

## Get to the Point – Seismic Data Acquisition for Full-Wave Imaging

Paul Brettwood, Input/Output UK  
Marty Williams, Input/Output Inc., Stafford Texas

Since the earliest use of seismic data in hydrocarbon exploration, geophysicists have primarily concerned themselves with the apparent direction and speed at which the waves travelled through the earth. The focus has been on P-waves, while shear and near-surface waves are treated as noise that needs to be removed.

Full-wave imaging questions this conventional approach, as geophysicists now realise that a rock particle's behaviour when a seismic wave passes it reveals new information about the sub-surface. This is in part due to the fact that the rock particles do not necessarily appear to move either in the same direction or with the same velocity as the passing wave.

Full-wave acquisition and processing is the next revolution in seismic imaging, as was 3-D seismic twenty years ago. Full-wave imaging is defined as:

- Faithfully recording the complete ground motion from all seismic signals, including source-generated noise.
- Accurately measuring anisotropy, both p-wave and s-wave modes and in terms of both amplitude and velocity.
- Obtaining an unaliased spatial sampling of the reservoir for a given dip, frequency and velocity.
- Recording the full bandwidth of frequencies that the earth will return.

Full-wave imaging has become essential, as seismic imaging to date (including conventional 3-D) has made basic assumptions about the nature of the recorded wave-field that limit our ability to adequately image reservoirs and their associated fluids for maximum economic impact. Because of these assumptions, we are faced with the fact that 3-D – as the technology is currently implemented – is beyond its first-generation success and is diminishing in its ability to add economic value. This reduced usefulness directly affects our ability to find and develop new economic reserves with acceptable risk and perhaps more significantly, plans to extract additional hydrocarbons from existing fields suffer from the declining economic impact of current 3-D technology. The question is: what is missing?

A significant part of the answer lies in the adequate sampling of the full wave-field. Full-wave imaging has the potential to take the interpreter to the next level of imaging quality by providing:

- More accurate and reliable stack amplitudes and AVO analyses.
- Vp and Vs instead of Vp only.
- A frequency link between velocity and the seismic bandwidth.

## К точечной регистрации – сейсмические исследования для многоволнового отображения среды

Пол Бретвуд, корпорация Input/Output, Великобритания  
Мэрти Вильямс, корпорация Input/Output, Статфорд, шт. Техас, США

С самого начала использования сейсмических данных при разведке залежей углеводородов геофизиков, в основном, заботило кажущееся направление и скорость, с которой волны распространялись в геологической среде. Они изучали исключительно продольные (P) волны и относились к поперечным упругим (S) волнам и околоповерхностным волнам как к помехам, которые необходимо устранять.

Построение изображений среды на основе записи полного сигнала ставит под вопрос этот традиционный подход, поскольку геофизики теперь понимают, что поведение частиц породы, когда сейсмическая волна проходит через них, содержит новую информацию о недрах. Причина этого частично заключается в том, что частицы породы, оказывается, не обязательно движутся в том же направлении или с той же скоростью, что и фронт волны.

Регистрация и обработка полного сигнала – это следующее революционное направление в многоволновом отображении среды, подобное тому, каким явилась 3-D сейсмика двадцать лет назад. Построение изображения полного сигнала определяется как:

- Точная запись полного движения частиц грунта от всех сейсмических сигналов, включая волны-помехи, создаваемые источником.
- Точное измерение анизотропии, как на P-волнах, так и на S-волнах, а также их амплитуды и скорости.
- Исключение пространственного аляйсинга для коллекторов с данными углами падения, полосой частот и скоростью распространения волн.
- Запись всей полосы частот сигналов, прошедших через геологическую среду.

Многоволновое отображение среды приобрело важнейшее значение, поскольку до настоящего времени при построении сейсмического изображения, включая традиционное 3-D, исходят из базовых предположений о характере записываемого волнового поля, которые ограничивают нашу возможность адекватно создавать изображение коллекторов и связанных с ними флюидов для максимально экономической добычи. Вследствие указанных предположений, мы оказались перед тем фактом, что 3-D, в том виде как эта технология применяется теперь, не является такой успешной как ее первое поколение, и ее экономический эффект снижается. Эта падающая эффективность напрямую влияет на нашу возможность обнаруживать и разрабатывать новые промышленные скопления углеводородов с

- Symmetry in the recorded wave-field without the distortions imparted by current acquisition and processing practices.
- The possibility of using some of the seismic signal previously considered as noise to contribute to the image and to the final interpretation (e.g. anisotropy, surface waves, and mode contamination).

Consequently, to reach that next level of reservoir imaging quality, the industry needs to overcome the geophysical assumptions made during the emergence of conventional 3-D techniques, namely: isotropy, frequency band limitation, vertical emergent angle and the need to always attenuate noise in the field. However, the industry first required the enabling technology of high vector-fidelity, multi-component, digital receivers and efficient, high channel-count recording systems.

