

## **Волоконно-оптические распределенные датчики для мониторинга состояния протяженных объектов и охраны периметров.**

### **Прошлое и настоящее**



**Горбачев Олег Викторович**, Генеральный директор ООО «Инновационный Центр «ОПТИКА». Образование высшее, кандидат технических наук. Окончил МГУ им. М.В. Ломоносова по специальности "Общая физика и Нелинейная оптика". После окончания университета работал инженером в МГУ, научным сотрудником в Московском электротехническом институте связи (сейчас МТУСИ), заведующим лаборатории в концерне РАСУ "Системпром". В 2002 г. возглавил международную промышленную ассоциацию "ЕВРОКАБЕЛЬ". Автор 46 научных работ, патентов и изобретений в области оптико-акустических процессов в оптическом волокне. Разработчик волоконно-оптической системы охраны и спецкабелей для волоконно-оптических линий СВЯЗИ.

**Использование чувствительных датчиков на основе оптического волокна имеет ряд преимуществ перед некоторыми иными устройствами охраны периметра территорий, так как оптический кабель можно использовать во взрывоопасной среде. Чувствительным элементом разработанной распределенной системы диагностики является волоконно-оптический кабель, который реагирует на движение, вибрацию и деформацию по всей длине. В основу работы системы положен метод, основанный на исследовании спекл-структуры оптических волокон.**

Впервые в России еще в СССР, в рамках диссертационной работы Горбачева О.В. в МЭИС (Московский электротехнический институт связи) было рассмотрено влияние акустических полей на распространение света в оптических волокнах[1]. В 1984-1985 годах в научно-исследовательской лаборатории НИЛ-13 "Физические проблемы оптической связи" при кафедре Физики МЭИС под руководством проф. А.П. Жилинского научным сотрудником Горбачевым О.В. был проведен ряд научных исследований и разработок по распространению акустических волн в волоконно-оптическом световоде под воздействием лазерного излучения, введенного в волокно. Также были проведены исследования спекл-картин на выходе многомодового оптического волокна при механическом воздействии на него. Был опубликован ряд научных работ по данной тематике, а также получены патенты на детекторы полученных сигналов, что позволило применить их в созданной на их основе волоконно-оптической системе охраны, в дальнейшем также запатентованной и выпускающейся до настоящего времени серийно. Еще в 1985-1987г.г. были получены хорошие результаты, которые позволили создать волоконно-оптическую систему охраны «СОВА» [2,3,4], в которой чувствительным сенсором являлось оптическое волокно/кабель длиной от 30 до 400 м. Техническое средство охраны получило серебряную медаль на Выставке достижений народного хозяйства СССР и демонстрировалась на международной выставке оборудования, технологий охраны и систем безопасности в Дюссельдорфе в 1989г. Данная разработка заинтересовала высшее руководство страны и в 1990 в «Белом доме» в кабинете председателя Совета Министров РСФСР

Сил

аева Ивана Степановича она была успешно продемонстрирована разработчиком волоконно-оптической системы Горбачевым Олегом Викторовичем. В начале, без присутствия технических специалистов, оптический кабель был установлен под ковром, потом при касании ковра, срабатывал звуковой и световой сигнал тревоги. При этом, технические специалисты не смогли обнаружить волоконно-оптический сенсор, так как он был полностью диэлектрическим. После успешной наглядной демонстрации на дальнейшую разработку и внедрение ТСО «СОВА» были выделены значительные средства, что позволило Научно-Производственному Предприятию «Альт-Свет» с 1991 г. запустить серийное производство и взять под охрану многочисленные объекты Москвы, Подмосковья, авиационные центры, трубопроводы и линии связи. В связи с быстрым прогрессом в радиоэлектронике, ТСО «СОВА» раз в пять лет модернизировалась и нами патентовалась с использованием современной элементной базы и новых экспериментальных исследований [5].

Проблема разработки и реализации диагно-стики и контроля распределенных объек-тов, к которым относятся и линии связи, требует эффективных решений на доступной эле-ментной базе. Одним из методов дистанционного контроля больших зданий и территорий, линий и оборудования связи является метод, основан-ный на

исследовании спекл-структуры оптических волокон.

Спекл-структуры (от англ. *speckle* - крапинка, пятнышко) являются результатом интерференции волн от отдельных неоднородностей среды, в которой распространяется лазерное излучение. Данные спекл-картины снижают качество изображения, но вместе с тем они могут служить носителем полезной измерительной информации. Это создает предпосылки для их широкого применения в решении научно-технических задач в области высокоточных исследований и при контроле вибрации и деформации оптического кабеля.

Спекл-структура в рассеянном поле формируется при когерентном освещении случайно-неоднородных объектов, таких как прозрачная среда с флуктуирующим в пространстве показателем преломления или же шероховатая поверхность. Такие отражающие и пропускающие объекты называются диффузными объектами (микронеровности, существующие в пределах допуска на изготовление оптического волокна) или диффузорами. Спекловые поля, подобные получающимся при освещении диффузоров, возникают и при пропускании когерентного света через многомодовые волоконные световоды. Причина их появления в том, что на выходе многомодовых волоконных

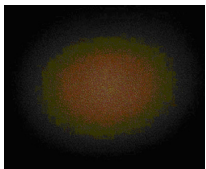
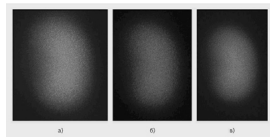


Рис.1. Спекл-картина на выходе из многомодового оптического волокна

световодов интерферируют поля большого числа направляемых мод со сложным пространственным распределением амплитуды по поперечному сечению световода и практически произвольными фазами.

Внешние деформационные воздействия на многомодовое оптическое волокно приводят к изменению пространственного расположения формируемых ими спеклов. Анализируя такие изменения, можно получить информацию о величине и параметрах внешних воздействий на оптическое волокно. Если пространственное распределение интенсивности спеклового поля при начальном состоянии объекта  $I_1(x,y)$  - исходное распределение, а  $I_2(x,y)$  - текущее распределение соответственно, то наличие разницы между ними будет свидетельствовать о наличии внешних воздействий на формирующий спеклы объект. Оценивая степень различия между функциями  $I_1(x,y)$  и  $I_2(x,y)$ , можно также попытаться установить характер и величины этих воздействий.

Иногда измененное текущее распределение  $I_2(x,y)$  спеклового поля может совпадать со сдвинутым на расстояние  $a$  исходным распределением  $I_1(x,y)$ . Такой тип изменения спекл-структуры называется трансляцией. Трансляция спеклов может наблюдаться при поперечных смещениях многомодового световода как единого целого в том случае, если перемещение не сопровождается изменением фазы направляемых по нему мод. Данный режим изменения спекл-структуры редко реализуется при использовании оптического волокна в качестве чувствительного элемента фазовых волоконно-оптических датчиков.



