многомодовые волокна подчиняются одной рекомендации МСЭ-Т [5].

Оптические кабели делятся на две большие группы: для внутренней (в помещениях) и внешней (вне помещений) прокладки [12]. Конструкция оптических кабелей для внешней прокладки обеспечивает их защиту от внешних воздействующих факторов (температуры, влажности и других). Для кабелей внутренней прокладки эти факторы исключены.

Классификация способов перехвата информации с оптического волокна

Все способы перехвата делятся на три большие группы [13]: *пассивные, активные и компенсационные*. Пассивные способы используют естественное боковое излучение. Активные способы предусматривают вывод дополнительного излучения из волокна через боковую поверхность. Компенсационные способы, кроме вывода дополнительного излучения, уменьшают потери в волокне за счет ввода сигнала с такими же параметрами обратно в волокно.

Пассивные способы характерны для многомодового волокна.

Активные способы делятся на средства без заметного вмешательства в среду передачи (*неинтрузивные*) и средства с заметным вмешательством нарушителя (*интрузивные*). При интрузивных способах передача по ВОСП информационных сигналов прерывается на несколько секунд, так что они могут быть обнаружены по пропаданию сигнала передачи. К этим способам относятся ответвление и туннелирование излучения, отжиг изгиба волокна. Неинтрузивные способы в первую очередь предназначены для перехвата информации с работающей ВОСП. Они применяются на изгибе волокна по малому радиусу на небольшую длину при внесении малых дополнительных потерь. Такие способы не могут быть обнаружены аппаратурой обычной ВОСП.

Для компенсационных способов, кроме вывода излучения, предусмотрен также ввод компенсирующего вывода сигнала, чтобы скрыть сам факт доступа к волокну. С учетом обратимости линейной оптики ввод излучения ничем не отличается от вывода. Но при вводе через защитное

покрытие волокна мощность оптического излучения на несколько порядков больше, чем при выводе. Это накладывает особые ограничения на агрегатное состояние защитного покрытия волокна из пластмассы. Компенсационные способы предусматривают полную и неполную компенсацию выведенного излучения. Способы с неполной компенсацией замещают только некоторые параметры сигнала, а способы с полной компенсацией заменяют сигнал полностью.

На рис. 1 представлена классификация способов перехвата сигнала с оптического волокна. Зеленым цветом обозначены способы, которые применяются для одномодовых кабелей, красным — для многомодовых волокон, желтым цветом отмечены способы, которые характерны для неработающей ВОСП.

Вероятность перехвата информации с оптического волокна

Перехват информации в виде сигналов с оптического кабеля предусматривает последовательное выполнение нескольких операций, которые сводятся к трем основным этапам: доступ к волокну, вывод сигнала и регистрация информации. Вероятность такого процесса равна произведению условных вероятностей [14]:

$$P_{\text{и}} = P_{\text{о}} P_{\text{с}}(P_{\text{о}}) P_{\text{р}}(P_{\text{о}}, P_{\text{с}}),$$

где $P_{\text{о}}$ — вероятность доступа к волокну; $P_{\text{с}}(P_{\text{о}})$ — вероятность вывода сигнала при условии, что доступ к волокну осуществлен; $P_{\text{р}}(P_{\text{о}}, P_{\text{с}})$ — вероятность регистрации информации при условии, что осуществлены доступ к волокну и вывод сигнала.

Доступ к волокну в оптическом кабеле, независимо от способа прокладки, достаточно хорошо отработан при монтаже и эксплуатации волоконно-оптических линий передачи. Для этого существуют технологии и соответствующие приборы и инструменты.

Вывод сигнала из волокна предусматривает перехват излучения с оптического волокна и преобразование оптического сигнала в электрический. Для дальней связи первое осуществляется оптическим устройством вывода и сбора излучения, второе — оптическим приемником перехвата с предельной чувствительностью. Состав приемника перехвата соответствует типу модуляции (амплитудная, фазовая, частотная, по длинам

