

Использование распределенных акустических сейсмических систем при скважинных ВСП

М.Б. Шнеерсон
д.т.н., профессор¹
shneer@bk.ru

¹МГРИ – РГГРУ, Москва, Россия

Использование распределенных акустических приемных систем (distributed acoustic sensing, DAS) в сейсморазведке основывается на том, что под действием внешних волновых нагрузок на кабель происходит его деформация, которая приводит к изменению разностей времен и фаз между исходным и вторичными, рассеянными волновыми импульсами, что и определяет возможность определения по ним положения деформированных по глубине точек.

Материалы и методы

Сравнение сейсмических материалов, полученных с новыми и стандартными приемными системами.

Ключевые слова

сейсморазведка, ВСП, распределенные оптоволоконные приемные системы

Принцип действия распределенных акустических систем и результаты их методического и опытно-производственного опробования изложены в ряде работ и докладов, представленных на международных конференциях и симпозиумах [1–6]. В них рассмотрены особенности приема и регистрации переменных динамических нагрузок оптоволоконными системами, показана на конкретных примерах практическая идентичность волновых полей, зарегистрированных стандартными сейсмоприемниками и распределенными акустическими системами, а также приведены результаты их практического применения в различных районах и условиях. Ознакомление с этими материалами представляет определенный интерес, т.к. позволяет достаточно полно оценить достоинства и ограничения этих систем и перспективы их развития и промышленного использования.

Изложению этих вопросов и посвящена настоящая статья.

1. Распределенные оптоволоконные системы как приемники сейсмических волн

Используемые в сейсморазведке распределенные акустические системы предусматривают подачу луча лазера в опущенный в скважину оптоволоконный кабель и измерение амплитуд и фаз рассеянных волн, образовавшихся на его мелких неоднородностях и распространяющихся от них в прямом и обратном направлениях. При этом часть светового потока возвращается к датчику-излучателю. Измерение задержек времени между моментами излучения и приема колебаний и разностей фаз между ними позволяет определить положения точек рассеяния вдоль оптоволоконного кабеля, длина которого может достигать 10 и более км. Обычно расстояние между этими точками составляет около 1 м, что и определяет разрешенность получаемых данных. Поскольку доля возвращающегося света очень небольшая, то для получения приемлемого отношения сигнал/шум необходимо использование различных способов повышения этого отношения, например, использование нескольких линий или увеличение до нескольких минут длительности измерений. Возможность использования оптоволоконных приемных систем в сейсморазведке основывается на том, что под действием внешних волновых нагрузок, подходящих к кабелю, происходит его деформация, которая фиксируется чувствительной

приемной системой по изменению характера рассеянных волн, что и позволяет по разности времен и фаз между исходным и вторичными волновыми импульсами определять их положение по глубине. Высокая скорость световых волн позволяет практически непрерывно фиксировать положение подходящих к скважине волновых фронтов, т.е. волоконно-оптические распределенные акустические приемные системы аналогичны большой гирлянде сейсмоприемников, но принципиально отличаются от них тем, что, как было отмечено ранее, не требуют остановки скважины и размещения в ней дополнительного оборудования. При этом следует иметь в виду, что если стандартные приемные устройства позволяют измерять три компонента волнового поля, то оптоволоконные — только одну в зависимости от угла между ними и направлением распространения волны. Другой особенностью этих систем является то, что областью приема данных является не одна точка, как в стандартных сейсмоприемниках, а некоторый интервал — секция оптоволоконного кабеля «длина датчика, gauge length», относительная протяженность которого определяет форму регистрируемого импульса и его интенсивность [2]. При этом, если длина датчика меньше распространяющейся длины волны, то волновой импульс имеет простую форму с одним максимумом, в противном случае, когда длина датчика превышает длину волны — импульс имеет двугорбный характер, что показано на рис. 1. Т.е. при уменьшении области измерения повышается разрешенность записей, но снижается амплитуда сигнала, и, наоборот, увеличение области приема ухудшает разрешенность и повышает уровень записей. Этим определяется значимость этого параметра приема и необходимость его выбора в зависимости от решаемых и условий проведения работ. По приведенным в [2] оценкам оптимальная «длина датчика» лежит в пределах от 0,3 до 0,6 длины волны.

