

Волоконно-оптическая система мониторинга протяжённых объектов (нефтепроводов) на основе когерентного рефлектометра

Незаконные врезки — насущная проблема безопасности трубопроводов. В некоторых регионах хищения нефти и нефтепродуктов достигают 10% от объема прокачки. Техническая оснащённость преступников постоянно растёт: применяются современные методы сварки и бурения, задвижки с дистанционным управлением, веб-камеры для наблюдения за перемещениями охраны и другие новации. Хищения не только ведут к заметным убыткам, но и приводят к экологическим катастрофам. Системы мониторинга, использующие в качестве чувствительного элемента оптоволокно, активно развиваются в настоящее время. Это один из наиболее перспективных типов систем мониторинга протяжённых объектов. Теоретические основы работы таких систем были заложены более 15 лет назад в работах зарубежных и отечественных специалистов. В настоящее время существует как зарубежное, так и отечественное оборудование мониторинга протяжённых объектов на основе когерентной рефлектометрии. Для создания промышленно пригодных систем такого типа производителям потребовалось решить целый ряд технических задач, включая подбор когерентных источников излучения с требуемыми характеристиками, создание интеллектуального программного обеспечения обработки сигнала, тестирование и отладку оборудования в реальных условиях.

Ключевые слова: когерентный рефлектометр, волоконно-оптическая система, мониторинг протяжённых объектов.

Нестеров Е.Т., Марченко К.В.,
Трещиков В.Н., Леонов А.В.,
Компания "Т8"

Незаконные врезки — насущная проблема безопасности трубопроводов. В некоторых регионах хищения нефти и нефтепродуктов достигают 10% от объема прокачки. Техническая оснащённость преступников постоянно растёт: применяются современные методы сварки и бурения, задвижки с дистанционным управлением, веб-камеры для наблюдения за перемещениями охраны и другие новации. Хищения не только ведут к заметным убыткам, но и приводят к экологическим катастрофам [1].

Одна из важнейших задач службы охраны — обнаружение несанкционированной активности в охранной зоне нефте- и продуктопроводов, заблаговременное предотвращение незаконных врезок. Для решения этой задачи может использоваться как визуальный контроль, включая видеонаблюдение и наблюдение с использованием БПЛА, так и различные системы мониторинга физических полей, включая лазерные системы (контроль пересечения лазерного луча) и сейсмические / виброакустические системы (контроль вибрации). Последние, в свою очередь, могут использовать различные типы датчиков вибрации: дискретные датчики (геофоны, пьезодатчики) или распределённые датчики (электрический или оптоволоконный кабель) [2].

Системы мониторинга, использующие в качестве чувствительного элемента оптоволокно, активно развиваются в настоящее время. Это один из наиболее перспективных типов систем мониторинга протяжённых объектов. К их преимуществам относится возможность использования уже проложенного кабеля, отсутствие активного оборудования на линии, отсутствие промежуточных пунктов электропитания, скрытая установка, слабая зависимость от погодных условий и электромагнитных полей, минимальное обслуживание. Теоретические основы работы таких систем были заложены более 15 лет назад в работах зарубежных и отечественных специалистов [3].

В системах мониторинга на основе когерентного рефлектометра, оптическое волокно используется как распределённый датчик вибрации. Рефлектометр периодически посылает в волокно короткие оптические импульсы и анализирует отражённый назад сигнал (рефлектограмму). При механической или акустической активности вблизи от кабеля, вибрация передаётся волокну, что вызывает изменения в рефлектограмме. По этим изменениям можно с высокой точностью определить место воздействия.

В настоящее время существует как зарубежное (QinetiQ Optasense, Англия), так и отечественное ("Дунай", Т8, Россия) оборудование мониторинга протяжённых объектов на основе когерентной рефлектометрии. Для создания промышленно пригодных систем такого типа производителям потребовалось решить це-

лый ряд технических задач, включая подбор когерентных источников излучения с требуемыми характеристиками, создание интеллектуального программного обеспечения обработки сигнала, тестирование и отладку оборудования в реальных условиях.