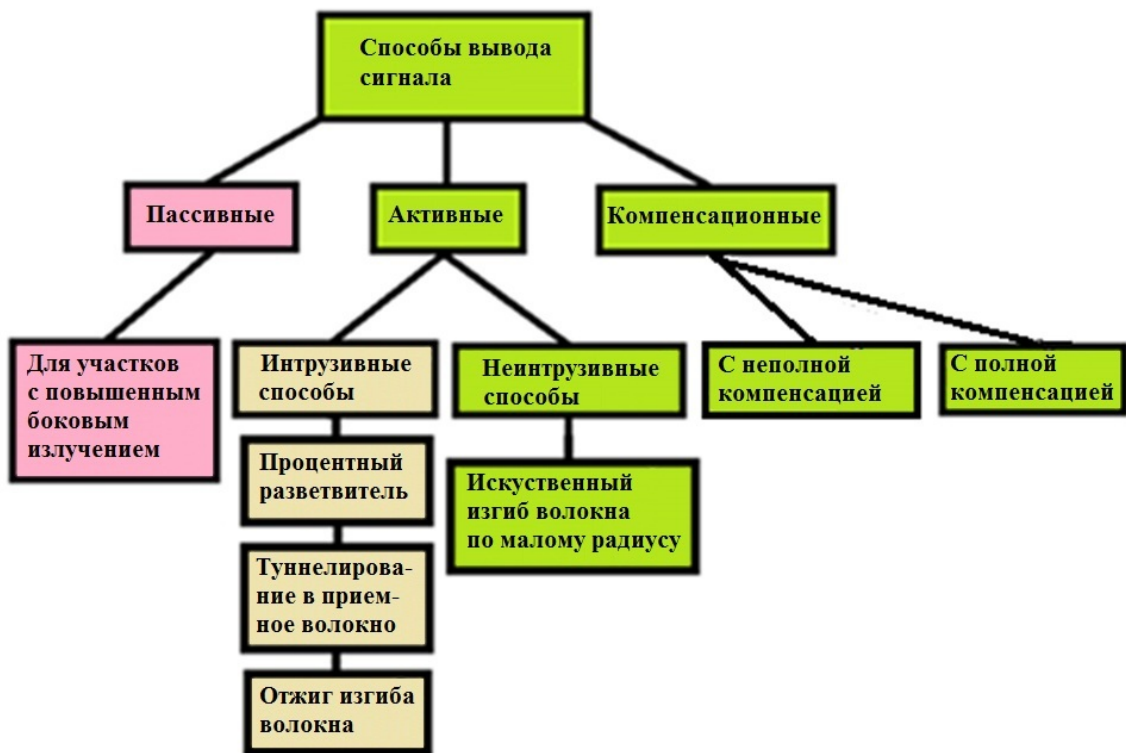


Рис. 1. Классификация способов вывода сигнала

волн или поляризации) и зависит от скорости передачи информации.

На объекте информатизации перехват информационного сигнала еще проще: можно воспользоваться традиционным бесконтактным (пассивным) способом, не вносящим изменений в параметры передачи для разных сред существования сигнала. Традиционные каналы утечки информации — побочное электромагнитное излучение и наводки, визуальный и другие способы — не вносят изменений в систему. Для съема данных нужен только чувствительный приемник для соответствующей среды передачи (электрический, оптический, эфирный).

Регистрация информации выполняется внешней программой на персональном компьютере или ЭВМ (комплексе ЭВМ, размещенных удаленно) путем статистического анализа (не в реальном масштабе времени) перехваченного сигнала на предмет извлечения из него передаваемой информации [1].

Источники естественного бокового излучения из оптического волокна

Рассеянное излучение (а не поглощенное) может быть естественным каналом утечки сигнала

из волокна за счет пассивных способов. Существуют две составляющие этого излучения: рэлеевское и МИ-рассеяние, которые различаются по своим физическим принципам. *Рэлеевское рассеяние* наблюдается только на частицах, сравнимых с длиной волны излучения, т. е. на кристаллической структуре самого кварцевого стекла — материала, из которого изготовлено волокно. Это явление принципиально не устранимо и является основным источником потерь в современном волокне. *МИ-рассеяние*, наоборот, — физический процесс на частицах, больших по размеру, чем длина волны. Для современных волокон МИ-рассеянное излучение сосредоточено при переходе от волокна в оптический кабель, и его стремятся уменьшить. На рис. 2 представлены спектр современного одномодового волокна для ВОСП, его составляющие (обозначены цифрами), участки для современных систем (закрашены желтым цветом) и потери из-за волноводных нерегулярностей (МИ-рассеяние, закрашено розовым цветом) [14].

Затухание от рассеяния Рэля для волокна зависит от длины волны, и его принято оценивать по формуле [15]

$$\alpha_{pp} = \frac{C}{\lambda^{-4}} \text{ [дБ/км]},$$

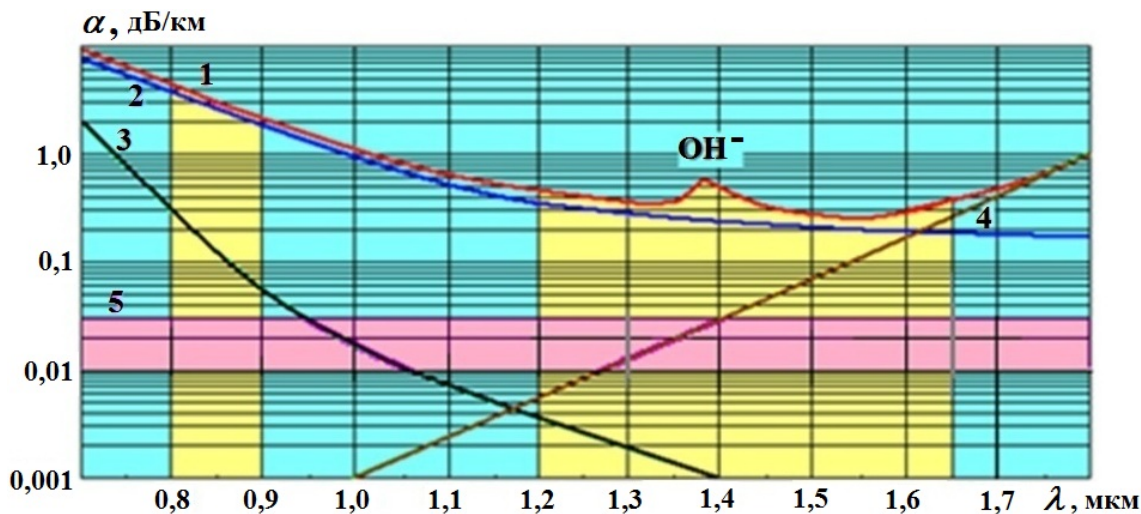


Рис. 2. Спектральная характеристика потерь в волокне (1) и составляющие ее потери, вызванные разными факторами: 2 — рассеянием Рэля; 3 — ультрафиолетовым поглощением; 4 — инфракрасным поглощением; 5 — МИ-рассеянием; OH^- — поглощением гидроксильной группой [14]

где C — коэффициент (для кварцевого стекла $C = 0,7 \div 0,9 \text{ мкм}^4 \cdot \text{дБ/км}$); λ — длина волны в мкм.

