

**АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ РАСПРЕДЕЛЕННОГО
АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ****Родькин Никита Ильич**

Академия ФСО России, РФ, г. Орёл

Кулюдо Артем Николаевич

Академия ФСО России, РФ, г. Орёл

Носов Максим Васильевич

научный руководитель, канд. техн. наук, Академия ФСО России, РФ, г. Орёл

Технология распределенного оптоволоконного акустического зондирования *DAS* (*DAS* – *Distributed Acoustic Sensor*) – это технология, позволяющая непрерывно обнаруживать внешнее физическое воздействие на большом расстоянии с помощью когерентного рэлеевского обратного рассеяния сигнала в одномодовом оптоволокне. *DAS* обладает высокой адаптируемостью к окружающей среде, что подразумевает под защитой от электромагнитных помех, стойкостью к химическому воздействию, незаметностью и т.д. Преимуществом данной технологии является возможность количественного измерения внешнего воздействия. Волоконно-оптическое распределенное акустическое зондирование на основе Φ -OTDR (Φ -OTDR – *Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry*) с фазовой демодуляцией в последние годы широко изучалось и применялось в различных сферах, современные системы *DAS* способны обнаруживать физическое воздействие с пространственным разрешением с точностью до метра и частотой дискретизации до одного кГц на расстоянии в десятки километров. Благодаря совместным усилиям *DAS* широко применяется во многих важных областях, например, в охране оптоволоконной линии связи, в охране периметра, железнодорожных линий, мониторинге трубопроводов, обнаружении природных опасностей и т. д. *DAS* является перспективной технологией, и ее потенциальный рынок применения огромен [5, с. 1].

В качестве метода обнаружения неоднородностей *DAS* использует фазочувствительную оптическую рефлектометрию во временной области (Φ -OTDR), а также оптическую рефлектометрию в частотной области (OFDR – *Optical Frequency Domain Reflectometry*).

Наиболее применяемым методом построения датчиков *DAS* является использование фазочувствительной оптической рефлектометрии во временной области (Φ -OTDR – *Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry*). Φ -OTDR – это эффективный способ обнаружения вибраций и неоднородностей волокна с высокой точностью способом приема когерентного света обратного рассеяния Рэлея в чувствительном волокне. Данный вид рефлектометрии обладает рядом преимуществ, такие как быстрая скорость отклика, широкая полоса срабатывания, низкие эксплуатационные расходы и длительный срок службы. С помощью Φ -OTDR можно получить не только интенсивность, но и изменение фазы когерентного обратного рассеяния Рэлея. [1, с. 3]

В когерентном рефлектометре происходит когерентное сложение отраженных сигналов: разность фаз отраженных сигналов влияет на суммарный сигнал и может меняться от нуля (когда разность фаз π) до максимального значения (когда разность фаз нулевая). Разность фаз

очень чувствительна к колебаниям длины участка, на котором распространяются отраженные когерентные сигналы зондирующего сигнала. На основе когерентного волоконно-оптического рефлектометра могут быть созданы распределенные волоконно-оптические датчики, обладающие высокой пороговой чувствительностью и достаточно высоким пространственным разрешением. [1, с. 2]

Внешнее физическое воздействие влияет на характеристики оптического волокна (амплитуда, фаза, частота и т.д.), то есть исходный зондирующий сигнал будет промодулирован данным воздействием. Данное изменение сигнала фиксируется и демодулируется, далее делается вывод о характере воздействия и его местоположении. На рисунке 1 показана типовая схема *DAS* с использованием технологии Φ -OTDR, она использует одночастотный лазерный импульс для обнаружения неоднородностей вдоль чувствительного волокна [5, с. 2].

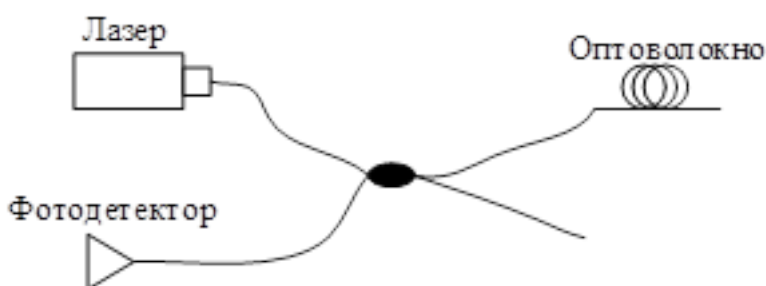


Рисунок 1. Реализация *DAS* с применением схемы Φ -OTDR

В данном случае вибрация изменит фазу распространения зондирующего импульса. Известно, что осевая деформация волокна от внешней вибрации равна ε . Соответствующее изменение показателя преломления волокна n_0 равна $\Delta n_{eff} = \gamma n_0 \varepsilon$, γ - уругооптический коэффициент. Между тем длина волокна l , на котором находится сегмент в состоянии вибрации, также будет изменяться. Изменение длины можно выразить как $\Delta l = \varepsilon \cdot l$. Таким образом, дополнительная фаза от вибрации равна [4, с 15],

