

«Дунай» — система мониторинга активности в охранной зоне трубопровода

Д.И. Грознов
начальник отдела¹

А.В. Леонов
к.ф.-м.н., научный консультант¹

О.Е. Наний
д.ф.-м.н., начальник отдела¹

Е.Т. Нестеров
инженер¹

В.Н. Трещиков
к.ф.-м.н., генеральный директор¹
vt@t8.ru

¹Т8, Москва, Россия

Один из перспективных способов контроля активности в охранной зоне трубопровода — мониторинг микровибраций грунта с использованием когерентного рефлектометра. В качестве датчика используется обычное оптическое волокно, проложенное вдоль трубопровода (например, свободное волокно в телекоммуникационной кабеле связи). Перемещение людей или техники, выполнение земляных работ вызывают вибрацию грунта, которая передаётся кабелю и детектируется системой мониторинга.

Материалы и методы

Используется когерентный рефлектометр. Зондирующий импульс посылается в волокно с частотой 1...2 кГц, анализируются изменения в рефлектограмме. Классификация воздействий производится на основе предварительной калибровки (по аналогии с распознаванием изображений).

Ключевые слова

когерентный оптический рефлектометр, безопасность трубопроводов, охранная система

Анализ сигнала, поступающего на когерентный рефлектометр, позволяет не только обнаружить наличие активности в охранной зоне, но и классифицировать источник воздействия. Важное преимущество системы — возможность заблаговременно выявить несанкционированные действия (перемещение техники, земляные работы), угрожающие трубопроводу, и предотвратить ущерб. Также систему можно использовать для обнаружения утечек, наблюдения за движением средств внутритрубно́й диагностики, контроля работы подрядчиков.

Принцип работы

При распространении оптического импульса по оптическому волокну часть света отражается обратно. Отражение происходит как от дефектов волокна, так и от неоднородностей показателя преломления (центров рассеяния), равномерно распределенных по волокну. Если на стороне передатчика дополнительно поставить фотоприёмник, то можно зарегистрировать отражённое излучение и построить график зависимости мощности отражённого сигнала от времени — рефлектограмму.

Вид этой рефлектограммы будет зависеть от того, какой источник излучения используется в рефлектометре — обычный или узкополосный (когерентный). Разницу можно пояснить на простом примере: представим, что в волокне есть всего два близко расположенных центра рассеяния, от которых отражается зондирующий импульс, рис. 1. Будем для простоты считать, что мощности отражённых сигналов одинаковы и равны Р.

В обычном рефлектометре, который применяется для измерения потерь в линии и обнаружения дефектов волокна, используется широкополосный лазер. Отражённые сигналы при этом складываются не когерентно: разность их фаз друг относительно друга меняется во времени, и амплитуда суммарного сигнала получается не регулярной (случайной). Мощность такого сигнала равна сумме мощностей отдельных сигналов, и не зависит от колебаний расстояния между центрами рассеяния.

В когерентном рефлектометре используется существенно более узкополосный и стабильный источник излучения, за счёт чего отражённые сигналы складываются когерентно: разность их фаз друг относительно друга постоянна во времени. Суммарный сигнал при этом может иметь мощность от нуля (если отражённые сигналы сложились в противофазе) до 4Р (если фазы двух отражённых сигналов совпали). Разность фаз очень чувствительна к колебаниям расстояния между центрами рассеяния: его изменение всего на 100 нм вызывает заметное изменение мощности суммарного сигнала. На этом эффекте и основано применение когерентного рефлектометра для задач мониторинга.

Когерентная рефлектограмма представляет собой сильно изрезанную линию, форма которой очень чувствительна к различным

воздействиям на волокно (тепловым, акустическим, электромагнитным), рис. 2. Такая рефлектограмма практически непригодна для обнаружения дефектов волокна, но зато может эффективно применяться для обнаружения и анализа внешних воздействий.

Обнаружение воздействий

Для обнаружения воздействия на волокно, необходимо сделать ряд последовательных рефлектограмм. В данной системе зондирующий импульс посылается в волокно с частотой 1...2 кГц, таким образом, каждую секунду снимается 1–2 тыс. рефлектограмм. Анализируя происходящие в них изменения, можно локализовать место воздействия, изучить спектр воздействующего сигнала, оценить частоту и интенсивность воздействия, его продолжительность и характер изменения во времени. На основе этих данных можно сделать предположения о причине воздействия.

