

SPIN-код: 3352-3766

2.2.6 -Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Куренной А.А.

аспирант кафедры «Фотоники в телекоммуникациях»,
Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики,
Россия, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86

**МЕТОДОЛОГИЯ ВЫБОРА И ОБОСНОВАНИЯ КОНФИГУРАЦИЙ
РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ОХРАНЫ ПРОТЯЖЁННЫХ УЧАСТКОВ**

Аннотация: В работе проведен анализ возможности использования волоконного световода в качестве транспортной линии и сенсора в современных волоконно-оптических средствах охраны, а также особенности их реализации по топологии single mode-multimode- single mode. Приведена методика расчёта суммарного затухания подобных систем. Рассмотрено применение различных современных метрологических средств измерения на основе когерентного детектирования.

Ключевые слова: транспортная среда для передачи данных, распределённый оптоволоконный сенсор (Sensor-in-the-fiber) квазираспределённые волоконно-оптические системы охраны, расчёт суммарного затухания, SM-MM-SM, SMS,OTDR, OFDR, BOTDR.

Abstract: The paper analyzes the possibility of using a fiber optic fiber as a transport line and sensor in modern fiber-optic security devices, as well as the features of their implementation using the single mode-multimode- single mode topology. A method for calculating the total attenuation of such systems is given. The application of various modern metrological measuring instruments based on coherent detection is considered.

Keywords: transport medium for data transmission, distributed fiber-optic sensor (Sensor-in-the-fiber) quasi-distributed fiber-optic security systems, calculation of total attenuation, SM-MM-SM, SMS, OTDR, OFDR, BOTDR.

Целью исследования данной статьи является определение оптимального выбора конструкции волоконно-оптического кабеля, типа его волоконного световода, топологии и разработки методики суммарного затухания в современных распределённых волоконно-оптических системах охраны (ВОСО). ВОСО достигают высоких метрологических характеристик (точность, чувствительность, динамический диапазон) и адаптивности за счет синергии прецизионных средств измерений и корректного выбора пассивных волоконно-оптических компонентов (ПВОК): волоконно-оптический кабель (ВОК) с оптимизированной конструкцией для заданных целей (транспортная линия/сенсорика) и условий эксплуатации, волоконный световод (ВС) с заданными параметрами дисперсии/затухания и нормированной геометрией, коннектора, спектрально-селективные делители (PLC^1/TFF^2), невзаимные циркуляторы, компенсаторы дисперсии и фильтров. Критически важно согласование их ключевых параметров (IL, PDL, температурная стабильность) с физическими принципами детектирования, целевыми условиями работы (длина линии, тип угрозы) и метрологическими требованиями для минимизации ошибок измерения и обеспечения помехоустойчивости сигнала. [1, 2].

В ВОСО, ВОК и его ВС выполняет двойную функцию, как:

- транспортная среда для передачи данных от оконечных устройств: датчиков (сейсмических, акустических, вибрационных, деформационных,

¹ PLC-сплиттеры (Planar Lightwave Circuit) — это интегрально-оптические устройства на основе планарных световолновых схем. Спектрально-селективные (WDM) PLC-сплиттеры используют явление интерференции в волноводных структурах для пространственного разделения оптических сигналов по длинам волн. В зависимости от проектирования структуры, входной сигнал определенной длины волны λ_1 направляется преимущественно в один выходной порт (условно «пропускается»), а сигнал длины волны λ_2 — в другой порт (условно «не пропускается» в первый)

² TFF (Thin-Film Filter) — это тонкоплёночный интерференционный фильтр, являющийся ключевым элементом для создания спектрально-селективных оптических делителей/ответвителей. Эта аббревиатура чаще используется в англоязычной литературе, в русскоязычной чаще говорят «тонкоплёночный фильтр» или «интерференционный фильтр».

температурных), технических средств наблюдения (камеры видеонаблюдения, домофоны) и других устройств к централизованной системе сбора и обработки информации (ССОИ);

- распределённый оптоволоконный сенсор (Sensor-in-the-fiber), где ВС выступает непосредственным чувствительным элементом средства обнаружения (СО). В этом режиме физические воздействия на ВОК вносят детерминированные потери и/или нарушают условия полного внутреннего отражения от его границ, что детектируется средством измерения и анализируется ССОИ для выявления нарушений на протяжённом охраняемом периметре или объекте.