Практика применения распределенных акустических систем для регистрации волн в скважинах показывает, что контакт кабеля с обсадной, эксплуатационной или инженерной трубами должен быть достаточно надежным т.к. может оказывать существенное влияние на качество получаемых материалов. В общем случае возможно размещение оптоволоконного кабеля в обсадной колонне или прикреплению его к эксплуатационной или нагнетательной трубам. Каждый из этих

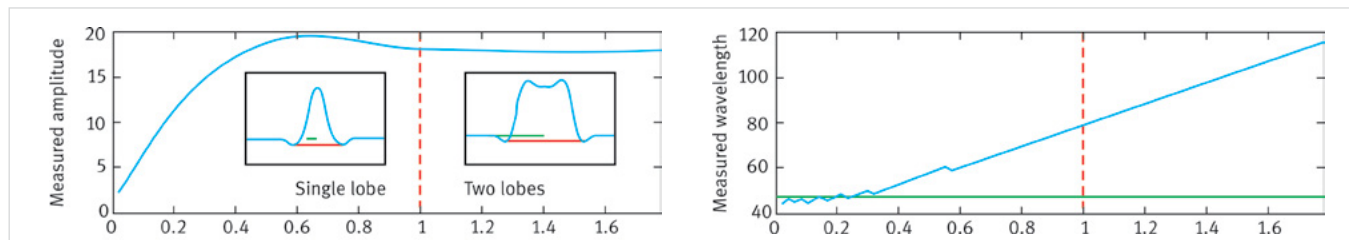


Рис. 1 — Зависимость формы импульса от отношения длительности интервала измерения к длине волны: слева отношение меньше, а справа больше единицы

способов имеет свои положительные и отрицательные стороны. Так, например, помещение кабеля в трубы позволяет менять его, но может приводить к снижению качества получаемых записей при ухудшении контакта кабеля с трубой и др. Закрепление кабеля в обсадной колонне позволяет получить более однородные и качественные материалы, но требует значительных затрат времени и средств при необходимости его замены. Особенности сейсмических материалов, получаемых при этих двух способах размещения распределенных приемных устройств, рассмотрены в работе [2] на примере анализа параметров волн, полученных при пространственных наблюдениях ВСП в глубокой скважине, верхняя часть которой имела наклон порядка 9° , а нижняя часть была практически вертикальна, с углом наклона менее 2° . Анализ материалов, полученных при размещении кабеля в обсадке и в трубе, показал, что в верхней, наклонной части скважины, записи практически идентичны, а на глубине — записи от кабеля в трубе осложнены звоном. Аналогичные результаты были получены и при оценке уровня помех и отношения сигнал/помеха: размещение кабеля в трубе приводит к получению более шумных волновых полей, который хорошо коррелируется с углом наклона скважины (рис. 2). Чем больше наклон скважины, тем он меньше влияет на качество материалов и уровень помех. Этому результату дано следующее объяснение. В наклонных скважинах (угол наклона 9° и более от вертикали) труба под действием силы тяжести прижата к обсадной колонне и получаемые записи по полезным волнам и помехам идентичны, и в этом случае предпочтительней прикреплению кабеля к колонне. На вертикальных участках скважин (угол наклона от вертикали менее 2°) контакт трубы и колонны ослабевает, труба свободна и может вести себя, как вибрирующая струна, что и приводит к появлению сильного звона, который может быть уменьшен путем жесткого закрепления кабеля в трубе. Другой возможный

способ снижения уровня звона — применение диверсионного фильтра. Важность обеспечения хорошего контакта со стенками скважины показана в работе [3]. При опробовании оптико-волонового кабеля при наблюдениях ВСП возникла такая необходимость, т.к. скважина была вертикальной и при полном натяжении кабеля на записях доминировали резонансные помехи, которые полностью перекрывали вступления продольных волн. Причиной этого был плохой контакт кабеля со стенками скважины. Последовательное ослабление натяжения кабеля привело к его провисанию, улучшению его контакта со средой, повышению качества записей и уверенному выделению и прослеживанию волн в первых вступлениях по всему стволу скважины.