Простейший приём обработки полученных данных заключается в вычислении максимальной разности между несколькими последовательными рефлектограммами для каждой точки волокна. Построенный таким образом график называется разностной рефлектограммой, рис. 3. Для тех участков волокна, где осуществляется внешнее воздействие, амплитуда разностной рефлектограммы будет заметно выше уровня шума.

По набору рефлектограмм можно для любой интересующей точки волокна построить график зависимости амплитуды сигнала от времени (сигналограмму). В лабораторных условиях сигналограмма позволяет оператору буквально прослушать воздействующий сигнал (например, голос человека). Для кабеля, проложенного в грунте, применяется в основном автоматический анализ сигналограмм, т.к. почва не пропускает колебания с частотой выше 200 Гц и прослушивание сигнала не столь информативно.

Применяя к сигналограмме фурье-преобразование, можно получить спектр воздействующего сигнала в интересующей точке волокна (спектрограмму). Экспериментально установлено, что воздействие внешних событий по-разному проявляется в различных спектральных диапазонах. Поэтому для более эффективного анализа внешних воздействий можно выделять полосовыми фильтрами определённые участки спектра, и затем восстанавливать и анализировать отфильтрованную сигналограмму.

На рис. 4 показан ещё один способ визуализации сигнала, который применяется в системе «Дунай» — окно «Водопад». Это комбинация рефлектограммы и сигналограммы. По горизонтали отложено расстояние вдоль кабеля, по вертикали — время (размер окна — 1 мин, чем выше — тем старше). Цветом отображается превышение интенсивности разностной рефлектограммы над пороговым уровнем.

При условии тщательной предварительной калибровки и настройки пороговых значений, «Водопад» представляет собой

эффективное средство визуального анализа ситуации на всём протяжении охранной зоны. Тренированный оператор способен дать оперативную оценку типа воздействия на основе визуального анализа «Водопада».

Сигнал от внешнего воздействия может быть также визуализирован в виде 3D-графика (по оси X отложено расстояние вдоль кабеля, по оси Y — время, по оси Z — интенсивность сигнала разностной рефлектограммы), рис. 5.

Распознавание воздействий

Задача распознавания формулируется следующим образом: по измеренному распределению акустического воздействия вдоль кабеля и спектру сигнала на каждом участке кабеля необходимо распознать причину воздействия.

В настоящее время, классификация воздействий в системе «Дунай» производится на основе предварительной калибровки (по аналогии с распознаванием изображений).

Калибровка системы распознавания включает следующие шаги:

1. Первоначальная настройка системы (устанавливаются пороговые значения для каждого участка волокна в зависимости от характерных уровней шумов).
2. Коррекция параметров распознавания в соответствии с определенными физическими характеристиками линии.
3. Генерация тестовых событий интересующих типов (например, проход человека поперёк кабеля, проезд тяжёлой техники вдоль кабеля и т.п.).
4. Изучение отклика системы на эти события: периодичность и пространственное распределение зон чувствительности, спектральные характеристики.
5. Перевод системы в режим автоматической классификации событий.

Система надёжно распознаёт около 10 типов событий, включая перемещение пешехода, ручную копку, проезд грузового автомобиля, работу тяжёлой техники и др. События

отображаются на карте местности, сохраняются в архиве событий, рис. 6.

Практическое применение

Для создания когерентного рефлектометра, пригодного для практического применения, необходимо решить целый ряд технических задач. Они связаны как с подбором физических характеристик источника излучения и параметров зондирующего импульса, так и с реализацией алгоритмов обработки сигнала и распознавания (классификации) воздействий.

Основное назначение системы — это обнаружение несанкционированной активности (перемещение людей и техники, разработка грунта ручным или механизированным способом), локализация аварий и неисправностей (например, утечек газа из магистрального газопровода). Также система может применяться для контроля прохождения внутритрубных устройств, отслеживания работы подрядчиков.