**To improve reservoir imaging quality, the industry needs to overcome the geophysical assumptions made during the emergence of conventional 3-D techniques.**

Before the advent of these technologies, poor vector-fidelity and cumbersome field equipment requirements made economic and technical success almost impossible.

The technology foundations required for land full-wave imaging are high vector-fidelity, three-component, single-point receivers such as VectorSeis® sensors, and high-capacity land acquisition systems, such as Input/Output's System Four™, capable of supporting the high spatial receiver densi-

приемлемым риском и, что возможно более важно, планы по повышению добычи углеводородов на существующих месторождениях страдают от снижения экономического эффекта современной 3-D технологии. Возникает вопрос: чего же не хватает?

Значительная часть ответа заключается в адекватном квантовании полного волнового поля. Многоволновое отображение дает возможность интерпретатору перейти на следующий уровень качества построения изображения, обеспечивая:

- Более точные и надежные динамические параметры (амплитуды) и результаты AVO-анализа (зависимости амплитуды отражения от удаления).
- $V_p$  и  $V_s$  вместо исключительно  $V_p$ .

**Чтобы улучшить качество изображения продуктивного пласта, отрасль должна преодолеть допущения, сделанные геофизиками во времена появления стандартных 3-D методов.**

- Частотную связь между скоростью и полосой частот сейсмических волн.

• Симметрию в записанном волновом поле без искажений, вызванных применяемыми в настоящее время методиками регистрации и обработки данных.

• Возможность использования части сейсмического волнового поля, ранее рассматриваемой как помехи, для улучшения изображения среды и для окончательной интерпрета-



## Передовые технологии позволяют Вам достичь новых целей.

Настало время многоволновой сейсморазведки, и здесь компания Input/Output, Inc. сохраняет лидерство. Все больше нефтяных и газодобывающих компаний, использующих наши передовые технологии, получают возможность выявлять новые перспективные объекты. Именно здесь новейшие технологии приобретают реальную ценность. Мы непрерывно разрабатываем и внедряем наиболее передовые технологии, нацеленные на решение конкретных задач отрасли. Они постоянно проходят полевое тестирование и со-

вершенствуются. Это позволяет с успехом применять их по всему миру для решения наиболее сложных геологических задач. Необходимость поиска новых месторождений и максимальное увеличение объемов добычи ставит перед сейсморазведкой новые задачи и требует применения новых технологий. Не правда ли логично создавать лучшие технологии, когда потребности в них растут? Мы лидируем с нашей технологией в многоволновой сейсморазведке. Шагайте в будущее вместе с нами – компанией Input/Output, Inc.



[www.i-o.com](http://www.i-o.com) / многоволновая широкополосная сейсморазведка

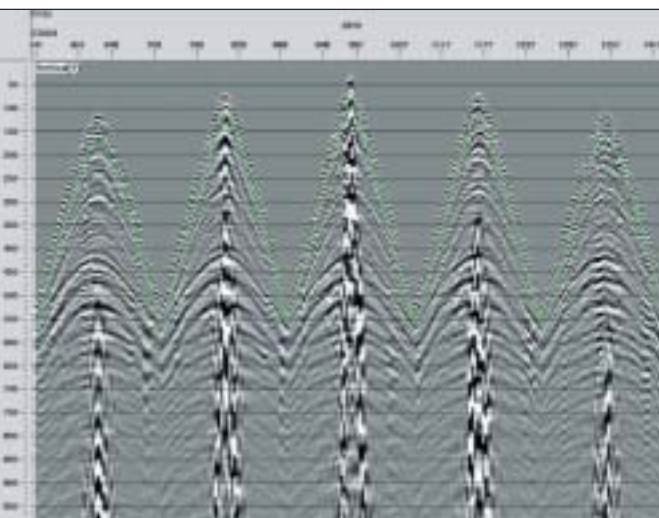
Построение многоволновых отображений. Заставьте технологию работать на Вас.

ties and large channel count operations required by wide-azimuth and long-offset recording. A significant corollary to the high-channel count and the sensor technology is the additional benefit of significantly improved operational efficiencies due to the incorporation of next-generation technologies into the recording systems (Tessman et al. 2004). This corollary mitigates the cost impact and potential HSE issues of high channel-count operations.

## Requirements for Full Wave

Full-wave recording requires at least six considerations. These are:

1. High-vector fidelity, multi-component, single-point sensors, providing:
  - Extremely accurate measurements of all ground motion - both seismic signal and noise.
  - No directional bias, making them ideal for recording azimuthal variations in seismic velocities and amplitudes (anisotropy).
  - Preservation of the relative amplitudes between components, thus allowing successful vector-oriented processing,



● Fig. 1a. An unprocessed VectorSeis recording containing noise in the form of a heterogenous surface wave. After filtering with the Vector system and processing of the signal (Fig. 1b), the heterogenous surface wave is successfully attenuated.