Максимальное значение потерь от рэлеевского рассеяния лежит в диапазоне длин волн $0,8\text{--}0,9 \text{ мкм}$ и составляет около 3 дБ/км (см. рис. 2). На 1 м волокна потери рассеянного излучения составляют уже менее $0,003 \text{ дБ}$, а излучение на боковой поверхности волокна — и того меньше. Естественное боковое излучение меньше порога чувствительности приемника перехвата. Единственным путем увеличения рассеянного излучения является увеличение длины волокна, с которого оно снимается. Надо помнить, что в зависимости от скорости распространения информационный импульс занимает определенную длину волокна, которая не может быть превышена. При гауссовой форме импульса эта длина становится еще меньше и достигает десятых долей от расчетного значения. Увеличение длины волокна сопряжено с техническими трудностями [16, 17]. Таким образом, рэлеевское рассеяние не может быть единственным каналом утечки информации из волокна.

Надо обратить внимание на другие механизмы образования естественного бокового излучения, зависящие от типа среды передачи, т. е. от того, является ли волокно одномодовым или многомодовым. На рис. 3 представлены схемы передачи излучения в обоих типах волокон [18].

Излучение в одномодовом волокне сосредоточено в модовом пятне, расположенном преимуще-

ственно в сердцевине волокна (гауссово распределение). А на границе *оболочка — защитное покрытие* интенсивности естественного бокового излучения практически нет. Влияние на потери в одномодовом волокне кабельных потерь (при изготовлении и монтаже оптического кабеля) сведено к минимуму. Так что рассеянным излучением можно пренебречь.

В многомодовых волокнах существует большее количество мод, в том числе в оболочке. За счет них многомодовые волокна обладают естественным боковым оптическим сигналом. Это обеспечивается излучаемыми и вытекающими модами (ИМ и ВМ), излучение которых сосредоточено в оболочке волокна. Интенсивность естественного бокового излучения на некоторых участках повышается, и это представляет собой угрозу для безопасности информации. Как уже было отмечено, многомодовые волокна проигрывают одномодовым по скорости и дальности передачи и поэтому применяются только на объектах информатизации для соединения устройств. В табл. 1 представлены классы (ОМ1—ОМ4) современных градиентных многомодовых волокон для информационных систем [19].

Таким образом, естественное боковое излучение характерно для многомодовых волокон и повышается на некоторых его участках за счет мод, сосредоточенных в оболочке.

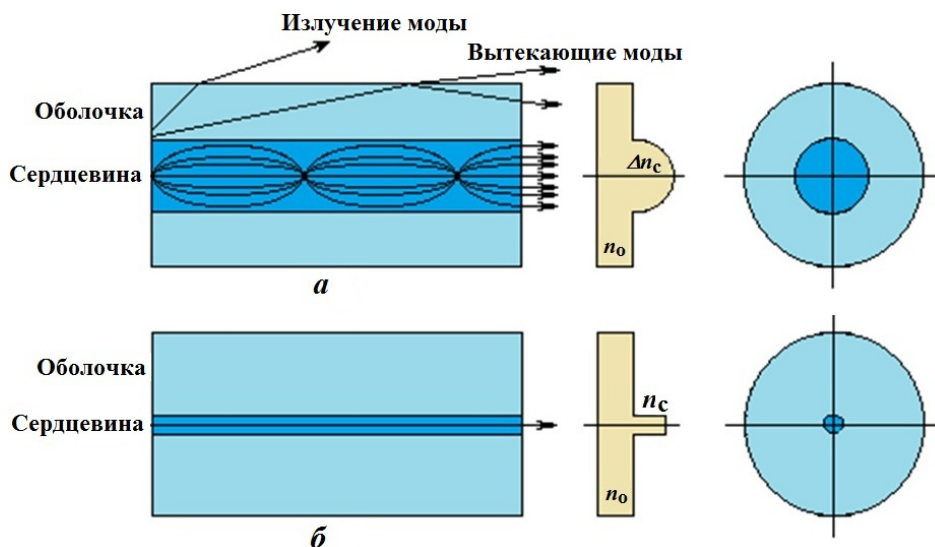


Рис. 3. Основные параметры передачи в многомодовом градиентном (а) и стандартном одномодовом (б) волокнах [18]

Таблица 1

Классы, основные параметры и применение многомодовых волокон [19]

Класс волокна	Диаметры сердцевин/оболочки, мкм	Коэффициент широкополосности, МГц/км		Применение
		$\lambda = 850 \text{ нм}$	$\lambda = 1300 \text{ нм}$	
OM1	62,5/125	200	500	Не рекомендуется использовать в новых системах
OM2	50/125	500	500	Скорость передачи до 1 Гбит/с, дальность до 550 м
OM3	50/125	1500	500	Оптимизировано для применения лазеров (при $\lambda = 850 \text{ нм}$ широкополосность 2000 МГц/км). Скорость передачи до 10 Гбит/с, дальность до 300 м
OM4	50/125	3500	500	Оптимизировано для применения лазеров (при $\lambda = 850 \text{ нм}$ широкополосность 4700 МГц/км). Скорость передачи до 10 Гбит/с, дальность до 300 м

Участки повышенного естественного бокового излучения в волокнах

Первым участком повышенного бокового излучения для многомодовых волокон является участок около источника излучения. Применение светодиодов и лазеров с широким спектром излучения способствует проникновению излучения в отражающую оболочку волокна, что вызывает излучение, сосредоточенное в ИМ и ВМ волокна.