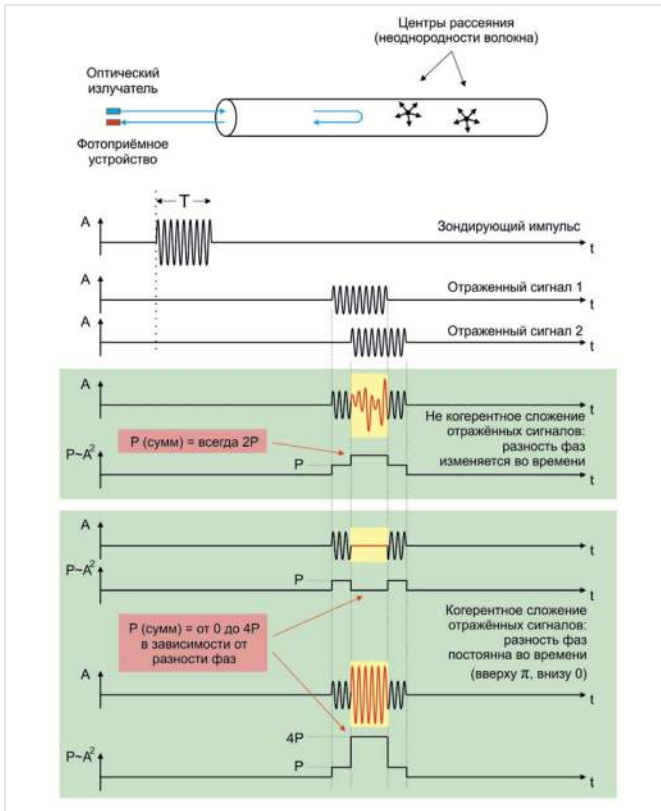


Рис. 1 — Когерентное и не когерентное сложение сигналов

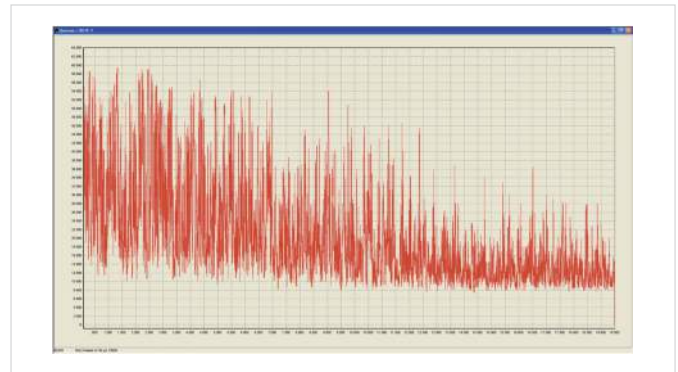


Рис. 2 — Когерентная рефлектограмма

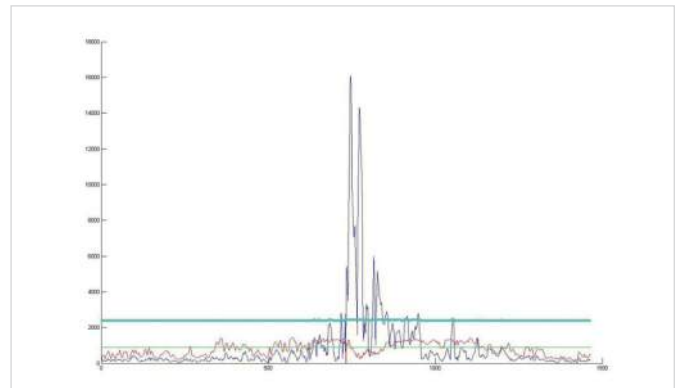


Рис. 3 — Разностная рефлектограмма: проезд лёгкой техники

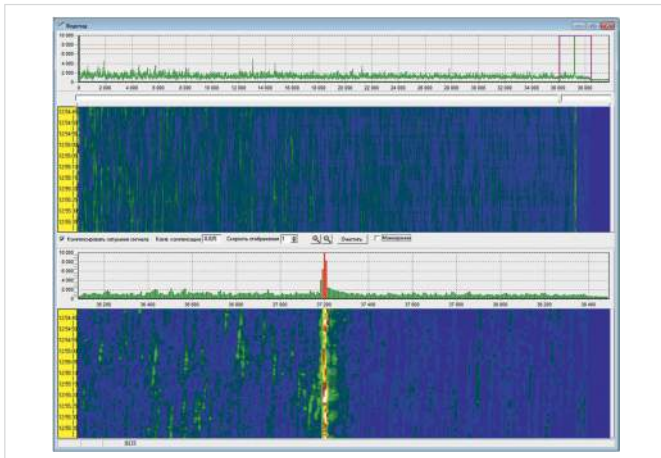


Рис. 4 — «Водопад»: пространственно-временная цветовая индикация сигнала. Нижнее окно — увеличенный участок верхнего окна