Прототип когерентного оптического рефлектометра российского производства был описан в научной печати в 2006 г. [4], первый серийный образец был создан компанией "Т8" и описан в научной печати в 2010-2011 гг. [5-7]. Однако в работе [2] справедливо отмечается, что "в открытой печати не найдено достоверных данных об удовлетворительной работе подобных систем на протяжённых (свыше 10 км) объектах". Восполнить этот пробел призвана данная статья. К настоящему времени, система "Дунай" (ООО "Т8") сертифицирована в системе ГОСТ Р [8] и прошла многочисленные полевые испытания на сетях технологической связи ООО "Газпром", линиях связи ОАО "Ростелеком", нескольких полигонах Минобороны, на единственном сертифицированном полигоне для технических средств охраны Минатома.

Описание системы

Система может включать несколько оптических блоков (от 1 до 8) с серверами обработки, одно или несколько автоматизированных рабочих мест (АРМ) оператора, магистральные коммутаторы. К оптическому блоку подключается оптическое волокно. Типовая дальность работы (расстояние вдоль оптического

Таблица 1

Типовая дальность работы системы мониторинга

Количество используемых волокон в кабеле	Дальность работы, км	Протяжённость участка, контролируемого из одного пункта, км
1	40	80
2 (1 рабочее волокно + 1 волокно для накачки)	50	100
3 (1 рабочее волокно + 2 волокна для накачки)	75	150

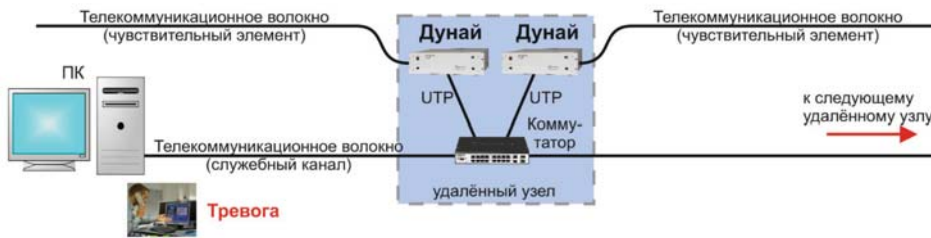


Рис. 1. Схема подключения волокон в пункте охраны

волокна, на котором возможно обнаружение события) составляет около 40 км, однако существенно зависит от ряда факторов (тип и состояние грунта, тип и глубина прокладки кабеля, тип события).

При установке системы в центре охраняемого участка, можно подключить два отрезка волокна в разные стороны. Дальность работы системы можно увеличить с помощью дополнительных оптических усилителей, в том числе и с удаленной накачкой. Однако при этом требуется использовать дополнительные волокна в кабеле, табл. 1.

Для трубопроводов большой протяжённости создаётся система рефлектометров, управляемых из единого центра. Канал управления можно организовать по отдельному волокну, либо по рабочему волокну с использованием

спектрального уплотнения, рис. 1.

Физические принципы работы

В когерентном рефлектометре используется специализированный узкополосный источник излучения. За счёт этого, отражённые сигналы складываются когерентно: амплитуды сигналов, отражённых от разных неоднородностей и дефектов волокна, суммируются с учётом фазовых задержек. Малейшие смещения неоднородностей волокна друг относительно друга (порядка 100 нм) вызывают изменения в когерентной рефлектограмме для данного участка волокна, рис. 2. При этом для прочих участков волокна вид рефлектограммы не меняется. Такие микроскопические смещения могут возникать при микровибрации волокна, вызванной внешним механическим или акустиче-

ским воздействием. Эта особенность позволяет эффективно применять когерентный рефлектометр для охранных задач.

Сравнивая несколько последовательных рефлектограмм друг с другом, можно обнаружить участок, где на кабель осуществляется внешнее воздействие. Специальное программное обеспечение системы "Дунай" позволяет выделять воздействия в полосе частот 3-200 Гц. Верхняя граница этого диапазона определяется свойствам почвы, которая не пропускает колебания с частотой выше 200 Гц. Анализируя частоту, интенсивность, продолжительность воздействия и характер его изменения во времени, можно сделать определённые выводы о причине воздействия (работа двигателя, ручная копка, проезжающий автомобиль и т.п.).