Исходя из этого конструктивное исполнение ВОК в ВОСО жёстко детерминировано его целевым назначением (функцией). При использовании ВОК как транспортной среды (магистраль/внутризоновая связь) требования к конструкции (буферные покрытия, силовые элементы, броня) определяются условиями прокладки (грунт, подвес, кабельная канализация, ограждения) и направлены на максимальную изоляцию ВС в ВОК от внешних механических, температурных и климатических воздействий, обеспечивая стабильность передачи данных.

При использовании ВОК в качестве оптоволоконного сенсора конструкция кабеля оптимизируется производителем на основе стендовых и натуральных испытаний для достижения компромисса:

- минимизация влияния нецелевых внешних факторов (шумов, фоновых вибраций, температурного дрейфа);

- максимизация акустооптического преобразования и чувствительности к специфическим типам угроз (механическому воздействию, вибрации, деформации) на заданном участке.

Таким образом, выбор ВОК требует функционально-ориентированного подхода, где конструкция является критическим параметром, обеспечивающим либо иммунитет его ВС к внешней среде (для транспортных линий), либо контролируемую чувствительность ВС к целевым воздействиям (для сенсорных

линий). В связи с этим основным элементом ВОК в независимости от его конструкции является ВС эксплуатационные параметры которого в ВОСО играет ключевую роль - в транспортных линиях связи он определяет пропускную способность (скорость передачи), дальность распространения сигнала без регенерации и устойчивость к дисперсионным искажениям, а в сенсорных линиях отвечает за точность, чувствительность и скорость локализации внешних воздействий (вибрации, деформации, температуры и других).

Следовательно, выбор ВС как и ВОК осуществляется функционально-ориентированно, исходя из целевого назначения сегмента системы и характеристик подключаемых измерительных или передающих устройств, для оптимизации ключевых показателей эффективности (KPI - Key Performance Indicators) решения.

Современные распределённые ВОСО базируются на стандартизированных архитектурных топологиях: линейной (Point-to-Point), кольцевой (Self-Healing Ring), древовидной (Tree) и звездообразной (Star) [3–5]. Энергетический потенциал таких систем количественно определяется через расчёт суммарного затухания (α_{Σ}) оптического тракта, который интегрирует потери в волокне, на соединениях и пассивных компонентах. Данный параметр является критическим для верификации работоспособности системы, так как непосредственно определяет требования к мощности излучателей, чувствительности приёмников и необходимому запасу по энергии, гарантируя заданную достоверность обнаружения воздействий [2, 6, 7].

При реализации схем, где ВОК выполняет исключительно транспортную функцию (не являясь распределённым сенсором), подключение дискретных датчиков осуществляется путём их последовательного включения в разрыв оптического тракта. Такие датчики моделируются как пассивные компоненты с фиксированными вносимыми потерями, указанными заводом изготовителем, и учитываются в $\alpha_{\Sigma}(\lambda)$ как дополнительный самостоятельный коэффициент ($\alpha_{sensor}(\lambda)$). Мониторинг состояния сенсоров обеспечивается специализированными измерительными модулями, интерпретирующими

их оптический отклик в соответствии с заложенными алгоритмами детектирования.

Комплексный учёт параметров ПВОК, а также ВС ВОК позволяет выполнить точное моделирование энергетического бюджета распределённой системы ВОСО. Это включает:

- расчёт максимальной протяжённости транспортных сегментов с учётом вносимых потерь, дисперсионных ограничений и требуемого запаса мощности;
- определение допустимой длины и конфигурации зон ответственности распределённого волоконно-оптического датчика на основе потерь в ВС, чувствительности метода детектирования и требуемого SNR;
- оптимизацию характеристик активных компонентов (источников излучения, фотоприёмников) для достижения целевых показателей: мощности излучения, стабильности длины волны, динамического диапазона приёмника и скорости обработки сигналов.

Таким образом, параметризация пассивной инфраструктуры является основой для синтеза эффективной архитектуры ВОСО, обеспечивающей одновременное выполнение транспортных и сенсорных функций в рамках заданных KPI (дальности, чувствительности, точности локализации).