$$\Delta\Phi = (1 + \gamma)n_0 k l \varepsilon \quad (1)$$

Согласно уравнению (1), вибрация линейно пропорциональна дополнительной фазе лазера, её можно измерить количественно, применяя фазовую демодуляцию, используемую в технологии *DAS* с Φ -OTDR.

Производительность *DAS* обычно оценивается с помощью показателей производительности. Общие показатели производительности - это пространственное разрешение, длина датчика, полоса отклика, длина считывания, чувствительность, отзывчивость и т.д. В соответствии с нашим пониманием подробные определения перечислены ниже.

Пространственное разрешение показывает, насколько точно возможно определить место воздействующего влияния. Также его можно определить как минимальное различимое пространственное расстояние между соседними помехами в сигналах *DAS*. Физический размер - метр. Пространственное разрешение обычно зависит от ширины импульса и диапазона частотной развертки.

Таблица 1

Результаты

Год	Метод	Ширина импульса	Пространственное разрешение	Длина зондирования
2005 г.	Обычный Φ -OTDR	10 мкс	1 км	30 км
2014 г.	Обычный Φ -OTDR с распределенными усилением	250 нс	25 м	30 км
2018 г.	Цифровой OFDR с временной синхронизацией с согласованной фильтрацией	20 мкс	0,8 м	30 км
2019 г.	Цифровая OFDR с временной синхронизацией и двунаправленным рамановским преобразованием усиление	20 мкс	5 м	30 км

Калибровочная длина - это длина волокна чувствительного блока / канала. В большинстве схем DAS количественная демодуляция достигается за счет разности фаз между двумя точками. Область называется измерительным блоком, а физическое расстояние волокна между двумя точками называется калибровочной длиной [2, с 187]. Физический размер - метр. Длина датчика не имеет определенного отношения к пространственному разрешению. Небольшая калибровочная длина приведет к ухудшению отношения сигнал / шум, в то время как большая длина датчика может вызвать искажение сигнала из-за интегрального эффекта разности фаз. Таким образом, подходящая измерительная длина обычно выбирается исходя из отношения сигнал / шум и длины волны сигнала.

Ширина полосы отклика - это общая ширина полос частот, которые могут быть обнаружены каждым каналом зондирования DAS. Физическое измерение - Герц. Полоса частот отклика обычно непрерывна, в то время как полосы дискретны [3, с 5]. Более широкая полоса отклика обеспечивает более высокую точность обнаружения сигналов.

Таблица 2

Результаты

Год	Метод	Пропускная способность	Наивысшая частота	Длина зондирования
2005 г.	Обычный Φ -OTDR	-	-	30 км
2010 г.	Когерентное обнаружение	1 кГц	1 кГц	30 км
2019 г.	Сверхслабая матрица ВБР и частотное деление мультиплексирование	440 кГц	440 кГц	30 км

DAS может обнаруживать множество влияний на чувствительное волокно. Однако, эффективная дальность зондирования волокна ограничена. По мере увеличения длины волокна потери при распространении будут накапливаться, а отношение сигнал / шум также будет ухудшаться из-за коэффициента затухания импульса. Физический размер - метр или километр. Самой большой дальностью зондирования обладает технология прямого обнаружения с гибридным распределением усиления - 175 км.

Чувствительность обычно определяется как минимальный обнаруживаемый сигнал, который зависит от уровня шума и отношения сигнал / шум. Физический параметр - это деформация

(ε). Чувствительность также можно оценить по спектральной плотности мощности (*PSD* - *Power Spectral Density*), а физическая мера - рад² / Гц (интенсивность) или рад / $\sqrt{\text{Гц}}$ (амплитуда). Чувствительность представляет собой обнаруживающую способность *DAS* [5, с. 5].