2. Сопоставление волновых полей, полученных распределенными акустическими системами и стандартными приемными устройствами

Использованию в сейсморазведке распределенных оптико-волоконных приемных систем предшествовали эксперименты по сравнению качества и полноты материалов, получаемых с ними и со стандартными сейсмоприемниками, основные результаты которых изложены в ряде работ [4–6]. В целом, они оказались успешными, поскольку показали возможность получения идентичных по характеру исходных сейсмограмм и конечных построений, получаемых с новыми и стандартными приемными устройствами. В [4] приведены результаты одновременной регистрации волн волоконно-оптическими системами, закрепленными в обсадке скважины системами и гирляндой сейсмоприемников в диапазоне глубин 1470–2355 м. При этом расстоянии между сейсмоприемниками были равны 15 м, а интервал дискретизации записей распределенных систем составлял 1–2 м. На рис. 3 приведены вертикальные монтажи Р-волн, полученные оптико-волоконной системой (слева) и сейсмоприемниками (справа), которые иллюстрируют

идентичность полученных материалов. В [5] приведены результаты опробования в скважине оптико-волоконной системы, состоящей из последовательности трехкомпонентных (x, y, z) интерферометров, и сравнения ее с вертикальной расстановкой стандартных сейсмоприемников. Для получения сопоставимых результатов была изготовлена гирлянда приборов, в которой 20 интерферометров, образующих оптико-волоконную, многоканальную приемную систему и 24 сейсмоприемника располагались вперемежку друг за другом с шагом 25 футов, образуя единую скважинную косу. Колебания частотой 10–180 Гц и длительностью 20 с возбуждались вибратором, регистрировались и обрабатывались. Обработка материалов предусматривала корреляцию вибрационных записей, получение и анализ волновых полей и амплитудно-частотных спектров зарегистрированных волн. На рис. 4 приведены полученные материалы, сопоставление которых показывает их практическую идентичность. Пример хорошего совпадения материалов наземной съемки и пространственных наблюдений ВСП с оптико-волоконными приемными системами приведен в работе [6]. Последние были выполнены на подземном газохранилище CO_2 по системе наблюдений, предусматривающей последовательное возбуждение колебаний частотой 7–120 Гц и длительностью 50 с в 24 точках, образующих нерегулярную систему, и одновременную регистрацию волн в четырех близко расположенных контрольных скважинах, в обсадку которых были вмонтированы приемные системы на основе оптико-волоконного кабеля. Синхронное накопление сигналов и корреляция виброграмм позволили получить материалы с хорошим отношением сигнал/помеха.

3. Примеры применения оптико-волоконных систем

Положительные результаты работ по сопоставлению полевых сейсмических материалов, полученных с распределенными

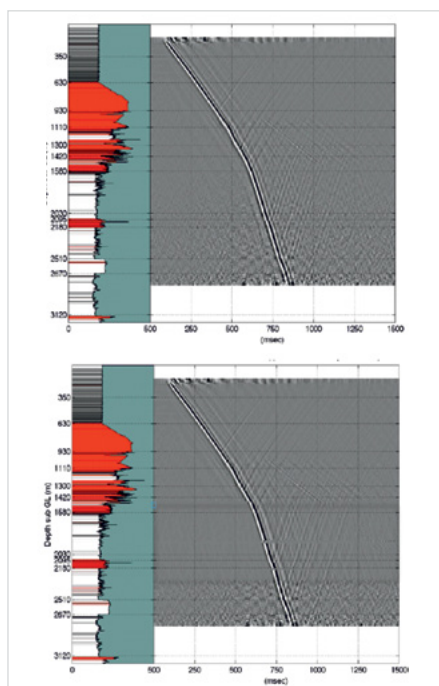


Рис. 3 — Записи Р-волн, полученные распределенной системой (сверху) и стандартными сейсмоприемниками (снизу)