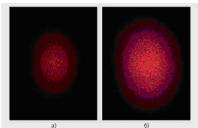
**Рис.2.** Спекл-структуры на выходе из многомодового оптического волокна: а) - спекл-структура при длине волокна 50 м; б) - спекл-структура при длине волокна 150 м; в) - спекл-структура при длине волокна 200 м.

Проведем исследование среднего размера спекла (размер спекла определяется размером фильтрующей апертуры). Апертура (*apertura* - отверстие) - характеристика оптического прибора, описывающая его способность собирать свет и противостоять дифракционному размытию деталей изображения на выходе из оптического волокна при распространении когерентного излучения в нем. Предположим, что спекл-картина формируется в результате равномерного освещения диффузора (например, матового стекла) шириной  $L$ . Спекл-структура, наблюдаемая в плоскости на расстоянии  $z$  от диффузора, представляет собой супер-позицию интерференционных картин, возникающих при рассеянии света каждой парой точек на диффузоре. Две любые точки, разделенные расстоянием  $l$ , дают интерференционные полосы с частотой  $\nu = l/\lambda$

$^2$   
 . Наиболее тонкие полосы, полосы с наибольшей частотой  $\nu$

$_{\max}$   
 $= L/\lambda$

$^2$   
 , будут образованы



**Рис. 3.** Спекл-структуры на выходе из многомодового оптического волокна: а) - спекл-структура при длине волокна 700 м; б) - спекл-структура при длине волокна 300 м.

крайними точками диффузора. Для меньших расстояний 1 существует большое количество пар точек, дающих полосы с частотой, определяемой расстоянием между

ними. Число пар таких точек, разделенных расстоянием  $l$ , пропорционально  $L-l$  [2]. Различные интерференционные полосы будут иметь случайные по отношению друг к другу фазы, поэтому при формировании усредненной освещенности вклад от интерференционных картин с разной частотой полос пропорционален соответствующему числу пар рассеивающих точек. Поскольку число последних пропорционально разности  $L-l$ , которая в свою очередь пропорциональна  $v_{\max}-v$ , распределение освещенности по частоте полос будет линейным. Средняя частота полос равна

$$3(L/\lambda$$

2)  
). Следовательно, распределение освещенности будет равно  $I(y) = 1 + \cos (2\pi Ly/3\lambda$

2)  
). За ширину спекла принимают расстояние между точками, где  $I$  падает до половины своего максимального значения, т.е.  $1,5 (\lambda$

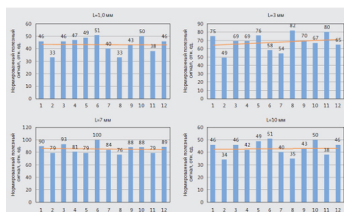
$$2/L).$$

Таким образом, размер спекла равен  $\alpha_s=1,5 \lambda_2/L$ . Этот результат отличается от данных, опубликованных в работе [4], в которой описана волоконно-оптическая система "Сова". В этой работе средний размер спекла  $\alpha$

$$s=3\lambda$$

$z/D$ , где  $3$  - поправочный коэффициент, полученный на основе вероятностного пространственно-частотного анализа;  $\lambda$  - средняя длина волны света;  $Z$  - расстояние от объекта до плоскости наблюдения;  $D$  - диаметр освещенной области. Данные о среднем размере спеклов дают возможность только грубой оценки величины смещения объектов в случае, когда изменение спекл-картины имеет характер трансляции [3]. И новое выражение отражает зависимость размера спекла  $\alpha$

$s$   
от рабочих параметров более точно, чем в работе [4].



**Рис.4.** Гистограммы распределения нормированного полезного сигнала при установке различных расстояний между выход-ным торцом оптического волокна и фотоприемником (по горизонтальной оси расположены номера испытаний).

Из-за трансляции спеклов коэффициент корреляции спекл-структур уменьшается до нуля задолго до того, как смещение становится равным диаметру светового пучка  $D$ . В дальней зоне наблюдения изменения корреляционной функции в основном будут обусловлены непрерывной сменой рассеивающих центров в области освещения. В таких условиях движение спеклов не будет согласованным. Отдельные спеклы в дальней зоне наблюдения будут перемещаться в произвольных направлениях, изменять форму вплоть до полного исчезновения и возникновения новых спеклов. Такой тип изменений спекл-структуры классифицируется как стохастический (рис.1).

При внешних воздействиях на многомодовое оптическое волокно с неподвижно закрепленным выходным торцом эффект изменения спеклов реализуется независимо от расстояния до плоскости наблюдения (рис.2)

Рассмотрим спекл-картину на выходе из многомодового оптического волокна, и последовательно будем учитывать внешние воздействия на различных расстояниях между выходным торцом оптического волокна и фотоприемника. Наблюдаемая спекл-картина вызвана только интерференцией волн от отдельных неоднородностей поверхности. Пусть диаметр освещенной области равен  $D$ , а радиус пространственной когерентности равен  $\rho_c \approx \lambda/\theta$ , где  $\theta$  - угловой размер освещающего источника,  $\lambda$  - средняя длина волны света.

При этом  $\rho_c > D$ , где  $D$  - диаметр освещенной области, равно как и разность оптических путей  $l_c = \lambda_z/\Delta\lambda$ , где  $\Delta\lambda$  - ширина спектрального интервала излучения. Введем в рассматриваемую систему внешнюю негативную составляющую, заключающуюся в наличии неоднородностей в среде распространения. Вследствие чего получим дополнительный источник формирования спекл-шума на выходе из многомодового оптического волокна. При этом среднее время мерцания единичного спекла  $\tau = \alpha/u$ , где  $\alpha$  - средний размер спекла ( $\alpha = \lambda_z/D$ ), где  $z$  - расстояние между плоскостями рассеяния и наблюдения. Теперь спекл-картина складывается из интерференции двух независимых реализаций спекл-поля. Динамика среды распространения в дальней зоне вызовет стохастический эффект спекл-картины. При различных воздействиях на многомодовое оптическое волокно мы получаем модель, достаточно точно отражающую природу формирования спекл-картины. В данном

случае изменения спекл-картины позволяют оценить скорость движения неоднородностей среды. В результате исследований нами получены уникальные экспериментальные данные (рис.3): на больших длинах оптического кабеля обнаружены спекл-структуры, формирующиеся при нормированном воздействии на частоте 300 Гц.