Интерфейс системы управления позволяет наглядно отображать виброакустические воздействия по всей длине кабеля в реальном времени, рис. 3. По горизонтали отложено расстояние вдоль кабеля, по вертикали — время (скользящее окно продолжительностью 1 минута). Нижний график представляет собой увеличенный участок верхнего графика (по выбору оператора). Если амплитуда разностной рефлектограммы превышает заданный порог, это отображается на графике красным цветом.

Результаты испытаний

При использовании кабеля, проложенного в грунте, система позволяет уверенно обнаружить различные источники воздействия на расстоянии до 100 м от кабеля и более. Чувствительность зависит от ряда факторов: глубина прокладки кабеля, тип кабеля, тип грунта и его состояние (сухой, влажный, мёрзлый), типа события, расстояние до рефлектометра.

Оптимальная глубина прокладки кабеля составляет 30-40 см, поскольку при этом до кабеля доходят поверхностные акустические волны.

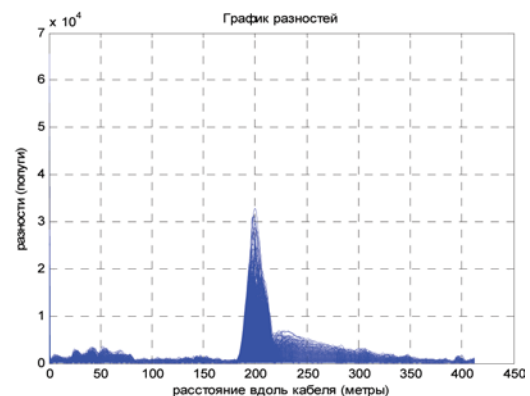
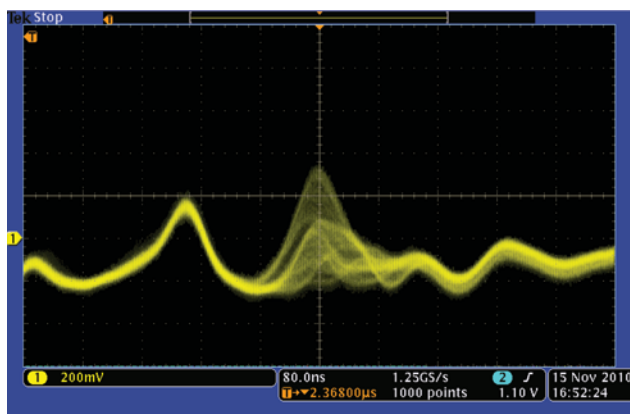


Рис. 2. Несколько рефлектограмм на осциллографе (слева), график разности рефлектограмм (справа)