Стационарное модовое распределение (когда нет бокового излучения от ИМ и ВМ) формируется не сразу, а через некоторое расстояние, называемое *дистанцией модового равновесия* [19]. Этот участок характеризуется избыточным боковым излучением, которое обусловлено ИМ и

ВМ. Дистанция установления модового равновесия, на которой высвечивается 90% излучения ИМ и ВМ для прямого идеального оптического волокна, может быть оценена по следующей приближенной формуле [20]:

$$L_p = \frac{\rho \exp(V/2)}{2NA} \tag{1}$$

Здесь ρ — радиус сердцевины волокна; NA — числовая апертура волокна: $NA = (n_c^2 - n_o^2)^{1/2}$ для ступенчатых волокон и $NA = [(n_c^2(z) - n_o^2)/2]^{1/2}$ для волокон с градиентным профилем, где n_c — показатель преломления сердцевинны волокна (z — поперечная координата); n_o — показатель преломления оболочки волокна; $V = 2\pi\rho NA/\lambda$ — нормированная частота волокна; λ — рабочая длина волны. Число мод в

волокне N может быть определено по формулам [20] $N = V^2/2$ для ступенчатого профиля показателя преломления волокна и $N = V^2/4$ для градиентного профиля (округляется до целого значения в меньшую сторону).

Дистанция равновесия (1) для стандартного одномодового волокна составляет всего 17 мкм для одной моды, а для градиентного многомодового волокна с 400 модами с типовыми параметрами — 6 000 м. Таким образом, для градиентного многомодового волокна дистанция равновесия простирается на всю длину ВОСП на объекте информатизации.

На рис. 4 показана экспериментальная зависимость коэффициента вывода естественного бокового излучения $A_{\text{во}}$ от длины для многомодового градиентного волокна на длине волны 850 нм при использовании светодиодного источника излучения ИЛПН-301 [14]. Начальный коэффициент вывода $A_{\text{во}}$ равен отношению интенсивностей естественного выходящего излучения (за оболочкой или защитным покрытием) на приемнике с активной площадкой длиной 2 мм и излучения, сосредоточенного в волокне.

Вторым участком повышенного бокового излучения для многомодовых волокон является участок их соединения между собой. Излучение из сердцевины проникает в оболочку волокна. Для многомодовых кабелей на объекте информатизации присутствуют как разъёмные, так неразъёмные соединения [12].

На рис. 5 показаны экспериментальные зависимости начального коэффициента вывода $A_{\text{во}}$, измеренные на длине волны 850 нм, от расстояния от сварного соединения с потерями 0,5 дБ при использовании светодиодного источника ИЛПН-301 [14].

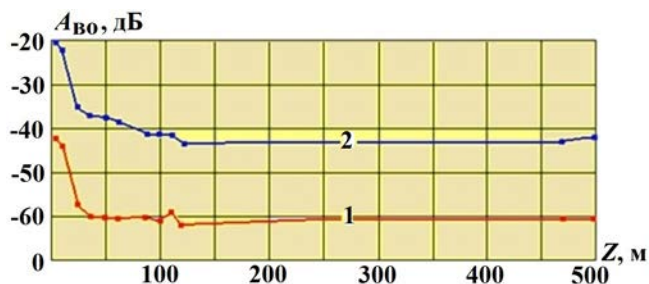


Рис. 4. Измерения бокового излучения на начальном участке волокна [14]: 1 — за защитным покрытием волокна; 2 — за отражающей оболочкой волокна

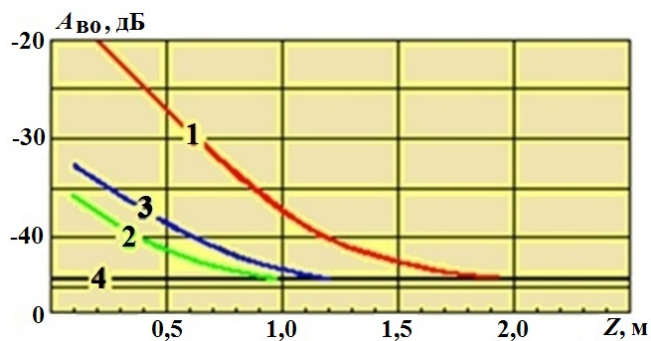


Рис. 5. Зависимость коэффициента вывода бокового излучения от расстояния от сварного соединения [14]: 1 — соединение помещено в эпоксидный компаунд; 2, 3 — соединение в компаунде с сажей соответственно до и после ее кристаллизации; 4 — уровень бокового излучения в волокне

На рис. 6 показаны экспериментальные зависимости начального коэффициента вывода $A_{\text{во}}$, измеренного на длине волны 850 нм на расстоянии 5 м от разъёмного соединения, в зависимости от дополнительных прямых потерь $A_{\text{п}}$ между соединяемыми волокнами при использовании излучателя ИЛПН-301 [14]. Прямые потери между соединяемыми волокнами обусловлены их осевым и радиальным смещениями.

Таким образом, для многомодовых волокон на объектах информатизации есть протяженные участки с повышенным естественным боковым излучением около источников излучения или соединения волокон. Для одномодовых волокон участки с повышенным боковым излучением отсутствуют.