Сравнительный анализ экспериментальных данных, которые отражают изменения спекл-структур, происходящие вследствие апертурных эффектов, параметров оптического волокна, лазера, фотоприемника и внешнего воздействия на чувствительный элемент, позволили выявить ряд характерных зависимостей. Изменения спекл-структур зависят от определенных внешних воздействий на оптическое волокно: установлена слабая зависимость среднеквадратичной интенсивности и заметная зависимость пространственно-временной флуктуации интенсивности некоторых областей спеклов. Выявлена зависимость от частоты, координат и силы внешнего воздействия (рис.4). В испытаниях изменяли расстояние  $L$  между двумя плоскостями - плоскостью рассеяния (плоскость выходного торца оптического волокна) и плоскостью наблюдения. Оказалось, что наиболее сильное изменение уровня сигнал-шум наблюдается в случае, когда расстоянию между плоскостями рассеяния и наблюдения составляет 70 мм.

Обработка сигналов одноволоконных интерферометрических систем, формирующих спекл-структуры на выходе волоконного световода, позволила разработать новые методы измерений. Они способны адаптироваться к случайным изменениям пространственной структуры спекл-модулированных волн, если они вызваны неконтролируемыми внешними воздействиями, и обеспечивать режим реального времени в случае регистрации динамических спеклов. В свою очередь владение такими методами позволило создать эффективные технические средства контроля деформации и внешнего воздействия на оптическое волокно и модернизировать волоконно-оптическую систему диагностики.

Чувствительным элементом разработанной распределенной системы диагностики является волоконно-оптический кабель, который реагирует на движение, вибрацию и деформацию по всей длине. Для регистрации внешних воздействий необходимо существование контакта кабеля с контролируемым объектом, будь то заграждение, строительная конструкция, линия связи, периметр территории и т.д. Использование системы диагностики на основе оптического волокна имеет ряд преимуществ перед некоторыми иными устройствами охраны периметра территорий, так как оптический кабель можно использовать во взрывоопасной среде. Существует ряд других преимуществ оптического кабеля: это и высокая механическая прочность, и малые размеры, а также необходимая стойкость к вибрациям и механическим ударам.

Среди комплексных оптоволоконных систем защиты периметра, завоевывающих все большую популярность благодаря помехоустойчивости, взрывобезопасности, многофункциональности – качествам, как нельзя более актуальным для систем охраны, на сегодняшний день лидируют дорогостоящие продукты внешнего рынка. Ниже кратко описаны наиболее характерные предложения зарубежных разработчиков.

### **Системы для защиты металлических оград**

При защите оград сенсорный кабель, как правило, устанавливается непосредственно на ограде. Сенсор преобразует вибрации ограды в электрические сигналы, которые поступают на процессор (анализатор). Процессор, в соответствии с заданным алгоритмом, выделяет сигнал вторжения на фоне окружающих шумов и генерирует сигнал тревоги.

Австралийская компания Future Fibre Technologies (FFT) использует две основные технологии детектирования с использованием волоконно-оптических датчиков.

Первая технология, получившая название M/V, позволяет обнаруживать движение и вибрации кабеля (Movement & Vibration - M/V). Сенсорный кабель подключается к

начальному и оконечному модулям. Анализатор связан с начальным модулем через пассивный оптический кабель. Излучение от полупроводникового лазера подается в чувствительное волокно, и анализатор регистрирует отраженный от концевого модуля сигнал.

При перемещениях или вибрациях волокна изменяется распределение энергии между отдельными модами. В системах серии Secure Fence используются многомодовые оптические волокна с диаметром сердечника 62,5 мкм. Источником света служит полупроводниковый лазер мощностью 1...2 мВт, работающий на длине волны 1,31 мкм. Технология M/V позволяет регистрировать вибрации в диапазоне частот от нескольких герц до 300...600 герц. Системы на базе многомодовых волокон используются главным образом на эластичных (деформируемых) оградах.

В 2006 г. фирма FFT представила два варианта многозонной волоконно-оптической системы охраны периметров технологии M/V, получивших наименования Secure Fence 408 и Secure Fence 108. Один процессор обслуживает до 8 отдельных зон охраны. Все зонные сенсорные кабели подключаются к процессору через многожильный коммуникационный оптический кабель. Длина сенсорного кабеля в зонах охраны не ограничивается жестко; ограничена только общая протяженность сенсора и соответствующего коммуникационного кабеля в данной зоне, которая не должна превышать 40 км (система Secure Fence 408) или 10 км (система Secure Fence 108). Эти системы привлекательны для организации охраны серии удаленных объектов небольшой протяженности, когда на периметрах не требуется подключать электропитание и устанавливать электронное оборудование. Коммуникационный оптический кабель в этих случаях может быть скрытно проложен под землей. Для передачи сигналов от сенсоров можно также использовать проложенные ранее стандартные связные оптические кабели.

Другая технология фирмы FFT построена на принципе обнаружения микронапряжений в оптическом волокне и получила сокращенное название MSL (от MicroStrain Locator - Локатор микродеформаций). В состав протяженного датчика входят три отдельных волокна многожильного оптического кабеля. Два верхних волокна выполняют функцию чувствительных элементов: в них подается излучение от полупроводникового лазера, работающего в непрерывном режиме. Третье (выходное) волокно служит для передачи сигналов на анализатор системы. Источник излучения расположен в блоке анализатора, от него излучение лазера по входному пассивному кабелю подается на начальный модуль. В этом модуле излучение расщепляется на два пучка, которые подаются на два волокна. Излучение через оба волокна передается на оконечный модуль, в котором происходит интерференция. Если оба плеча этого интерферометра находятся в невозмущенном состоянии, то интерференционная картинка на оконечном модуле остается неизменной. При этом сигнал, передаваемый с оконечного модуля на анализатор, не имеет переменной составляющей. При деформациях или вибрациях кабеля оптическая разность хода в чувствительных волокнах (в плечах интерферометра) изменяется, и оконечный модуль регистрирует переменную составляющую сигнала, передавая ее на анализатор. В системе MSL используются серийно выпускаемые одномодовые оптические волокна с диаметром сердечника 9 мкм.

Особенность системы MSL состоит в том, что в качестве чувствительных элементов могут использоваться одномодовые жилы стандартного многожильного волоконно-оптического кабеля, предназначенного для передачи сигналов. Жилы должны быть расположены на диаметрально противоположных краях кабеля, чтобы чувствительность сенсора к изгибу была максимальной. Начальный и оконечный модули помещаются под землей в стандартных телекоммуникационных колодцах, расположенных на краях зоны.