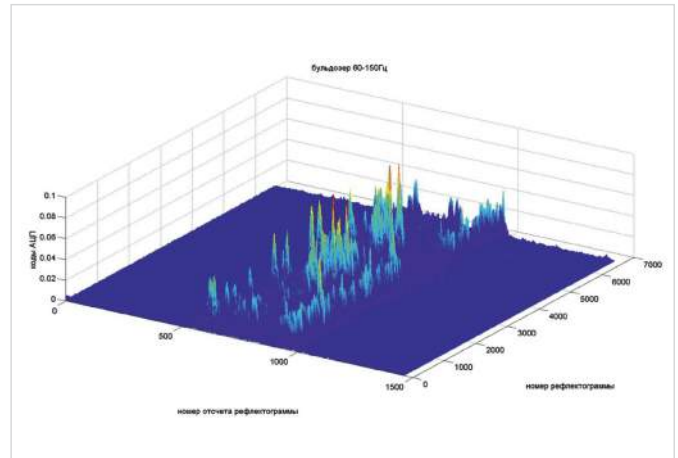


Рис. 5 — 3D-визуализация сигнала от проезда бульдозера, диапазон 60–150 Гц

Итоги

Протяжённость охранной зоны, контролируемой одним рефлектометром, может составлять несколько десятков километров. Чувствительность системы к внешним воздействиям зависит от типа воздействия, физических характеристик кабеля (конструкция, глубины укладки), состояния грунта. В среднем, перемещение и работа тяжёлой техники надёжно детектируется на расстоянии до 100 м от кабеля, движение грузового автомобиля — до 10 м, движение пешехода — непосредственно над кабелем.

Выводы

Системы контроля активности в охранной зоне на основе когерентного рефлектометра обладают многими преимуществами, среди которых: экономичность, скрытность установки, высокая чувствительность, всепогодность, простота в обслуживании. Несомненно, они найдут широкое применение в задачах охраны и обслуживания трубопроводов.

Список используемой литературы

1. Juškaitis R., Mamedov A.M., Potapov V.T.,

Shatalin S.V. Distributed interferometric fiber sensor system. *Optics Letters*, Vol. 17, Issue 22, pp. 1623–1625 (1992). <http://dx.doi.org/10.1364/OL.17.001623>.

2. Shatalin S.V., Treshchikov V.N., and Rogers A.J. Interferometric Optical Time-Domain Reflectometry for Distributed Optical-Fiber Sensing // *Applied Optics*, Vol. 37, Issue 24, pp. 5600-5604 (1998). Available at: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.37.005600>.

3. Нестеров Е.Т., Слепцов М.А., Трещиков В.Н., Наний О.Е., Сусьян А.А. Когерентный оптический рефлектометр. Концепция создания прибора // *T-Comm. Телекоммуникации и транспорт*. 2010. №8. С. 51–54.

4. Нестеров Е.Т., Трещиков В.Н., Камынин В.А., Наний О.Е. Когерентный рефлектометр с полупроводниковым источником излучения // *T-Comm. Телекоммуникации и транспорт*. 2010. С. 36–39.

5. Оборудование волоконно-оптической системы мониторинга протяжённых объектов «Дунай». Сертификат соответствия № РОСС RU.МЛ05.В01507, срок действия до 18.07.2015 г.

6. Трещиков В.Н., Наний О.Е., Грознов Д.И., Нестеров Е.Т. Устройство контроля движения объекта в трубопроводе. Патент на изобретение № 2503879 от 10.01.2014 г. (приоритет 07.12.2012 г.).

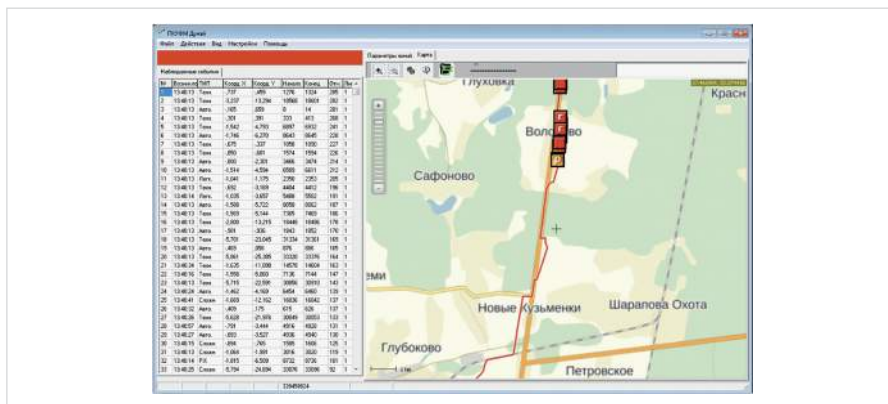


Рис. 6 — Автоматическая классификация событий и их отображение на карте местности