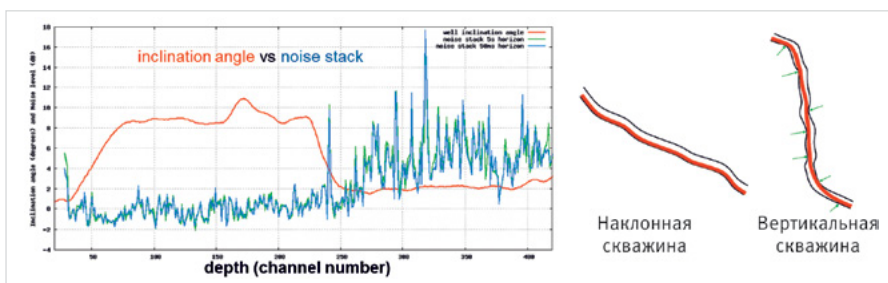


Рис. 2 — Корреляция уровня помех (синяя кривая) с наклоном скважины (красная кривая) при размещении кабеля в трубе, справа — характер контактов кабеля с трубой в наклонной (слева) и вертикальной (справа) скважинах

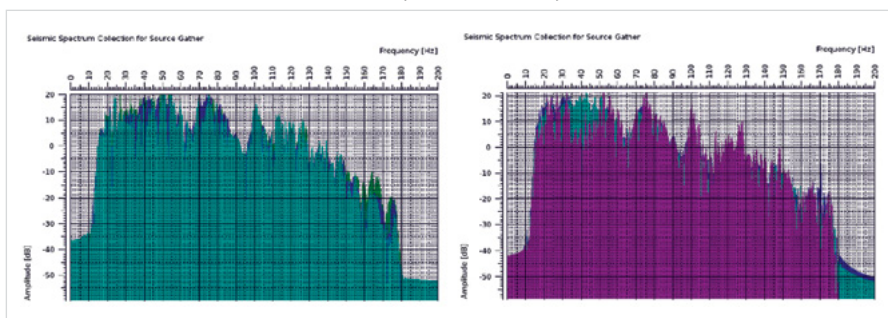


Рис. 4 — Амплитудные спектры, рассчитанные по записям оптико-волоконными (слева) и приборами и сейсмоприемниками (справа)

акустическими и стандартными для сейсмо-разведки приемными системами колебаний, послужили основанием для применения оптико-волоконных кабелей для решения практических задач. В [7] приведены результаты пространственных наблюдений 3D ВСП, проведенных одновременно в двух инжекторных скважинах на глубоководном нефтяном месторождении. Оптико-волоконные кабели были прикреплены к обсадке скважин, перекрывали их всю глубину и были первоначально предназначены для контроля за давлением и температурой. Ранее они не использовались для приема сейсмических колебаний. Возбуждение волн проводилось стандартными пневмопушками, по системе наблюдений, позволяющей получить объемное изображение околоскважинного пространства. В результате были получены материалы хорошего качества, но с несколько более зашумленными записями на небольших глубинах в скважинах. Применение соответствующих способов повышения отношения сигнал/помеха позволили выделить на сейсмограммах первые и последующие вступления волн, в том числе отраженных и кратных, образованных на границе вода-воздух. Положительные результаты выполненных нестандартных работ отражают значимость и перспективы применения оптико-волоконной техники при работах по ВСП, т.к. только с ней оказалось возможным

проведение необходимых наблюдений в инжекторных скважинах.

Распределенные акустические системы перспективны и при наземных сейсмических съемках. На это указывают сейсмические материалы, приведенные в [8]. В работе приведены результаты полевого эксперимента по сравнению записей, зарегистрированных погруженными на небольшую глубину и распределенными по линии профиля оптико-акустическими датчиками (DAS) и 3С сейсмоприемниками на площади Daly в Канаде. На тех и других сейсмограммах выделяются и прослеживаются отраженные и преломленные волны в первых и последующих вступлениях, отражающие общий идентичный характер наблюдаемой волновой картины. Наряду с полезными волнами, на сейсмограммах присутствуют помехи, уровень которых выше на новых приборах, что привело к получению более низких отношений сигнал/помеха. Тем не менее, полученные в небольшом объеме сравнительные полевые материалы, позволяют положительно оценить перспективы применения распределенных оптико-волоконных систем в наземной сейсморазведке.

Итоги

Распределенные системы обеспечивают одновременный прием и регистрацию волн по всей длине опущенного в скважину кабеля

без остановки бурения, и они не чувствительны к внешним электрическим и магнитным полям. Оказалось успешным опробование акустических систем и при наземных сейсмических съемках. В статье по материалам зарубежных публикаций приведены результаты применения в сейсморазведке оптико-волоконных распределенных систем.