В качестве источников света в технологии MSL используются полупроводниковые лазеры с выходной мощностью 12...50 мВт, работающие на длине волны 1,31 или 1,55 мкм. Высокая мощность излучения и малые потери в сенсоре позволяют обеспечить длину отдельной зоны до 40...80 км. Как заявляют разработчики, по чувствительности технология MSL примерно на три порядка превосходит технологию M/V. Система MSL регистрирует вибрации в диапазоне частот примерно от 300 Гц до 2 кГц, что соответствует характерным частотам, возникающим в типовых металлических оградах

при попытках их преодоления.

Очевидно, что длина зоны в несколько десятков километров неудобна для практического применения. Охраннику необходима информация о конкретном месте вторжения, без которой сигнал тревоги будет практически бесполезен. Поэтому актуально, что модифицированная технология MSL позволила реализовать функцию определения места вторжения с достаточно высокой точностью. Для локализации вторжения применена технология сравнения сигналов вторжения в обоих плечах интерферометра, которая является секретом фирмы FFT и обеспечивает точность локализации до нескольких десятков метров.

За последние два года фирма FFT заметно улучшила параметры системы Secure Fence MSL, увеличив протяженность одной зоны охраны с 40 до 80 км и повысив точность обнаружения места вторжения на металлических оградах с 50 до 25 м. Особенность охранных систем фирмы FFT состоит в том, что в них используются промышленно выпускаемые многожильные волоконно-оптические кабели, оптические патч-панели и промышленный компьютер в качестве сигнального процессора. К оригинальному оборудованию относятся начальный и конечный «сенсорные модули», обеспечивающие разделение и сведение интерференционных потоков.

Основное ноу-хау разработок фирмы сосредоточено в программном обеспечении, используемом для обработки сигналов сенсоров и локализации вторжения. Следует отметить, что модифицированная система может теперь применяться не только на «мягких» оградах (типа сетки «рабица»), но и на жестких оградах в виде сварной решетки (рис. 6) или оградах «палисадного» типа, собранных из тяжелых стальных элементов (рис. 7). На решетчатых оградах сенсор крепится гибкими пластиковыми стяжками шириной 4,8 мм, стойкими к УФ-излучению. При креплении сенсорного кабеля разработчики рекомендуют избегать резких изгибов сенсора и излишних

механических напряжений в точках крепления.

Вблизи опорных столбов ограды, где жесткость ограды выше, кабель прокладывают в виде петли, чтобы обеспечить равномерность чувствительности. На «палисадных» оградах волоконно-оптический сенсор монтируют в пластиковой или металлической защитной трубе, которая крепится к горизонтальной опорной балке. По сообщениям фирмы FFT, независимое тестирование показывает, что вероятность обнаружения системы Secure Fence составляет не менее 95% при вероятности ложных срабатываний не выше 3%. Точность локализации максимальна на мягких оградах - на сетке «рабица» достигает 10 м, на жестких сварных оградах гарантируется точность не менее 25 м. Сенсорный кабель в защитной оболочке, стойкой к УФ-излучению, имеет ресурс не менее 15 лет; диапазон рабочих температур сенсора и других наружных элементов системы: от -40 до +70 оС. Процессор устанавливается внутри помещения - он является единственным активным элементом системы; все остальные компоненты являются пассивными и не требуют питания или прокладки кабелей сигнализации.

Компания FFT выпускает также периметральную охранную систему Secure Fence Taut Wire, которая представляет собой комбинацию волоконно-оптического сенсора и проводно-натяжного барьера. Сенсорный кабель монтируется на опорных столбах высотой 3,2 м. Лучи из колючей проволоки механически связаны с волоконными сенсорами на опорных столбах, которые регистрируют изменения натяжения проволоки. Максимальная длина отдельной зоны - 4 км. Система устойчива к ветрам со скоростью до 100 км/ч; система автоматической коррекции регулирует параметры сенсоров при изменении температуры в диапазоне от -40 до +75 оС. Система Secure Fence Taut Wire обнаруживает попытки перелезания через ограду, раздвижения проволочных лучей или перерезания их. Фирма-изготовитель отмечает очень высокую обнаруживающую способность системы при весьма умеренной стоимости ее обслуживания.

Английская компания Remsdaq выпускает несколько систем серии Sabre с волоконно-оптическими датчиками. Система Sabre Fonis предназначена для защиты периметров из сетчатых или решетчатых металлических оград. Кабель, прикрепленный к сетке, генерирует низкочастотные сигналы при попытках преодоления ограды или ее

перерезания. Сенсорным элементом служит пара оптических волокон кабеля типа LS2H с защитной оболочкой, упрочненной кевларом. Диаметр сердечника - 62,5 мкм, диаметр оболочки - 125 мкм, внешний диаметр кабеля 4,8 мм. Максимальная длина кабеля между передатчиком и приемником - 1000 м; для подключения к анализатору применяются стандартные оптические разъемы типа SMA. Источник излучения - полупроводниковый лазер с длиной волны 0,78 мкм. Изменения спекл-структуры при деформации кабеля детектируются позиционно-чувствительным фотоприемником.

В системе SabreFonic используется анализатор Sabre II Processor, снабженный мощной системой цифровой обработки сигналов. Анализатор снабжен встроенным интерфейсом пользователя, выполненным в виде трех 7-сегментных светодиодных индикаторов, а также кнопок выбора меню и установки режимов. Анализатор имеет также коммуникационные порты для дистанционной настройки и диагностики.

В системе SabreTape фирмы Remsdaq волоконно-оптический датчик прикреплен к режущей ленте, смонтированной на ограде или козырьке (рис. 8). Оцинкованная стальная лента толщиной 0,5 мм и шириной 20 мм натянута так, что попытка перелезть через ограду вызывает механические деформации, регистрируемые сенсором. Система рассчитана на обнаружение только весьма энергичных действий нарушителя, но зато практически не дает ложных срабатываний. Датчиком является многомодовое волокно с диаметром сердечника/оболочки 50/125 мкм; источником излучения служит лазер с длиной волны 0,85 мкм. Оптические потери в волокне не превышают 3 дБ/км. Система разработана по спецификации Министерства обороны Великобритании; она рассчитана на эксплуатацию в неблагоприятных атмосферных условиях (морской туман, кислотные пары, промышленные выбросы, песок) и диапазоне температур от -30 до +70 °C.