Таблица 3

Результаты

Год	Метод	Чувстви
2018 г.	Чирпированный импульс <i>Φ-OTDR</i> с компенсация фазового шума	5рε ≈
2019 г.	Сжатие импульса с компенсация фазового шума	92,84 ≈ 500

При распределенном измерении вибрации (*DVS - Distributed Vibration Sensing*) амплитуда внутренней импульсной помехи используется для обнаружения вибрации. Однако форму волны вибрации трудно получить из амплитуды рисунка, поскольку соотношение отображения между вибрацией и амплитудой немонотонно. Фаза лазера линейно пропорциональна вибрации, и ожидается, что вибрация будет восстановлена посредством фазовой демодуляции. Для количественного измерения вводится метод цифрового когерентного обнаружения в *Φ-OTDR* [4, с 14].

Схема системы с когерентным обнаружением представлена на рисунке. 2, [4, с 16]. Одночастотный когерентный лазер разделен на зондирующий лазер и гетеродин. Одночастотный сигнал модулируется акустическим оптическим модулятором (*AOM - Acoustic Optical Modulator*) и вводится в чувствительное волокно. Сигнал биений обнаруживается сбалансированным фотодетектором (*BPD - Balanced Photo-Detector*). Интенсивность сигнала биений может быть выражена как,

$$I = |E_R|^2 + |E_{LO}|^2 + 2E_R E_{LO} \cos \theta \cdot \cos(\Delta\omega t + \varphi(t)) \tag{2}$$

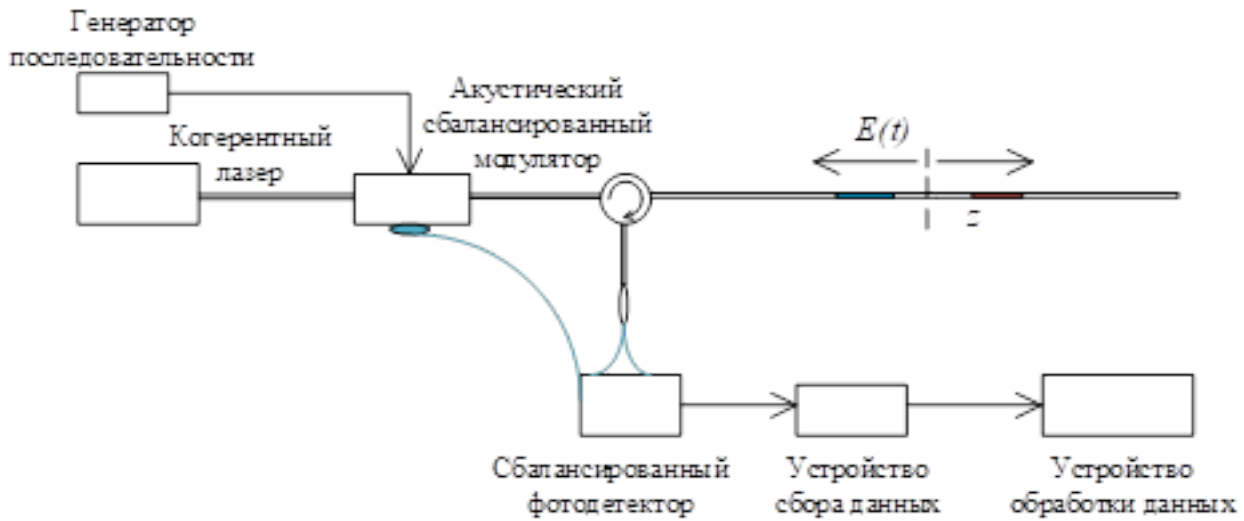


Рисунок 2 Схема системы цифрового когерентного обнаружения

E_R и E_{LO} - амплитуды электрического поля обратного рассеяния Рэлея и гетеродина соответственно. θ - угол между состояниями поляризации. $\Delta\omega$ - сдвиг частоты от АОМ. $\varphi(t)$ - фаза распространения, учитывающая влияние внешней вибрации. Что касается цифрового когерентного обнаружения, амплитуда и фаза могут быть демодулированы и выражается как,

$$\begin{cases} E_R(t) \cos \theta \propto \text{abs} \left(\int_{t-\frac{\Delta T}{2}}^{t+\frac{\Delta T}{2}} AC \times \exp(j\Delta\omega t') dt' \right) \\ \varphi(t) \propto \text{angle} \left(\int_{t-\frac{\Delta T}{2}}^{t+\frac{\Delta T}{2}} AC \times \exp(j\Delta\omega t') dt' \right) + 2k\pi, k = 0, \pm 1, \dots \end{cases} \quad (3)$$

где $AC = 2E_R E_{LO} \cos \theta \cdot \cos(\Delta\omega t + \varphi(t))$ - элемент переменного тока сигнала биений. Вибрация в любом положении волокна может быть получена с помощью пространственной разности фаз соседних положений, $\varphi(t_1) - \varphi(t_2)$ [5, с. 6].