ENGLISH

PIPELINE

"Dunay" — a system for monitoring of activity in the buffer zone of the pipeline

UDC 331.45

Authors:

Denis I. Groznov — head of department¹;

Andrey V. Leonov — ph.d, scientific consultant¹;

Oleg E. Naniy — professor, head of department¹;

Evgeniy T. Nesterov — engineer¹;

Vladimir N. Treshchikov — ph.d, general director¹; vt@t8.ru

¹T8, Moscow, Russian Federation

Abstract

Monitoring of micro-vibrations of soil using coherent OTDR is one of the most promising ways to monitor activity in the buffer zone of the pipeline. An ordinary optical fiber which is laid along the pipeline is used as the sensor (for example, the "dark" fiber in a fiber optic telecommunication cable). Movement of people or vehicles, excavation works are causing a vibration of the soil which is transmitted to the cable and is detected by the monitoring system.

Materials and methods

A coherent OTDR is used. A sounding pulse is sent into the fiber at a frequency of 1 ... 2 kHz,

and changes in the reflectogram are analyzed. Classification of influences is based on pre-calibration (by analogy with the recognition of images).

Results

The length of the buffer zone controlled by a single OTDR may reach up to several dozens of kilometers. The system sensitivity to external influences depends on the type of influence, the physical characteristics of cable (design, depth of installation), and the ground condition. In average, the movement and work of heavy vehicles are reliably detected at a distance of 100 m from the

cable, the movement of the truck — up to 10 m, pedestrian movement — directly over the cable.

Conclusions

Systems for monitoring of activity in the buffer zone with the use of coherent OTDR have many advantages, among which are: cost efficiency, hidden installation, high sensitivity, all-weather operation, easy maintenance. With no doubt they will be widely used for tasks of pipelines' security and maintenance.

Keywords

coherent OTDR, pipeline safety, security system

References

1. Juškaitis R., Mamedov A.M., Potapov V.T., Shatalin S.V. Distributed interferometric fiber sensor system. *Optics Letters*, Vol. 17, Issue 22, pp. 1623–1625. Available at: <http://dx.doi.org/10.1364/OL.17.001623>.

2. Shatalin S.V., Treshchikov V.N., Rogers A.J. Interferometric Optical Time-Domain Reflectometry for Distributed Optical-Fiber Sensing. *Applied Optics*, Vol. 37, Issue 24, pp. 5600–5604. Available at: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.37.005600>.

3. Nesterov E.T., Sleptsov M.A., Treshchikov

V.N., Naniy O.E., Sus'yan A.A. *Kogerentnyy opticheskiy reflektometr. Kontseptsiya sozdaniya pribora* [Kogerentnyy opticheskiy reflektometr. Kontseptsiya sozdaniya pribora]. *T-Comm. Telekommunikatsii i transport*, 2010, №8, pp. 51–54.

4. Nesterov E.T., Treshchikov V.N., Kamynin V.A., Naniy O.E. *Kogerentnyy reflektometr s poluprovodnikovym istochnikom izlucheniya* [Kogerentnyy reflektometr s poluprovodnikovym istochnikom izlucheniya]. *T-Comm. Telekommunikatsii i transport*, 2010, pp. 36–39.

5. *Oborudovanie volokonno-opticheskoy sistemy monitoringa protyazhennykh ob'ektov "Dunay"* [Oborudovanie volokonno-opticheskoy sistemy monitoringa protyazhennykh ob'ektov «Dunay»]. *Sertifikat sootvetstviya № ROSS RU.ML05.V01507, srok deystviya do 18.07.2015*.

6. Treshchikov V.N., Naniy O.E., Groznov D.I., Nesterov E.T. *Ustroystvo kontrolya dvizheniya ob'ekta v truboprovode* [Ustroystvo kontrolya dvizheniya ob'ekta v truboprovode]. *Patent na izobretenie № 2503879 ot 10.01.2014 g.* (priority 07.12.2012).