Другой подход к построению сигнального барьера демонстрирует израильская компания TRANS Security Systems and Technology (TSS). Датчиком периметральной

системы F-5000 Fibernet является сеть, спаянная из одножильного многомодового оптического волокна, защищенного пластиковой оболочкой, упрочненной кевларом. Оболочка обеспечивает защиту волокна от УФ-излучения, влаги, соленой воды и т.п. Сеть состоит из ячеек со стороной 16 см; в каждом пересечении волокна спаяны ультразвуком и защищены пластиковой накладкой. По всей сети распространяется импульсное излучение светодиода, работающего в ближнем ИК-диапазоне (длина волны 0,85 или 1,3 мкм). Приемником излучения служит PIN-фотодиод. Подключение излучателя и приемника к сети осуществляется стандартными оптическими разъемами типа ST. Обработка сигналов осуществляется процессором серии F-5000, рассчитанными на 2 или 4 зоны длиной до 100 м каждая. Автономный процессор F-5000-1 имеет на выходе релейные контакты, а процессор F-5000-2 подключается к компьютерной системе управления. Процессоры размещаются в герметизированных корпусах размерами 500x400x200 мм; они питаются от источника постоянного тока напряжением 48 В; диапазон рабочих температур системы - от -30 до +70 оС.

В зависимости от выбора порога срабатывания система F-5000 выдает сигнал тревоги при натяжении или при обрыве волокна в любой из ячеек сети. Волоконно-оптическая сеть устанавливается автономно или крепится рядом с уже существующей оградой. Она разделена на две части: нижняя часть высотой 2-3 м крепится к ограде, а верхняя часть сети выполняется в виде козырька, прикрепленного к эластичным фиберглассовым стойкам, устанавливаемым с наклоном через каждые 2 м. Нижняя часть сети натягивается между горизонтальными металлическими трубками, укрепленными соответственно вдоль верхнего и нижнего краев основной ограды. Нижняя часть сигнального барьера образует отдельную зону охраны, которая настраивается на срабатывание только в случае разрыва ячеек сети, что позволяет исключить срабатывания от случайных факторов (животные, проходящие рядом люди, транспорт и т.п.) при использовании системы в густонаселенных регионах.

Верхняя часть сигнального барьера F-5000 образует отдельную зону охраны. Вдоль верхнего торца козырька смонтирован волоконно-оптический кабель в прочной оплетке, позволяющий использовать этот кабель в качестве натяжного элемента. Кабель оптически соединен с чувствительной сетью с помощью преобразователей 6. Конструкция козырька является достаточно гибкой, и процессор данной зоны охраны настраивается на регистрацию перелезания через козырек. При разрыве отдельных

ячеек не требуется менять всю сеть. Восстановление сенсора производится с помощью отрезков кабеля и специальных оптических перемычек.

Система F-5000 может также встраиваться в стены (защита зданий и помещений) или монтироваться под землей на глубине до 50 см (противоподкопные барьеры). Для объектов с очень высокой степенью защиты фирма выпускает модифицированную систему F-6000, образующую сигнальный барьер высотой 4 м.

Американская компания Fiber SenSys выпускает несколько волоконно-оптических периметральных систем серии Fiber Defender (FD). В системах этой серии сенсорные кабели монтируются на ограде в виде замкнутой петли, так что оба конца сенсора подключены к процессору с помощью стандартных оптических разъемов. Максимальная длина одной зоны охраны составляет 2 км. Цифровая обработка сигналов позволяет автоматически компенсировать воздействие ветра и дождя. Системы серий FD применяются на различных металлических оградах, а также для защиты крыш и стен зданий.

В отличие от большинства конкурентов в изделиях этой фирмы использованы не серийные, а специально разработанные оптические кабели, отличающиеся от стандартных оболочкой оптических волокон. Эти оболочки устроены так, чтобы повысить чувствительность кабеля к внешним механическим воздействиям - давлению, деформациям и вибрациям. В сенсорах использованы многомодовые оптические волокна. Процессор системы регистрирует изменения спекл-структуры прошедшего через кабель лазерного излучения.

Версия системы под названием FD-205 предназначена как для охраны оград и стен, так

и для подземной установки. Система использует цифровую обработку сигналов сенсоров; процессор автоматически регулирует параметры системы в зависимости от шумов, создаваемых ветром. Для регулировки процессора может быть использован подключаемый к нему анемометр, регистрирующий скорость ветра. Процессоры серии FD-205 монтируются на ограде; в единую систему с помощью одного коммуникационного волоконного кабеля можно включить до 127 процессоров.

Модификация системы, получившая наименование FD-220, использует как стандартные волоконные кабельные сенсоры (типа SC3), так и сенсоры в защитной оболочке (SC4). Оптические кабели подключаются к процессору с помощью стандартных разъемов типа ST. По данным изготовителей, срок службы кабельного сенсора в защитной оболочке составляет не менее 20 лет. Процессор системы FD-220 может использоваться как в качестве автономного охранного прибора, так и в составе сетевой системы с последовательным опросом через интерфейс RS-232C.

Все процессоры монтируются на посту охраны, который может быть удален от периметра на расстояние до 10 км. Процессор питается от источника с напряжением 10...24 В, потребляемая мощность -2,1 Вт. Диапазон рабочих температур системы -от -30 до +55 оС.

Фирма Fiber SenSys продемонстрировала также новую систему SPIDeR. Название системы является сокращением от «Simultaneous Point Intrusion DetectoR» - Датчик с локализацией множественных вторжений. Структурная схема системы SPIDeR такова. К процессору подключается до 50 отдельных зон охраны; сигналы от многомодовых волоконных сенсоров передаются на процессор по многожильному оптическому кабелю с одномодовыми волокнами. Для подключения сенсоров к коммуникационному кабелю используются специальные оптические соединители. Если общая протяженность сенсоров во всех зонах не превышает 500 м, то волоконная

кабельная система поставляется заказчику полностью собранной. Для более протяженных периметров коммуникационный кабель поставляется с оптическими соединителями, к которым подключены короткие отрезки волокна 5 (pig-tail) со стандартными оптическими разъемами.

Особенностью системы SPIDeR является режим последовательного «опроса» зон охраны с использованием лазерных импульсов. Номер зоны определяется методом измерения времени задержки отраженных сигналов. Такая технология позволяет обнаруживать одновременное вторжение на нескольких участках периметра, т.е. предотвращать маскирование реального вторжения на фоне умышленно имитированного сигнала нарушения периметра.

Сенсорный кабель системы SPIDeR монтируется на ограде в один проход или в два прохода, в зависимости от требований к безопасности объекта. Сенсорный кабель поставляется в жесткой пластиковой оболочке, которая крепится к ограде стяжками из оцинкованной проволоки.