На основе полных параметров ПВОК (тип ВС, длина участка, количество и потери точек сварки/разъёмных соединений, вносимые потери сплиттеров, мультиплексоров) и его геометрии возможно произвести детальный расчёт суммарного затухания ($\alpha\Sigma$) в линейном тракте распределённой ВОСО, что позволит:

- оптимизировать параметры источника излучения: подобрать минимально необходимую мощность оптического излучения (P_{out}), длину волны (λ) с учётом дисперсионных характеристик ВС и требованиям к стабильности.
- определить требования к приёмному модулю установить необходимую чувствительность фотодетектора (P_{min}), динамический диапазон и допустимый уровень шумов для гарантированного отношения сигнал/шум (SNR) на заданной дальности.

- корректировать уровень сигнала: рассчитать необходимое и достаточное ослабление аттенуаторов (вносимые потери, L_A) для предотвращения перегрузки приёмника или компенсации избыточной мощности источника, обеспечивая линейность детектирования и стабильность работы сенсорных алгоритмов.

В квазираспределённых ВОСО нередко используется топология SMS (single mode-multimode- single mode) которая предполагает включение многомодовых (ММ) волоконных вставок в разрыв транспортного одномодового (SM) тракта, где ММ-сегменты функционируют как дискретные сенсорные зоны (Рисунок 1). Когда свет из SM попадает в ММ сегмент, он возбуждает множество мод — различных путей распространения света в волокне. Каждая мода распространяется со своей скоростью и имеет свой эффективный показатель преломления. При обратном переходе в SM происходит интерференция этих мод, создавая сложную картину, которая крайне чувствительна к внешним воздействиям.

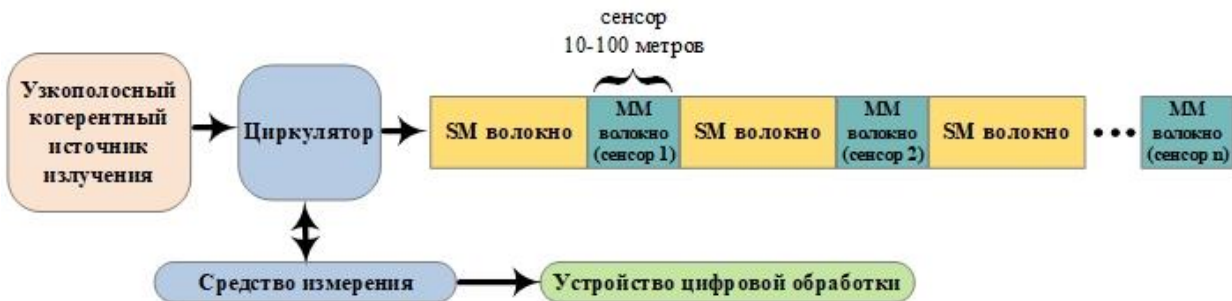


Рисунок 2. OTDR волоконно-оптическое средство охраны, построенное по топологии SMS.

В этом случае суммарное затухание $\alpha_{\Sigma SMS}(\lambda)$ дополняется следующими компонентами и рассчитывается по формуле 1:

- потери на модовом дисбалансе при переходах $SM \rightarrow MM$ и $MM \rightarrow SM$ ($\alpha_{couple}(\lambda)$) из-за неидеального согласования диаметров модовых полей (0,5-3 дБ);

- затухание в ММ-вставке существенно выше, чем в SM-волокне, особенно на λ 1550 нм.

$$\alpha_{\Sigma SMS}(\lambda) = (\alpha_{fSM}(\lambda) * L_{SM}) + (\alpha_{fMM}(\lambda) * L_{MM}) + \Sigma\alpha(\lambda) + (2 * f_{MM} * \alpha_{couple}(\lambda)) \quad (1)$$

где: $\alpha_{fSM}(\lambda)$ - коэффициент затухания SM волокна на длине волны λ (дБ/км);

L_{SM} - общая длина SM (транспортного) оптического тракта (всех сегментов SM) (км);

$\alpha_{fMM}(\lambda)$ - коэффициент затухания MM волокна на длине волны λ (дБ/км);

L_{MM} - общая длина MM (сенсорного) оптического тракта (всех сегментов MM) (км);

$\Sigma\alpha_c(\lambda)$ - сумма потерь: всех разъёмных, сварных SM и MM соединениях, пассивных компонентах на λ (дБ);

f_{MM} – количество вставок MM (шт.).