Выводы

Обзор публикаций по применению распределенных акустических систем на основе оптико-волоконной техники показал следующее:

- возможность получения идентичных по качеству исходных сейсмограмм и конечных результатов, получаемых с новыми и стандартными приемными комплексами;
- существенное упрощение технологии проведения работ и снижение их стоимости за счет одновременного приема колебаний по всей длине кабеля и исключения необходимости применения перемещаемых по стволу скважины одиночных или гирлянд сейсмоприемников;
- большие перспективы новых приемных систем при проведении скважинных одномерных наблюдений, пространственных съемок 3D ВСП и других видов работ.

ENGLISH

GEOPHYSICS

Distributed acoustic seismic systems and their perspectives in VSP

UDC 550.3

Authors:

Mikhail B. Shneerson — Sc. D., professor¹; shneer@bk.ru

¹MGPI – RSGGY, Moscow, Russian Federation

Abstract

Distributed acoustic sensing (DAS) are systems that use optical fiber cable as a sensor for acoustic signals. Coherent laser pulses are launched into the fiber to measure amplitudes and phases of backscatter waves with time. An acoustic signal, which is coupled by friction or pressure to the optical fiber, induces dynamic strain changes along the cable. These strain changes lead to small displacements of the scattering elements and therefore to variations of the relative phases of the backscattered waves. The fiber behaves as a series of interferometers whose output is sensitive to small changes of the strain along its length.

Materials and methods

Comparison seismic data from uniform

geophones and DGS systems.

Conclusions

DAS systems designed for seismic measurements offer the possibility to record and process this optoelectronic signal in a manner that establishes a linear relationship to the time dependent local strain. In order to record the ground motion not only in space but also in time, snapshots of the wave field are created, by repeatedly firing laser pulses into the fiber at sampling frequencies much higher than seismic frequencies.

Results

Review of publications about DAS application revealed next points:

- a possibility of obtaining results which

quality identic to original seismograms, obtained with the new and standard receiving stations;

- technology of work is simplified and reduced the cost due to the simultaneous reception of vibrations along the entire length of the cable and eliminating the need to use relocatable on wellbore single or strings of geophones;
- great prospects of new sending systems during conducting univariate observation, 3D acquisitions and other works.

Keywords

seismic prospecting, VSP, distributed acoustic sensing (DAS)

References

1. K. N. Madsen, M. Thompson, T. Parker, D. Finfer. A VSP field trial using distributed acoustic sensing in a producing well in the North Sea, First Break, 2013, Vol. 31, issue 11, pp. 51–56.
2. C. Didraga. DAS VSP recorded simultaneously in cemented and tubing Installed fiber optic cables, SEG Expanded Abstracts, Madrid. 2015.
3. A.H. Hartog, B. Frignet. Multi-offset vertical seismic profile acquisition with hybrid optical-electrical wireline cable, EAGE Expanded Abstracts, Amsterdam, 2014.
4. T. M. Daley, D. White, D. E. Miller, M. Robertson, B. M. Freifeld, F. Herkenhoff, J. Cock. Simultaneous acquisition of distributed acoustic sensing VSP with multi-mode and single mode fiber optic cables and 3-component geophones at the aquistore CO₂ storage site, SEG Expanded Abstracts, Denver, 2014.
5. M. Karrenbach, V. Yartsev, M. Emuh, E. Hardin, L. LaFlame, S. Cole, A.Chavarria. Field testing a three-component fiber-optic borehole seismic Sensor array, SEG Expanded Abstracts, Denver, 2014.
6. J. Gotz, S. Luth, J. Henniges, T. Reinsch. Using a fiber optic cable as distributed acoustic sensor foe VSP at the Ketzin CO₂ storage site, EAGE Expanded Abstracts, Madrid, 2015.
7. A. Mateeva, J. Mestayer, Z. Yang, J. Lopez, P. Will, J. Roy, T. Bown. Dual-Well 3D VSP in Deepwater Made Possible by DAS, SEG Expanded Abstracts, Houston, 2013.
8. R. Kendall, A comparison of trenched distributed acoustic sensing DAS to trenched and surface 3C geophones Daly, Manitoba, Canada, EAGE Expanded Abstracts, Amsterdam, 2014.