Максимальная общая протяженность сенсоров, подключенных к одному процессору SPIDeR, составляет 2 км; максимальная протяженность одной зоны - 100 м. При рекомендованной общей длине сенсора 500 м и максимальном числе зон (50) точность локализации вторжения составляет 10 м, что соответствует длине отдельной зоны. Длина соединительного пассивного кабеля - до 5 км. Процессор снабжен как релейными выходами, так и интерфейсами RS-232 и RJ-45.

Израильская фирма Magal выпускает волоконно-оптический сигнальный барьер FiberMESH 2005, устанавливаемый на сетчатых оградах. Волоконно-оптический датчик

покрыт защитной оболочкой из полиэстера; внешний диаметр кабеля равен 3,5 мм. В качестве источника излучения используется импульсный полупроводниковый инфракрасный лазер. Двумерная сенсорная сетка имеет ячейки размером 15 x 15 см; в каждом узле сетки производится сварка волоконных кабелей. Нижняя кромка сетки прикреплена к горизонтальной трубе, препятствующей попыткам приподнять сетку. Верхняя часть сетки, высотой около 1 м, выполнена в виде козырька над основной оградой. Верхним элементом сигнального козырька является проводно-натяжной датчик, к которому прикреплена чувствительная волоконно-оптическая сетка. При попытке разрезать или деформировать сетку сигнал тревоги дает волоконно-оптический датчик. При попытке перелезть через ограждение активируется проводно-натяжной (электромеханический) датчик, имеющий регулируемый порог срабатывания (натяжение от 15 до 40 кг).

Волоконно-оптический сигнальный барьер FiberMESH 2005 фирмы Magal поставляется в виде секций длиной 10 м и высотой 2,0, 2,5 или 3,0 м. Соседние секции соединяются механически и состыковываются по оптическому каналу. Стандартная длина одной зоны составляет 100 м.

Электронный блок для обработки сигналов располагается в центре зоны; к нему подключаются две 50-метровых половины волоконно-оптического барьера и преобразователь натяжного датчика. С контрольным постом электронный блок периметральной системы соединяется через интерфейс RS-422. Система питается от источника напряжением 10-30 В; потребляя в дежурном режиме ток 4 мА и в режиме тревоги - ток 45 мА. По сообщению разработчиков, система устойчива к ветрам со скоростью до 70 км/ч и сохраняет работоспособность при дожде и снеге; диапазон рабочих температур - от -30 до +72 оС.

Канадская компания Senstar-Stellar выпускает волоконно-оптическую охранную систему

IntelliFIBER, предназначенную для защиты сетчатых периметральных оград. Сенсорный кабель содержит две волоконно-оптические жилы в защитной оболочке; сенсор крепится непосредственно к ограде. Оптические жилы подключаются с помощью стандартных оптических разъемов типа ST к выходу полупроводникового лазера и входу фотоприемника на плате анализатора. Электронный блок регистрирует изменения оптических параметров кабеля, вызванные деформациями ограды при попытках вторжения. Интересно, что конструктивное решение новой системы базируется на использовании электронного блока Intelli-FLEX от широко известной охранной системы той же фирмы, использующей в качестве датчика вибрационно-чувствительный коаксиальный кабель. При использовании оптического кабеля электронный блок дополняют оптическим модулем, который содержит лазерный излучатель, фотоприемник и измеритель мощности принимаемого излучения со светодиодным индикатором. Сам оптический модуль потребляет мощность 1,2 Вт; при его установке сохраняются функции всех сигнальных кабелей, подключаемых к стандартному процессору серии Intelli-FLEX.

Процессор Intelli-FLEX настраивается на обнаружение двух основных типов вторжения - перелезание через ограду или разрушение ее. По каждому из каналов в процессоре задаются пороги чувствительности, минимальная продолжительность вторжения и временное окно счетчика событий. С помощью автономного программатора задаются параметры чувствительности процессора и режимы компенсации погодных условий. Максимальная протяженность одной зоны охраны с волоконно-оптическим сенсором составляет 2 км; диапазон рабочих температур системы - от -40 до +70 оС. Как и все волоконно-оптические устройства, данная система характеризуется невосприимчивостью к электромагнитным и радиочастотным помехам. Для защиты электронного блока от грозových разрядов применены газовые разрядники на всех релейных выходах, а также на клеммах кабелей питания и сигнализации.

Системы для защиты тяжелых оград и стен

Чувствительность волоконно-оптического сенсора обычно недостаточна для непосредственной регистрации вибраций тяжелых металлических оград, поэтому изготовители охранных систем разрабатывают специальные барьеры с интегрированными в них волоконно-оптическими сенсорами.

Для защиты жестких металлических оград израильская фирма Magal разработала систему INNO-FENCE. Отличительная особенность системы состоит в том, что волоконный датчик встроен в верхний горизонтальный канал панели ограды, через которую проходят вертикальные стойки ограды. Датчик полностью скрыт крышкой; он реагирует на деформации горизонтального канала ограды, возникающие при попытке ее преодоления. Многомодовый волоконный кабель имеет сердечник со структурой 100/140 мкм, удельное поглощение - 7 дБ/км. В системе использован полупроводниковый лазер с длиной волны 850 нм и эффективной полосой частот не менее 200 МГц. Электронный блок приемника/передатчика анализирует сигналы кабеля и выдает сигнал тревоги при превышении определенного порога механического воздействия на ограду. По заявлениям разработчиков, система отличается низким уровнем ложных тревог и практически не нуждается в техническом обслуживании. Однако недостатком системы является ее относительно низкая чувствительность. Для срабатывания системы к ограде требуется приложить усилие более 40 кг или деформировать жесткие прутья ограды. Поэтому система будет регистрировать только «силовые» вторжения, сопровождаемые значительными механическими воздействиями. Двухзонный электронный блок системы INNO-FENCE - FOST питается от источника напряжением 12 В, потребляя в дежурном режиме ток всего 4 мА. Он имеет релейные выходы и интерфейс RS-422 для передачи данных. Диапазон рабочих температур системы от -20 до +71 °C.

Австралийская компания FFT разработала серию специальных барьеров типа Secure Fence Palisade с интегрированными в них сенсорами. Оптический сенсорный кабель скрыт в верхнем коробчатом канале, через который проходят вертикальные стойки ограждения. Эти стойки имеют определенную степень свободы и могут слегка перемещаться, поворачиваться или вибрировать при механическом воздействии, генерируя сигнал в прикрепленном к стойкам сенсорном кабеле. Система обнаруживает

различные виды вторжения - перелезание, перепиливание или раздвижение стоек.