Топология SMS критична для энергобаланса, так как MM-вставки вводят спектрально-зависимые потери, влияющие на динамический диапазон и точность детектирования сенсорного сигнала. Повышенное $\alpha_{\Sigma SMS}(\lambda)$ является платой за локализованную сенсорику в данной модели.

При проектировании распределённой ВОСО топологии SMS с общей длиной тракта свыше 5 км, корректный расчёт суммарного затухания $\alpha_{\Sigma SMS}(\lambda)$ (Формула 1) требует учёта не физической длины кабеля, а фактической длины ВС. Это обусловлено тем, что ВС уложен в оптическом модуле кабеля с запасом на удлинение (2–10 м/км) относительно несущего силового элемента и заключён в гидрофобный наполнитель, что исключает его жёсткую связь с оболочкой и обеспечивает компенсацию механических напряжений. Пренебрежение этой разницей длин (указываемой в паспорте ВОК) приводит к систематической погрешности в определении $\alpha_{\Sigma SMS}(\lambda)$ и, как следствие, к нарастающему снижению точности локализации событий на MM-сенсорных вставках с ростом протяжённости трассы, поскольку расчётная оптическая длина пути не соответствует физической.

В ВОСО реализованных на топологии SMS используются следующие метрологические методы измерений позволяющих локализовать событие:

1. Рефлектометрии во временной области (OTDR - Optical Time Domain Reflectometer) – принцип основан на обратном рассеянии Рэлея и отражении

Френеля. В ВС вводится короткий мощный оптический импульс. По мере его распространения часть света рассеивается назад вследствие микронеоднородностей стекла. При резких изменениях показателя преломления (стыки, разрывы, коннекторы) возникает отражение Френеля. Приемник OTDR измеряет мощность возвращающегося сигнала как функцию времени, что позволяет определить длину линии, затухание сигнала, потери на соединителях и коннекторах, расстояния до мест неоднородностей волокна [7-8]. Расстояние до точки «события» определяется по времени задержки возврата сигнала, формула 2.

$$d = (c \cdot t) / (2 \cdot n) \quad (2)$$

где: d - расстояние до события (м);

c - скорость света в вакууме ($\sim 3 \times 10^8$ м/с);

t - время между отправкой импульса и приемом отклика (с);

n - групповой показатель преломления сердцевины волокна (зависит от типа и профиля ВС);

коэффициент 2 учитывает путь «туда-обратно».

2. Рефлектометрии в частотной области (OFDR - Optical Frequency Domain Reflectometry) - принцип основан на когерентной интерферометрии и линейной модуляции частоты (CHIRP - Compressed High-Intensity Radiated Pulse). Источник излучает CW, частота которой линейно сканируется во времени. Свет разделяется на опорный и измерительный плечи интерферометра. Свет из измерительного плеча, отразившийся/рассеянный в разных точках волокна, интерферирует с опорным светом на детекторе. Разность оптических путей опорного и измерительного лучей приводит к разности частот (биению) между ними. Анализ частоты этого биения позволяет определить расстояние до точки рассеяния/отражения [9]. Расстояние определяется по частоте интерференционного сигнала, формула 3.

$$d = \frac{c \cdot \Delta f}{2 \cdot n \cdot (dv/dt)} \quad (3)$$

где: d - расстояние до точки рассеяния/отражения (м);

c - скорость света в вакууме ($\sim 3 \times 10^8$ м/с);

Δf - частота биения (Гц);

n - групповой показатель преломления сердцевины волокна;

dv/dt - скорость сканирования частоты (Гц/с) – «CHIRP-скорость»;

коэффициент 2 учитывает путь «туда-обратно».

3. Бриллюэновской рефлектометрии во временной области (BOTDR - Brillouin Optical Time Domain Reflectometr) – принцип основан на распространении мощного лазерного импульса по ВС, в результате чего происходит его взаимодействие с акустическими фононами³ (тепловыми упругими колебаниями) материала ВС (кварца), что приводит к неупругому рассеянию света, называемому рассеянием Манделъштама-Бриллюэна (SBS - Stimulated Brillouin Scattering). Данный метод рефлектометрии превращает ВС в непрерывную линию датчиков температуры и деформации. Так как метод BOTDR является развитием OTDR расстояние до точки «события» определяется по времени задержки возврата сигнала, (формула 2), определение температуры (Т) и деформации (ε) ВС определяется Бриллюэновским сдвигом частоты (ν_B) который линейно зависит от Т и ε , определяется по формуле 4.