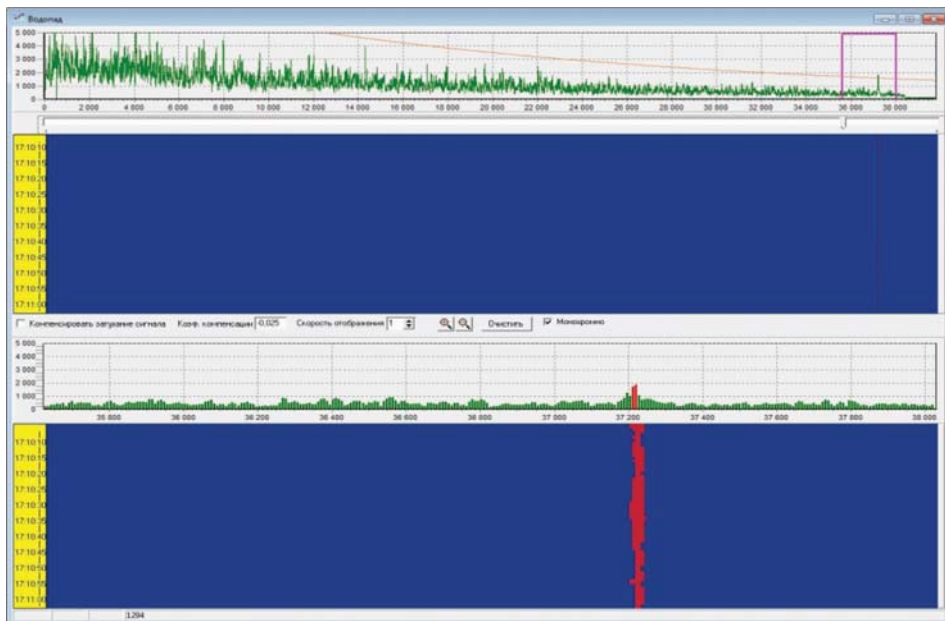


Рис. 3. Интерфейс системы управления, окно "Водопад"

В этом случае, при использовании тонкого волоконно-оптического кабеля, системой уверенно регистрируются движение пешехода и ручная копка на расстоянии до 10 м от кабеля, перемещение и работа тяжёлой гусеничной техники — не менее 150 м от кабеля.

Испытания на сетях ОАО "Газпром" проходили в существенно менее благоприятных условиях: глубина прокладки кабеля согласно СНиП составляла 1,2 м, кабель был проложен менее чем за полгода до испытаний, и почва над ним ещё не дала 100% усадки. Фиксировались события на расстоянии 5,6 км, 18,6 км, 33,6 км от рефлектометра, рис. 4.

Механическая копка и движение тяжёлой техники (экскаватор РС-200) надёжно фиксировались на расстоянии до 100 м от кабеля, перемещение грузового автомобиля — до 10 м от кабеля, перемещение пешехода и ручная

копка — непосредственно над кабелем. Также успешно фиксировалось стравливание газа через свечной кран и движение очистного скребка.

"В процессе тестовых испытаний была подтверждена способность системы обнаруживать перемещение тяжёлой техники, разработку грунта механизированным способом в зоне чувствительности волоконно-оптического кабеля. Зона обнаружения тяжёлой техники составила 100-150 м, при механизированной разработке грунта 50-100 м. В процессе тестовой эксплуатации продемонстрирована декларируемая чувствительность системы по всей длине кабеля...", — отмечается в отзыве ОАО "Газпром". "Предварительные результаты проведённых испытаний подтвердили работоспособность и эффективность применения системы "Дунай" для обеспечения сохранности магист-

ральных газопроводов и ВОЛС, предупреждения несанкционированного производства работ в охранных зонах МГ. Кроме того, проверена эффективность системы для своевременного обнаружения утечек из магистральных газопроводов, а также контроля прохождения внутритрубных устройств".

Возможна прокладка кабеля не в грунт, а непосредственно по протяжённому объекту (трубопроводу, забору, стене здания и т.п.). Однако при этом снижается чувствительность системы, поскольку вибрация грунта хуже передаётся кабелю.

Назначение системы

Система позволяет вести постоянный скрытый мониторинг механической и акустической активности (вибрации) вдоль любых протяжённых объектов, охраняемых зон и периметров. Движение людей или техники, пересечение периметра, выполнение механических работ регистрируются системой в реальном времени, что позволяет оперативно обнаруживать и пресекать несанкционированную активность в охраняемой зоне.

Сферы применения системы:

- охрана нефте- и газопроводов, предотвращение несанкционированных врезок, обнаружение утечек;
- мониторинг движения очистного поршня или дефектоскопа при выполнении внутритрубной диагностики;
- отслеживание регламентных работ в охраняемой зоне, фиксация места и времени работ, контроль работы подрядчиков;
- мониторинг земляных работ возле волоконно-оптических линий связи, предотвращение обрывов линий связи;
- охрана периметра важных технологических объектов, контроль проникновения на охраняемую территорию.