В эксперименте синусоидальный сигнал 200 Гц подается в чувствительное волокно. Результаты демодуляции показаны на рисунке 3. Синусоидальный сигнал претерпел искажения при прохождении через линию. Выяснилось, что амплитудная демодуляция может обнаруживать помехи, но не может восстановить исходную форму волны. Также по результатам эксперимента определили, что форма сигнала фазы соответствует внешней вибрации при фазовой демодуляции с приемлемыми шумами. [5, с. 7]

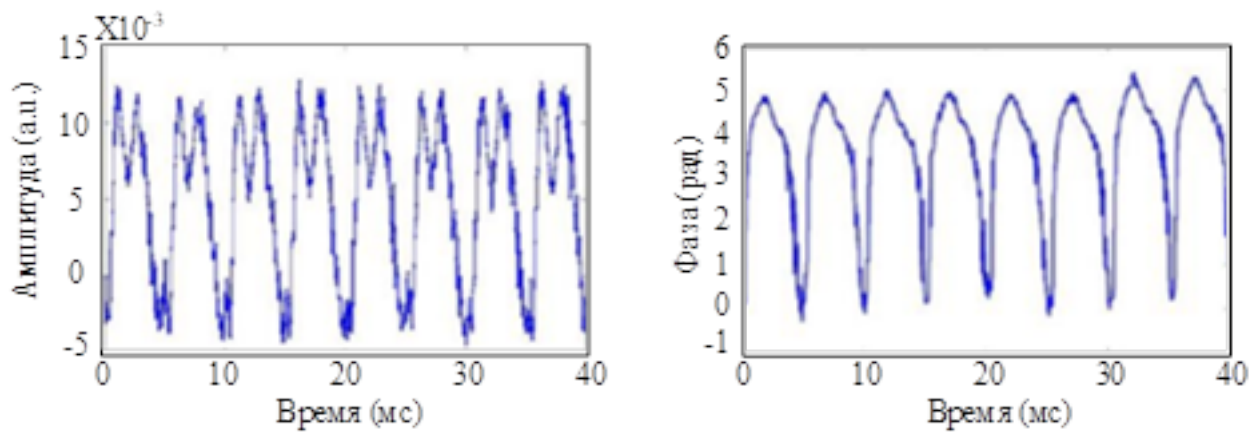


Рисунок 3. Результаты демодуляции а) амплитуда б) фаза во временной области

Таким образом, в данной работе была рассмотрена система распределенного акустического зондирования. В статье проанализированы её основные характеристики, были указаны основные преимущества данной технологии. Можно сделать вывод, что данная технология является динамически развивающейся, т.к. ведется активная работа по улучшению основных характеристик DAS. Были достигнуты результаты в развитии дальности зондирования, также повысились чувствительность и пространственное разрешение датчиков.

Список литературы:

1. Yunjiang RAO, Zinan WANG, Huijuan WU, Zengling RAN, Bing HAN. Recent Advances in Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry (Φ -OTDR). PHOTONIC SENSORS / Vol. 11, No. 1, 2021, 30 с.
2. Dean, T.; Cuny, T.; Hartog, A.H. The effect of gauge length on axially incident P-waves measured using fiber optic distributed vibration sensing. Geophys. Prospect. 2016, 65, 184–193.
3. Zhang, J.; Zheng, H.; Zhu, T.; Yin, G.; Liu, M.; Bai, Y.; Qu, D.; Qiu, F.; Huang, X. Distributed fiber sparse-wideband vibration sensing by sub-Nyquist additive random sampling. Opt. Lett. 2018, 43, 2022–2025.
4. Pan, Z.; Liang, K.; Ye, Q.; Cai, H.; Qu, R.; Fang, Z. Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection. In Proceedings of the Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, Shanghai, China, 13–16 November 2011; p. 83110S.
5. Zhaoyong Wang, Bin Lu, Qing Ye, Haiwen Cai. Recent Progress in Distributed Fiber Acoustic Sensing with Φ -OTDR. Sensors, 2020, 26 с.