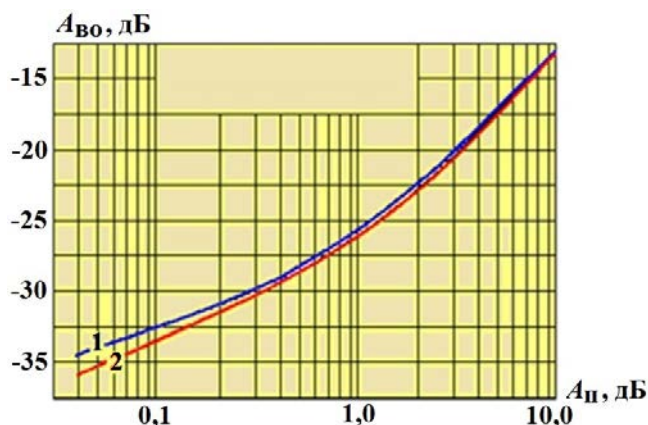


Рис. 6. Зависимость коэффициента вывода от осевого (1) и радиального (2) смещений на расстоянии 5 м от разъёмного соединения [14]

Активные устройства вывода и сбора оптического излучения

Активные устройства перехвата излучения применяются, в основном, для одномодовых волокон. В их состав входят оптические устройства вывода и сбора [14], оптические усилители и приемники с предельной чувствительностью. Оптический вывод определяет основные параметры всего устройства перехвата в целом: внесимые потери и мощность отводимого излучения в соответствии с зависимостью [14]

$$A_d = -10 \lg (1 - 10^{0,1A_B} K_{\Pi}^{-1}) \text{ [дБ]},$$

где A_d — коэффициент дополнительных потерь излучения в волокне; A_B — коэффициент вывода излучения через боковую поверхность волокна на входной полюс устройства перехвата; K_{Π} [отн. ед.] — коэффициент передачи излучения через боковую поверхность волокна.

На рис. 7 показаны расчетные кривые зависимости A_d от A_B при различных K_{Π} , экспериментальные и литературные данные, полученные разными производителями исходя из разных физических принципов. При неограниченном увеличении коэффициента A_d коэффициент A_B стремится к значению $10 \lg K_{\Pi}$, которого так и не достигает [14].

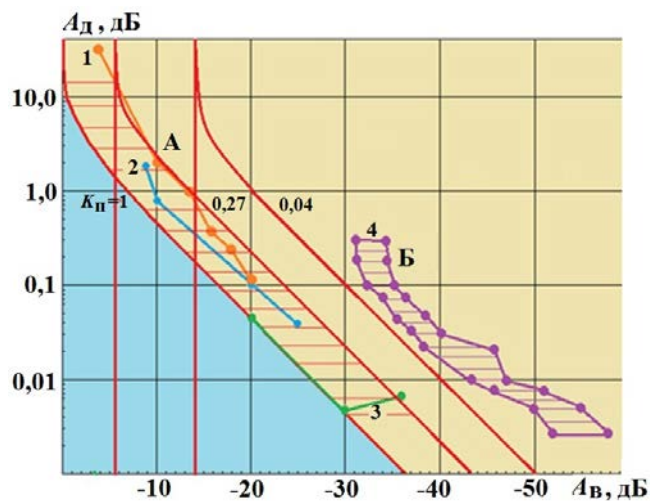


Рис. 7. Зависимость дополнительных потерь от вывода излучения [14]: А — интрузивные способы вывода; Б — неинтрузивные способы вывода; 1 — процентные ответвители; 2 — отжиг изгиба волокна; 3 — туннелирование излучения в другое волокно; 4 — устройство вывода, основанное на изгибе волокна

Данные по интрузивным и неинтрузивным активным способам перехвата излучения представлены на рис. 7 для длины волны 1550 нм. К интрузивным способам относятся процентные ответвители, туннелирование в другое волокно и отжиг изгиба волокна. В этих способах применяется электрическая дуга, которая гарантирует на несколько секунд отключение передачи сигналов во всех ВОСП.

Тем не менее в литературе сообщается, что при использовании туннелирования и внесенных потерях $A_d = 0,07$ дБ вывод составляет $A_B = -36$ дБ (коэффициент передачи излучения $K_{\Pi} = 0,2$) [21], а при потерях $A_d = 0,04$ и $0,004$ дБ — и того меньше: $A_B = -20$ и -30 дБ соответственно (коэффициент передачи $K_{\Pi} \approx 1$) [22].

К неинтрузивным способам относятся изгиб волокна по постоянному радиусу малой длины и передача излучения на другое (с оптической системой) приемное оптическое волокно. Действие может быть осуществлено на работающей системе, так как оно не воздействует на передачу сигналов обычной ВОСП.

На рис. 8 показана схема изгиба волокна, реализованная во многих устройствах съема (см., например, [23]). На рис. 7 показаны только крайние значения внесенных потерь при коэффициентах вывода для этого способа. Разброс показаний обусловлен свойствами прижима исследуемого волокна и другими параметрами соединения. К этому добавляется неопределенность в размерах модового пятна для волокон, соответ-

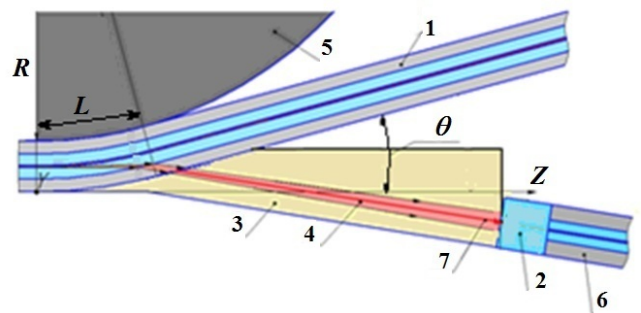


Рис. 8. Схема изгиба волокна по постоянному радиусу: 1 — исследуемое оптическое волокно; 2 — приемная оптическая система; 3 — иммерсионная среда; 4 — пучок излучения, выходящий на изгибе волокна; 5 — изгибная оправа; 6 — приемное одномодовое волокно; 7 — ось вектора Умова—Пойтинга; R , L и θ — радиус, длина и угол изгиба соответственно

ствующих рекомендациям МСЭ-Т [6–11], которая существует даже для одного и того же типа волокон одного и того же производителя (см., например, рис. 9).