Для защиты жестких стен и барьеров фирма Remsdaq выпускает систему Optimesh, где волоконно-оптические кабели образуют сеть с квадратными ячейками, которую монтируют внутри стен или перегородок. Система срабатывает только при обрыве кабеля, поэтому она регистрирует только жесткие «силовые» воздействия (например, пролом стены). Очевидно, что при таком критерии детектирования вероятность ложных срабатываний получается достаточно низкой.

Подземные системы с волоконно-оптическими кабелями

Задача охраны неогражденных границ объекта, когда датчики требуется устанавливать скрытно, т.е. располагать их под землей, не относится к разряду простых. Несколько зарубежных фирм используют для этой цели волоконно-оптические кабельные датчики.

Система SabreLine фирмы Remsdaq предназначена для защиты подходов к объектам или для охраны запретных зон. Оптический кабель располагается вдоль границы охраняемого периметра и маскируется защитным покрытием. Кабель помещают между двумя эластичными матами и укладывают в виде параллельных петель с шагом 20 см под поверхностью земли на глубине 5 см. Сенсор обнаруживает изменения давления, вызываемые идущим или ползущим человеком. Кабель имеет сердечник диаметром 100/140 мкм; внешний диаметр кабеля - 2,4 мм. Излучатель и анализатор по своим

характеристикам аналогичны системе SabreFonic. Электронный блок устанавливают под землей в специальном колодце, закрытом металлической крышкой. Подземный сигнальный кабель соединяет анализатор с контрольной панелью. Фирма Remsdaq утверждает, что при правильной подготовке периметральной траншеи подземная охранная система эффективно работает в пустынях, на травяных и гравийных грунтах, а также под асфальтовыми дорогами.

Система F-7000-FOBS компании TSS также предназначена для подземной установки и регистрирует давление почвы, создаваемое нарушителем. Для этого оптический кабель помещают на глубине 5-10 см под поверхность грунта, изгибая его в виде петли, перекрывающей полосу шириной 1-2 м. Для обеспечения высокой и однородной чувствительности кабель укладывают на легкую металлическую решетку и сверху накрывают такой же решеткой. Эта система может применяться практически во всех типах грунта - песок, гравий, глинистые почвы и т.п.

В качестве датчика во всех вариантах системы F-7000 используется многомодовый волоконно-оптический кабель в прочной защитной оболочке. Источник излучения - полупроводниковый лазер с длиной волны 1,3 мкм. Максимальная длина кабеля - 5000 м; для стыковки с процессором используются стандартные разъемы типов FC или ST. Процессоры серии F-7500 выполняются в двух- или четырехзонных вариантах. Они помещены в пластиковые герметизированные корпуса размером 300 x 400 x 200 мм; для питания используется источник напряжением 12 В/0,5 А с резервной батареей.

В подземной системе компании FFT, получившей название Secure Fence BGS (от Below Ground System - Подземная система), два отдельных сенсорных кабеля прокладываются вдоль периметра. Обычно эта система применяется как второй рубеж охраны, параллельный основной ограде. Кабели укладываются в траншею на глубине 50...75 мм и прикрепляются к пластиковой сетке, которая повышает чувствительность системы и вероятность регистрации идущего по земле человека. Корреляционная обработка сигналов от обоих волоконно-оптических кабелей позволяет отфильтровать сигналы помех (шум дождя, транспорта и т.п.) и выделить на их фоне сигналы реального вторжения. Система позволяет обнаруживать идущего или бегущего нарушителя, а

также регистрировать попытки подкопа под линией периметра. При использовании технологии MSL точность локализации вторжения системы Secure Fence BGS составляет 100 м при максимальной длине одной зоны до 60 км

### Системы для защиты водных рубежей

Для защиты морских и подводных объектов компания TSS (Израиль) выпускает волоконно-оптическую систему F-8000-Marinet. Чувствительным элементом системы является сеть, по параметрам аналогичная сети системы F-5000, и отличающаяся лишь наличием дополнительной оболочки, защищающей волокно от соленой воды. Сеть выпускается в двух вариантах - для крепления к жестким конструкциям охраняемого объекта и для установки в открытых акваториях. Во втором случае сеть устанавливают на скрепленных друг с другом трубчатых поплавках 1, к которым крепятся подводная 2 и надводная 3 части сети. Такой сетчатый датчик используют для защиты причалов, отдельно стоящих судов и т.п. Типовая протяженность одной зоны охраны - 100 м. Процессор F-8005 регистрирует попытки разрезать, разорвать, растянуть, замкнуть или смять сеть. При этом в процессоре предусмотрена фильтрация фоновых шумов, вызываемых морскими волнами.

Специально для подводного применения компания Remsdaq разработала волоконно-оптическую сеть, получившую название Aquamesh. Сенсорный кабель этой системы помещен в жесткую защитную оболочку. Такая сенсорная сеть применяется для охраны водозаборных каналов, морских буровых установок и т.п.

Отдельный сегмент рынка охранных систем составляют системы для охраны неогражденных периметров. На неогражденных периметрах широко используются двухпозиционные радиолучевые датчики. В комплект системы входят передатчик и приемник СВЧ-сигналов, которые располагают на расстоянии до нескольких сот метров друг от друга. Между передатчиком и приемником формируется чувствительная зона с поперечным сечением до нескольких метров.

Двухпозиционные радиолучевые датчики производятся и широко применяются у нас в стране – это системы серий РЛД, "Барьер" , "Радий", FMW и др.

Аналогичное по назначению и параметрам оборудование выпускают и ведущие зарубежные фирмы: Senstar-Stellar (Канада), CIAS, Sicurit, AVS (Италия), Southwest Microwave (США) и др.

К сожалению, радиолучевые датчики можно применять только на плоских участках периметра, где неровности, высота травы или снежного покрова не превышают 30 см. Кроме этого, радиолучевые датчики требуют наличия полосы отчуждения, ширина которой должна соответствовать ширине зоны чувствительности датчика.

Для защиты открытых участков используют также многолучевые оптические датчики, с помощью которых создается невидимый сигнальный барьер высотой до нескольких метров. Оптические датчики имеют очень узкую чувствительную зону и практически не требуют наличия зоны отчуждения вдоль периметра. Такие датчики выпускают компании Optex (Япония), Warning Opto (Германия), Radiovisor (Великобритания), Sorhea

(Франция), Magal (Израиль), Optea, MiTech (Италия) и др. В большинстве современных многолучевых оптических датчиков применяются такие функции, как интеллектуальная логическая обработка сигналов отдельных оптических модулей, мониторинг состояния оптического тракта с выдачей сигнала предупреждения или автоматической "дисквалификацией" отдельных лучей, дистанционная диагностика состояния и настройка системы, встроенная память тревожных событий. В некоторых многолучевых датчиках реализованы режимы распознавания типовых сигналов, что позволяет отстроиться от помех, создаваемых птицами, мелкими животными и т.п.