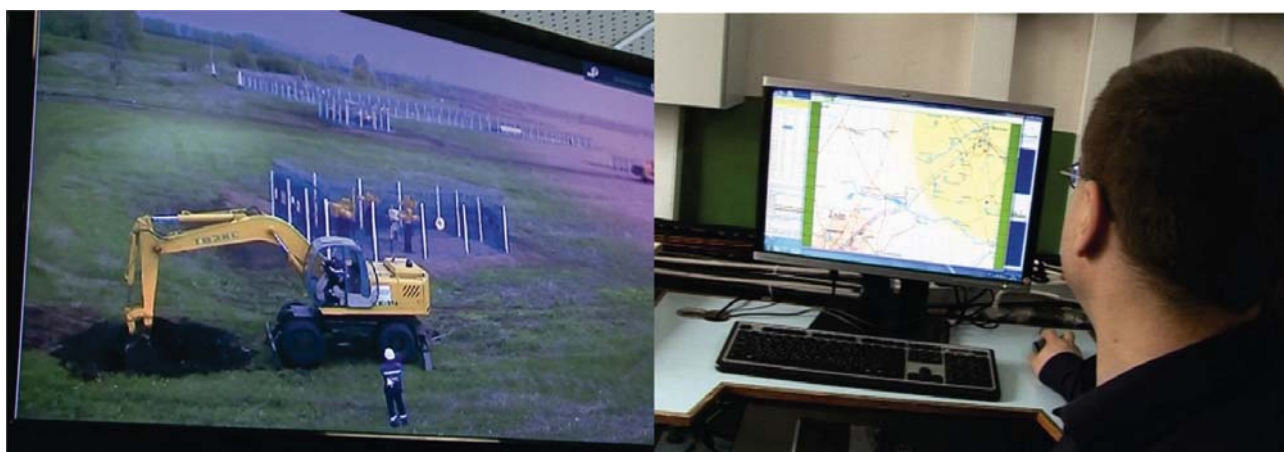


Рис. 4. Испытания системы "Дунай" на сетях ОАО "Газпром". Событие (механическая копка, слева) отображается на карте на компьютере оператора (справа)

Система позволяет контролировать протяжённые охранные зоны и периметры без промежуточных пунктов электропитания и без активного оборудования на линии. Стандартное оптическое волокно используется как система распределённых датчиков, что позволяет получать данные, собранные вдоль десятков километров кабеля, в едином центре управления.

Система вычисляет расстояние до места события в линейных координатах трубопровода, отображает место события на карте местности. Все события автоматически регистрируются в журнале. Возможно формирование сигналов тревоги по заданным критериям и их передача другим охраняемым системам. В частности, реализован стык с базой данных MySQL.

Для развёртывания системы можно использовать свободное волокно в уже проложенном кабеле связи. Это существенно сокращает затраты на внедрение. В том случае, когда требуется прокладка кабеля, её может выполнить местная строительная организация, для этого не требуется привлечение сторонних квалифицированных специалистов.

Установка и настройка системы, обучение персонала заказчика занимает минимальное время. Техническое обслуживание практически не требуется. Работа системы слабо зависит от времени суток и сезона года, хотя для поддержания максимально возможной чувствительности требует сезонной перекалибровки. Погод-

ные условия или электромагнитные помехи оказывают слабое влияние на работу системы. Использование подземного или подводного кабеля скрывает сам факт мониторинга от злоумышленников.

Заключение

Системы мониторинга протяжённых объектов на основе когерентной рефлектометрии в настоящее время активно внедряются в эксплуатацию — как в России, так и за рубежом. Они позволяют не только обнаруживать, но и предотвращать несанкционированные действия в охранной зоне, заблаговременно предупреждая оператора службы охраны о подозрительной активности. Механическая и акустическая активность рядом с проложенным кабелем регистрируется в реальном времени за счёт мониторинга микровибраций оптического волокна.

Оборудование российского производства "Дунай" успешно прошло государственную сертификацию и многочисленные полевые испытания, которые подтвердили возможность его промышленного использования для задач мониторинга и охраны протяжённых объектов.

Литература

1. М. Казанцева. Самара обогнала Дагестан по объемам хищения нефти // Известия, 24 января

2013 г. (<http://izvestia.ru/news/543568>).