Тем не менее изгиб волокна считается самым эффективным и скрытным (с минимальными потерями при выводе и в волокне) по сравнению с другими способами перехвата излучения. При таком способе устройство не прерывает передачу информационного сигнала по ВОСП.

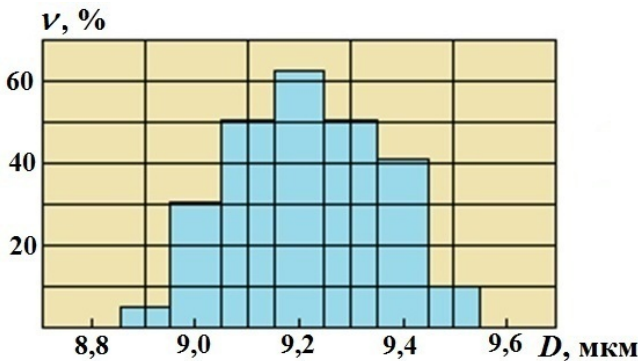


Рис. 9. Гистограмма распределения диаметров модовых пятен для одномодового волокна [20]

Эффективность и скрытность активных способов съема излучения с боковой поверхности волокна

Устройство съема излучения должно, с одной стороны, быть скрытным, а с другой стороны, эффективным. Оба эти показателя одновременно характеризуются коэффициентом передачи бокового излучения K_{Π} с исследуемого волокна на входной полюс приемника перехвата. Чем больше этот коэффициент, тем лучше (коэффициент меньше единицы). Коэффициент передачи для вывода бокового излучения равен [14]

$$K_{\Pi} = \frac{10^{0,1A_{\text{в}}}}{1 - 10^{-0,1A_{\text{д}}}} = \eta\tau \text{ [отн. ед.]},$$

где η [отн. ед.] — эффективность ввода излучения с боковой поверхности волокна на входной полюс приемника перехвата; τ [отн. ед.] — коэффициент пропускания бокового излучения на входной полюс приемника перехвата.

Пропусканием системы в предельном случае можно пренебречь: $\tau = 1$. То есть коэффициент передачи бокового излучения определяется только эффективностью ввода излучения в приемное волокно η .

Эффективность ввода в приемное волокно можно определить по формуле (в гауссовом приближении), выведенной для согласования источника с волокном [24]:

$$\eta = K \exp \left(-K \left[\frac{x_o^2}{2} \left(\frac{1}{w_1^2} - \frac{1}{w_0^2} \right) + \frac{\pi^2 \theta^2 (w_1^2 + w_0^2)}{2\lambda^2} - \frac{\theta z x_o}{w_1^2} \right] \right),$$

где $K = \frac{4w_1^2 w_0^2}{(w_1^2 + w_0^2) 2 + \lambda^2 z^2 / \pi^2}$; x_o — смещение оси приемника от оси волокна; w_1 и w_0 — передающий и приемный радиусы модовых пятен; θ — угол наклона оси приемника относительно оси волокна; λ — длина волны излучения; z — продольное смещение между модовыми пятнами.

При смещении, равном нулю ($z = x_o = 0$), и равенстве модовых пятен ($w_1 = w_0 = w$) предельная эффективность ввода излучения составляет

$$\eta = \exp \left(-\frac{\pi^2 \theta^2 w^2}{\lambda^2} \right) \text{ [отн. ед.]}.$$

При идеальном согласовании для длины волны эффективность зависит только от угла размещения оси приемного устройства θ и радиуса модового пятна w . В табл. 2 приведены значения предельной эффективности для одномодовых волокон в зависимости от размера модовых пятен, которые взяты из рекомендаций МСЭ-Т [6–9]. Угол наклона оси приемного устройства θ взят равным 10° .

Из табл. 2 видно, что размер модового пятна непостоянен для волокон даже одного стандарта. Более того, разброс размеров модового пятна наблюдается для одного и того же типа волокна одного и того же производителя. Это определяется технологиями изготовления волокна и его компонентов, условиями прокладки оптического кабеля.

На рис. 9 представлена гистограмма распределения (ν — частота появления) диаметров модовых пятен D по длине волокна для одного и того же одномодового волокна на длине волны 1310 нм [20].

Из рис. 9 и табл. 2 видно, что мощность перехвата не определена и во многом зависит от угла размещения оси приемного устройства. Расположение оси приемного устройства должно совпадать с направлением вектора Умова—Пойтинга выходящего излучения, которое опре-

Предельная эффективность одномодовых волокон для угла наклона $\theta = 10^\circ$

Рекомендация МСЭ-T [6–9]	Длина волны, нм	Радиус модового пятна, мкм	Предельная эффективность, η
G.652	1 310	4,30–4,75	0,041–0,020
G.652	1 550	5,03–5,38	0,040–0,028
G.653	1 550	3,90–4,25	0,154–0,108
G.654	1 550	4,75–5,25	0,062–0,034
G.655	1 550	4,00–5,50	0,139–0,024

деляется углом [25]

$$\Theta = \arccos\left(\frac{R + r_c}{R + r_o}\right) \text{ [град]},$$

где R — радиус изгиба волокна; r_c , r_o — радиусы его сердцевин и оболочки (соответственно 4,15 и 62,5 мкм для стандартного одномодового волокна).