Фирма Sicurit (Италия) выпускает лучевые периметральные датчики серии Absolute, которые являются приборами "двойной технологии", объединяющими в одной стойке оптические лучевые и радиолучевые модули. Сигнал тревоги генерируется при одновременном срабатывании в обоих каналах, что существенно снижает вероятность ложных тревог при сильном дожде, тумане и других неблагоприятных факторах.

Весьма актуальной остается проблема защиты неогражденных территорий с помощью скрытых, то есть подземных датчиков. Помимо описанных выше технических решений фирм Remsdaq и FFT, одним из решений этой проблемы является использование подземных радиоволновых датчиков. По этому пути пошла фирма Senstar-Stellar, создавая систему Perimitrax. Сенсорные кабели укладываются в грунт или асфальт на глубину 23 или 6 см соответственно. Ширина чувствительной зоны составляет 2–3 м при высоте до 1 м.

Для организации подземных охранных рубежей английская компания HarperChalice использует электретные вибрационно-чувствительные кабели, применяемые обычно для металлических оград. В системе Ground Guard использованы два параллельных подземных сенсора, с помощью которых формируется дифференциальная система, позволяющая регистрировать идущего по земле человека и отфильтровывать фоновые помехи от идущего рядом транспорта.

Для создания подземных охранных рубежей используются также сейсмические датчики различных типов – как дискретные, так и распределенные. К подземным системам сейсмического типа относятся российские разработки "Дуплет" и "Амулет". Из зарубежных изделий упомянем систему GPS итальянской фирмы GPS Standard с протяженными гидравлическими датчиками давления и систему S-103 фирмы Safeguards Technologies (США) с дискретными геофонными датчиками.

Ниже описаны охранные системы периметров, наиболее часто встречающиеся на внутреннем рынке РФ.

Радиолучевые системы («Гефест», «Грот», «Барьер», РЛД-94, «Протва», «Витим», «Агат», Trezor, CIAS).

Такие системы содержат приемник и передатчик СВЧ-сигналов. Системы применимы там, где обеспечивается прямая видимость между приемником и передатчиком, т. е. профиль поверхности должен быть достаточно ровным и в зоне охраны должны отсутствовать кусты, крупные деревья и т. п. Применяют радиолучевые системы как при установке вдоль барьеров, так и для охраны неогражденных участков. Эти системы обычно рассчитаны на обнаружение нарушителя, который преодолевает рубеж охраны в полный рост или пригнувшись.

Радиоволновые системы («Уран-М», «H-Field», система RAFID).

Чувствительный элемент подобных систем — два расположенных параллельно

проводника. При использовании радиоволновых систем на оградах кабели устанавливают либо на специальных стойках на верхнем торце барьера, либо непосредственно на его поверхности. Выпускаются модификации радиоволновых систем также для защиты неогражденных территорий. При этом кабели устанавливают в грунт на глубину 15 — 30 см. Такая система охраны является скрытой, но подвержена сильному влиянию погодных условий, снижающих стабильность ее параметров.

Вибрационные системы с сенсорными кабелями («Арал», «Дельфин», «Дрозд», «Intelli-Flex», «Flexiguard», «PPS2», системы компаний GPS Standard, Gequip).

Принцип действия таких систем основан на регистрации механических вибраций или перемещений ограды, возникающих при попытках нарушителя разрушить или преодолеть периметр. Чувствительным элементом таких систем обычно является сенсорный кабель, преобразующий механические вибрации в электрический сигнал.

Инфракрасные системы. (IS 402, IS 412, СПЭК, «Рубеж-3М», датчики фирм C&K, Atsumi, Visonic, Optex, Alarmcom, SEL, C&K) - активные и пассивные.

Активные ИК системы состоят из передатчика и приемника, располагаемых в зоне прямой взаимной видимости. Такой датчик формирует сигнал тревоги при прерывании луча, попадающего на фотоприемный блок. Отличительная особенность активных лучевых систем — возможность создания очень узкой зоны обнаружения.

Пассивные ИК детекторы с пространственной диаграммой чувствительности в виде луча проще в монтаже и настройке, чем двухпозиционные ИК-лучевые системы и используются в основном там, где нужно перекрыть короткие участки периметра — зоны въезда транспорта, разрывы в ограждениях, ворота, оконные проемы и т. п. Для таких датчиков характерна большее поперечное сечение чувствительной зоны, чем для лучевых оптических датчиков.

Емкостные системы охраны периметров («Радиян-М», «Радиян-14», «E-Field»).

Антенная система подключается к электронному блоку, генерирующему электрический сигнал и измеряющему емкость антенной системы. Когда человек приближается к электродами или касается их, емкость антенной системы изменяется, что регистрируется электронным блоком, выдающим сигнал тревоги.

## ЛИТЕРАТУРА К СТАТЬЕ

1. Горбачев О.В., Жилинский А.П. Фотоакустический эффект в волоконных световодах // Тез. докл. на X111 Всесоюзн. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. - Киев, 1986. - Ч.1. - С. 266.
2. А.с. 1233034 СССР МКИ. Акустический датчик для контроля волоконно-оптического световода // О.В. Горбачев, А.П. Горчаков, А.П. Жилинский, В.А. Оборотов. - Оpubл. 1986, Бюл. №19.
3. Горбачев О.В., Жилинский А.П., Оборотов В.А. Оптико-акустический эффект в волоконных световодах // Акустический журнал. - 1987. - Т. 33, №2. - С. 356-358.
4. Zilinski A.P., Gorbachev O.V., Gorchakov A.P. Akustische defectoskopie von LWL-nachrichten // Y111 Wissenschaftliche Konferenz. – Mittweida, 1987. – t.B. – p.25.
5. Берикашвили В.Ш., Горбачев О.В., Жилинский А.П., Панкратов В.Н. Измерение модового поля в одномодовых световодах методом сканирования // Электросвязь. - 1988. - №8. - С. 21-24.
6. Горбачев О.В. Практическое использование интерференционных явлений в оптических кабелях. Волоконно-оптическая система «Сова» // ФОТОН-ЭКСПРЕСС.-2006.-№1. - с. 38-42.
7. Горбачев О.В. Волоконно-оптическая система ТСО «СОВА» // Информост.-2006 - №1(43) - с. 54-57.
8. Горбачев О.В., Интерференционные исследования спекл-структур в оптическом кабеле // научно-технический журнал «ФОТОНИКА» - 2012 - №6/36 – с. 20-24.