2. Жумагулов Б.Т., Калимолдаев М.Н., Попков В.К. и др. Комплексные системы мониторинга нефтепроводов на базе лазерных и пленочных технологий // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2013, №3. — С. 51-54.

3. S. Shatalin, V. Treschikov, A. Rogers. Interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical fiber sensing. // Appl. Opt., 1998, т. 37, с. 5600.

4. Горшков Б.Г., Парамонов В.М., Курков А.С., Кулаков А.Т., Зазирный М.В. Распределенный датчик внешнего воздействия на основе фазочувствительного волоконного рефлектометра // Квантовая электроника, 2006, 36 (10). — С. 963-965.

5. Нестеров Е.Т., Трещиков В.Н., Камынин В.А., Наний О.Е. Когерентный рефлектометр с полупроводниковым источником излучения // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, спец. выпуск "Метрология: измерения и технологии", 2010. — С. 36.

6. 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.

7. Сусьян А.А., Наний О.Е., Камынин В.А., Нестеров Е.Т., Трещиков В.Н., Озеров А.Ж., Слепцов М.А. Метод увеличения дальности работы когерентного оптического рефлектометра // Письма в ЖТФ. 2011, т. 37, №9. — С. 55.

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

Fiber-optic monitoring system extended objects (oil) based on coherent OTDR

Nesterov E.T., Marchenko K.V., Treschikov V.N., Leonov A.V., Company "T8"

Abstract

Illegal tapping - a critical issue pipeline safety. In some regions, the theft of oil and petroleum products reach 10% of the pumping volume. Technical equipment criminals constantly growing: Modern methods of welding and drilling, valves with remote control, webcam to monitor the movements of protection and other innovations. Theft not only lead to significant losses, but also lead to environmental catastrophes. Monitoring system, using as a sensor fiber, actively developed at the moment. This is one of the most promising types of monitoring systems of extended objects. Theoretical foundations of such systems were laid more than 15 years ago in works of foreign and domestic experts. Currently, there are both foreign and domestic equipment monitoring of extended objects based on coherent reflectometry. To create a suitable industrial systems of this type require manufacturers to solve a number of technical problems, including the selection of coherent radiation sources with the desired characteristics, the creation of intelligent software signal processing, testing and debugging of equipment in real conditions.

Keywords: Coherent OTDR fiber / optical system, monitoring of extended objects.

References

1. M. Kazantseva. Samara Dagestan overtaken by volume oil theft / January 24, 2013 (<http://izvestia.ru/news/543568>).
2. Zhumagulov B.T., Kalimoldaev M.N., Popkov V.K. Complex systems and other monitoring oil-based laser and film technologies / T-Comm: Telecommunications and Transport, 2013, No 3. Pp. 51-54.
3. S. Shatalin, V. Treschikov, A. Rogers. Interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical fiber sensing. / Appl. Opt., 1998, v. 37. Pp. 5600.
4. Gorshkov B.G., Paramonov V.M., Kurkov A.S., Kulakov A.T., Zazirny M.V. Distributed sensor external action on the basis of the phase-sensitive fiber reflectometer / Quantum Electronics, 2006, 36 (10), 963-965.
5. Nesterov E.T., Treschikov V.N., Kamynin V.A., Nanii O.E. Coherent OTDR with a semiconductor light source / T-Comm: Telecommunications and Transport, "Metrology: Measurement and Technology", 2010. Pp. 36.
6. Nesterov E.T., Sleptsov M.A., Treschikov V.N., Nanii O.E., Susyan A.A. Coherent OTDR. The concept of creating device / T-Comm: Telecommunications and Transport, 2010, No 8. с. 51-54.
7. Susyan A.A., Nanii O.E., Kamynin V.A., Nesterov E.T., Treschikov V.N., Ozerov A.Z., Sleptsov M.A. Method of increasing the range of coherent OTDR. / Technical Physics Letters. 2011, v. 37, No 9, p. 55.
8. Equipment fiber optic monitoring system extended objects "Dunay". Certificate of conformity № РОСС RU.МЛ05.В01507, valid until 18.07.2015.