Направление оси приемного устройства определяется радиусом изгиба волокна, а его минимальное значение зависит от прочности и долговечности (излом волокна начинается при его изгибе с радиусом 0,8 мм). Чем меньше угол между осями волокна и приемного устройства, тем больше эффективность. Чем больше радиус изгиба, тем больше длина изгиба и тем меньше выводимое излучение. Таким образом, радиус и длину изгиба надо уменьшать.

Компенсационные устройства перехвата оптического излучения

Компенсационные устройства перехвата оптического излучения с одномодовых волокон обеспечивают полную компенсацию выведенного через боковую поверхность излучения. Выведенное из волокна излучение в предельном случае компенсируется мощностью, вводимой в волокно с помощью устройства ввода на той же длине волны при полном совпадении параметров излучения. В этом случае в волокно вносятся только локальные потери, численно равные разности потерь устройств вывода и ввода излучений. Потери в исследуемом волокне от устройств ввода/вывода не важны (системой воспринимается только их разность), но важна мощность в выводимом канале.

Поэтому для компенсационных способов подходят устройства с минимальными потерями в

выводимом (третьем) канале, а потери в основном волокне можно не учитывать. Серийно выпускаемые приборы, которые изначально использовались для других целей, обеспечивают максимальный коэффициент вывода и идеально подходят для данных устройств [26].

На рис. 10 показаны устройства вывода и ввода на два оптических волокна (полный дуплекс) на основе серийно выпускаемого ответвителя-прищепки FOD-5503. Задействованы четыре устройства для дуплексной передачи сигналов.

На рис. 11 показана компенсационная схема устройств перехвата оптического излучения с волокна для одноканальных и многоканальных ВОСП.

Выводимый и вводимый сигналы должны совпадать по нескольким параметрам: мощности, фазе, частоте, длине волны и др. Но данное утверждение не справедливо для времени реакции, которое не может быть равно времени между выводом и вводом, а определяется переходными процессами. Этот фактор может быть при-

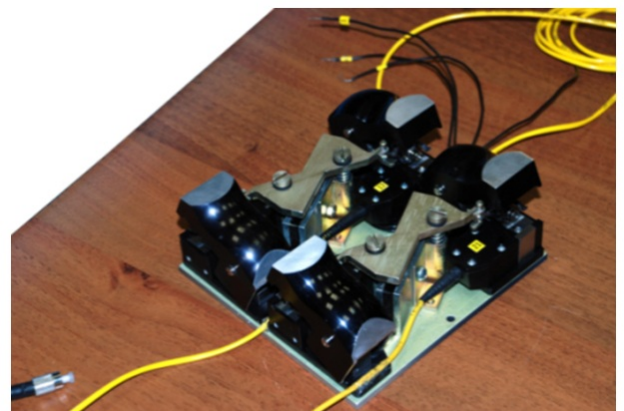


Рис. 10. Устройства вывода и ввода излучения на основе FOD 5503

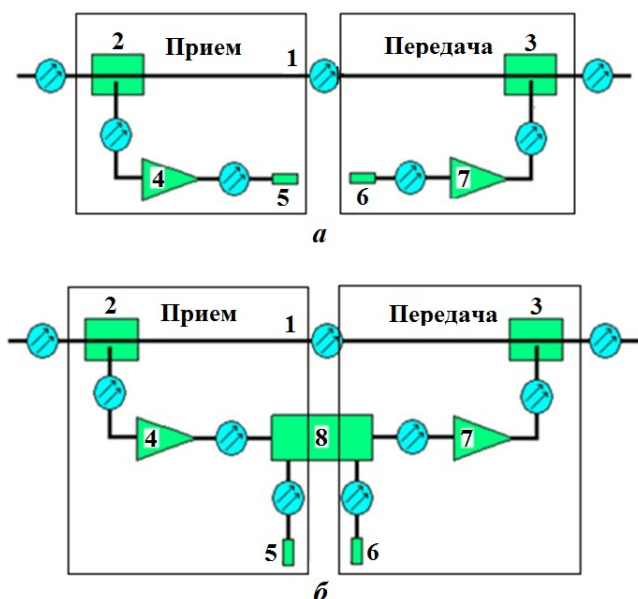


Рис. 11. Схемы компенсационных устройств для одноканальных (а) и многоканальных (б) систем: 1 — исследуемое оптическое волокно; 2 — оптическое устройство вывода и сбора; 3 — оптическое устройство ввода; 4, 7 — оптические усилители; 5 — выход; 6 — вход; 8 — мультиплексор ввода/вывода

няют за норму компенсационного излучения в случае, если все остальные параметры выведенного и введенного излучений равны между собой.

Таким образом, перехват сигнала за счет естественного бокового излучения можно осуществить только для моноמודовых волокон. На объекте информатизации присутствуют протяженные участки многомодового волокна — около источников излучения и соединения волокон, где естественное боковое излучение повышено. В этом случае можно применять пассивные способы перехвата.