$$\nu_B(T, \varepsilon) = \nu_{B0} + C_T \cdot \Delta T + C_\varepsilon \cdot \Delta \varepsilon \quad (4)$$

где: ν_{B0} - Бриллюэновский сдвиг при эталонных условиях (обычно $\sim 10.8 - 11.2$ ГГц для 1550 нм);

C_T - температурный коэффициент ($\sim 1.0 - 1.2$ МГц/°С);

C_ε - деформационный коэффициент (~ 500 МГц/% или 0.05 МГц/ $\mu\varepsilon$);

ΔT - изменение температуры относительно эталона;

$\Delta \varepsilon$ - изменение деформации (удлинения) относительно эталона ($1 \mu\varepsilon = 1$ мкм/м) [2].

В BOTDR в процессе распространения импульса в обратном направлении генерируется спонтанное SBS. Для преодоления ограничений BOTDR (низкое отношение сигнал/шум (SNR), ограниченная дальность, сниженное разрешение), связанных со стохастической природой SpBS, был разработан метод BOTDA

³ Акустические фононы в волоконно-оптике — это возбуждения решётки с более низкой энергией, генерируемые звуковыми волнами и связанные со сжатием и расширением материала.

(Brillouin Optical Time-Domain Analysis). В BOTDA используется два когерентных лазера: импульсный (зондирующий сигнал) вводится с одного конца волокна, а непрерывный сигнал (CW - continuous wave) накачки — с противоположного конца. При совпадении разницы частот зонда и накачки с локальной бриллюэновской частотой сдвига (ν_B) в волокне возникает резонансное вынужденное SBS. Это приводит к усилению зондирующего импульса (или ослаблению накачки) и обеспечивает существенное повышение SNR, увеличение дальности действия и улучшение пространственного разрешения по сравнению с BOTDR [10].

Квазираспределённые ВОСО с топологией SMS представляют собой функциональный компромисс между полностью распределёнными сенсорами на SM-волокне, требующими дорогостоящих, сложных высокоточных измерительных систем [1]. В данной архитектуре MM вставки, интегрированные в SM-магистраль, функционируют как дискретные сенсорные сегменты, позволяя реализовать селективное детектирование и локализацию угроз с применением упрощённых измерительных комплексов. Однако критическим ограничением такой топологии является существенное сокращение максимальной протяжённости участка по причине высокого затухания в MM вставках и при переходах SM→MM и MM→SM.

Используемые источники:

1. Семенов А. Б. СЗО Волоконно-оптические подсистемы современных СКС / Семенов Л. Б. — М.: Академия АйТи; ДМК Пресс. - 632 с., ил. ISBN 5-98453-025-2.
2. Agrawal, G. P. (2013). Nonlinear Fiber Optics (5th ed.). Academic Press. (Глава 4).
3. Chen, L. et al. (2024) Ring Topology Optimization for Long-Range FOSS IEEE Sensors Journal, 24(5). DOI: 10.1109/JSEN.2023.3331611.

4. Kim, Y. & Tanaka, H. (2023) Machine Learning for Intrusion Detection in Tree-Topology FO Networks *Optics Express*, 31(10). DOI: 10.1364/OE.482056.
5. Garcia, M. (2023) *Fiber Optic Perimeter Security Systems* Artech House. ISBN: 978-1-63081-872-0, Глава 4: Topology Design Principles.
6. López-Higuera, J. M. (Ed.). «Handbook of Optical Fibre Sensing Technology» (Wiley).
7. Agrawal, «Nonlinear Fiber Optics», 3th ed., Academic Press 2001.
8. IEC 61746 (Ed. 2.0): Calibration of optical time-domain reflectometers (OTDR).
9. Soller, B. J., Gifford, D. K., Wolfe, M. S., & Froggatt, M. E. (2005). High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies. *Optics Express*, 13(2), 666–674.
10. Qing Bai, Qinglin Wang, Dong Wang, Yu Wang, Yan Gao, Hongjuan Zhang, Mingjiang Zhang, Baoquan Jin (2019). «Recent Advances in Brillouin Optical Time Domain Reflectometry».