Для одномодовых волокон дальней связи перехват возможен только при выводе излучения из сердцевины волокна. При этом вносятся дополнительные потери в линию связи. В этом случае применяются активные и компенсационные способы перехвата информации. На работающей ВОСП могут применяться только неинтрузивные способы (без вмешательства в передачу).

Список литературы

1. Икбал М. З., Фатхалла Х., Белхадж Н. Скрытное подсоединение к оптоволокну: методы и предосторожности. <http://abrahabr.ru/post/167766>. Iqbal M. Z., Fatkhalla Kh., Belkhadzh N. Skrytnoye prisoedineniye k optovoloknu: metody i predostorozhnosti. <http://abrahabr.ru/post/167766>.
2. Способы предотвращения съема информации через излучение ВОЛС. <http://studref.com>. Sposoby predotvrashcheniya syema informatsii cherez izlucheniye VOLS. <http://studref.com>.
3. Oster optics. Securing Fiber Optic Communications against Optical Tapping Methods. <https://www.oysteroptics.com>.
4. Olzak T. Protect Your Network against Fiber Hacks. May 3rd, 2007. www.techreudlic.com.
5. ITU-T. G.651.1. Characteristics of a 50/125 μm multimode graded index optical fibre cable.
6. ITU-T. G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre and cable.
7. ITU-T. G.653. Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable.
8. ITU-T. G.654. Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre and cable.
9. ITU-T. G.655. Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable.
10. ITU-T. G.656. Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport.
11. ITU-T. G.657. Characteristics of a Bending Loss Insensitive Single Mode Optical Fibre and Cable for the Access Network.
12. ПТ плюс. Оптические коммуникации. Издание 8. <https://www.ptfiber.com>. PT plus. Opticheskie kommunikatsii. Izdanie 8. <https://www.ptfiber.com>.
13. Волков А. П., Зайцев А. Л., Ивченко С. Н., Краценко И. А., Курило А. П., Попов С. Н., Шубин В. В. Исходные данные для построения модели съема информации, передаваемой по волоконно-оптическому тракту // Вопросы защиты информации. 1989. № 1 (24). С. 37—42.

- Volkov A. P., Zaytsev A. L., Ivchenko S. N., Krashchenko I. A., Kurilo A. P., Popov S. N., Shubin V. V.* Iskhodnye dannye dlya postroeniya modli syema informatsii, peredavaemoy po volokonno-opticheskomu traktu // *Voprosy zashchity informatsii*. 1989. № 1 (24). S. 37–42.
14. *Шубин В. В.* Информационная безопасность волоконно-оптических систем. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015.
Shubin V. V. Informatsionnaya bezopasnost volokonno-opticheskikh sistem. Sarov: RFYaTs-VNIIEF, 2015.
15. *Ирогачев Д. В., Бондаренко О. В.* Волоконно-оптические кабели и линии связи. М.: Эко-Тренз, 2002.
Irogachyev D. V., Bondarenko O. V. Volokonno-opticheskie kabeli i linii svyazi. M.: Eko-Trenz, 2002.
16. *Булавкин И. А.* Исследование и разработка системы обнаружения несанкционированных подключений в пассивных оптических сетях доступа: Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук. М., 2008.
Bulavkin I. A. Issledovanie i razrabotka sistemy obnaruzheniya nesanktsionirovannykh podklyucheniy v passivnykh opticheskikh setyakh dostupa: Avtoref. dis. Na soiskanie uchenoy stepeni kand. tekh. nauk. M., 2008.
17. US Patent 6265710. A Method and Device for Extracting Signals Out of a Glass Fiber. 2001.
18. *Фриман Р.* Волоконно-оптические системы связи. М.: Техносфера, 2003.
Friman R. Volokonno-opticheskie sistemy svyazi. M.: Tekhnosfera, 2003.
19. *Коротун В.* Волоконно-оптический кабель: назначение, конструкция, классификация. <https://www.asutpp.ru>.
Korotun V. Volokonno-opticheskiy kabel: naznachenie, konstruktsiya, klassifikatsiya. <https://www.asutpp.ru>.
20. *Листвин А. В., Листвин В. Н., Швырков Д. В.* Оптические волокна для линий связи. М.: Велком, 2003.
Listvin A. V., Listvin B. N., Shvyrkov D. V. Opticheskie volokna dlya liniy svyazi. M.: Velkom, 2003.
21. Ultra Hi-Rel. Undersea Component Family. Single Window Single Mode Wideband Fiber Coupler. www.oplink.com.
22. *Prucnal P. R., Harstead E. E., Elby S. D.* Low-loss, high-impedance integrated fiber-optic tap // *Opt. Eng.* 2009. Vol. 29. P. 1136–1142.
23. *Малых Ю. В., Шубин В. В.* Методика расчета коэффициента передачи излучения из сердцевины изогнутого одномодового оптического волокна в приемное волокно // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2017. Вып. 1. С. 76–86.
Malykh Yu. V., Shubin V. V. Metodika raschyeta koeffitsienta peredachi izlucheniya iz serdtsevinny izognutogo odnomodovogo opticheskogo volokna v priyemnoe volokno // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov. 2017. Vyp. 1. S. 76–86.
24. *Saruwatari M., Nawata Ki.* Semiconductor laser to single-mode fiber coupler // *Applied Optics*. 1979. Vol. 18, No 11. P. 1847–1856.
25. US Patent 4889403. Distribution on Optical Fiber Tap. 26.12.1989.
26. FOD-5503. <http://www.fod.ru>.

Статья поступила в редакцию 11.02.23.