● Рис. 1а. Необработанная запись VectorSeis с помехами в виде неоднородной поверхностной волны. После фильтрования в системе Vector и обработки сигнала (рис.1б), неоднородная поверхностная волна успешно ослаблена.

- Freedom from intra-array statics, providing higher-bandwidth, higher-resolution seismic signals.
  - Easy deployment, better coupling, with lower weight and bulk for improved field operational efficiency.
2. A wide-azimuth 3-D patch (to address the azimuthally-oriented components of amplitude and velocity anisotropy);
  3. Offsets sufficiently long to allow at least 45-degrees of reflection angle (noting that this angle is beyond the point where the assumption of a two-term velocity is necessarily valid and where the vertically oriented symmetry of anisotropy can become significant).
  4. A sufficiently high channel-count to accommodate nos.2 and 3 above without spatially aliasing the target in either the p-wave or c-wave domains (noting that this consideration does not require the noise to be acquired in a spatially unaliased form nor to have the target vastly over-sampled to address source-generated noise):

ции (например, использование анизотропии, поверхностных волн и обменных волн).

Следовательно, чтобы достичь этого следующего уровня качества изображения продуктивного пласта, отрасль должна преодолеть допущения, сделанные геофизиками во времена появления стандартных 3-D методов, а именно изотропию, ограничение полосы частот, вертикальный угол подхода волны и необходимость всегда ослаблять помехи в поле. Однако, сначала отрасли потребовались технологичные многокомпонентные цифровые приемники с высокой точностью регистрации вектора колебаний и эффективные регистрирующие системы с очень большим количеством каналов. До появления этих технологий, низкая векторная точность и необходимость использовать громоздкое полевое оборудование практически не давали возможности достичь экономического и технического успеха.

Основу технологии, требующейся для многоволнового отображения среды, составляют трехкомпонентные, точечные приемники с высокой векторной точностью, такие как датчики VectorSeis®, и высокопроизводительные наземные системы сбора данных, такие как System Four™ компании Input/Output, способные поддержать высокую плотность расстановки приемников и большое количество каналов, требуемых при широкоазимутальной регистрации данных в достаточном диапазоне удалений. Значительным результатом применения высокой канальности и приемников нового типа является заметное повышение производительности, благодаря использованию технологий следующего поколения в регистрирующих системах (См. библиографию: Tessman et al. 2004). Этот результат оправдывает возросшую стоимость и повышение требований к охране здоровья, труда и окружающей среды при использовании высококанальных систем.

## Требования к регистрации полного сигнала

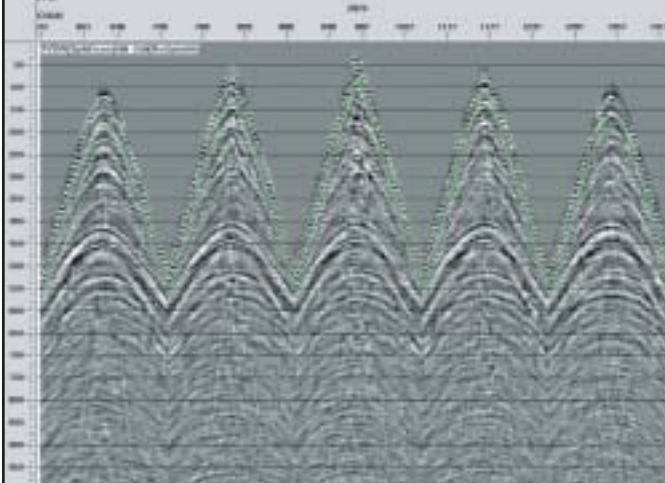
Запись полного волнового поля включает, по меньшей мере, следующие шесть требований:

1. Многокомпонентные, точечные датчики с высокой векторной точностью, обеспечивающие:

- Чрезвычайно точные измерения колебаний частиц грунта, вызванных как сейсмическим сигналом, так и помехами.
- Отсутствие зависимости регистрируемых сигналов от азимута, что делает эти датчики идеальными для записи азимутальной зависимости скоростей и амплитуд сейсмических волн (анизотропия).
- Сохранение относительных амплитуд компонентов регистрируемого сигнала, что обеспечивает его векторную обработку.
- Исключение статики внутри группы, что обеспечивает более широкополосные сейсмические сигналы.
- Легкое размещение, лучший контакт с грунтом, меньший вес и объем для повышения производительности полевых работ.

2. Широкоазимутальная площадная расстановка 3-D (для выявления и учета азимутальной зависимости скоростей и амплитуд сейсмических волн).

3. Достаточно большие удаления «источник-приемник», обеспечивающие, по крайней мере, 45-градусный угол отражения волны (заметим, что этот угол находится за рамками, где допущение двучленной скорости правомерно и где анизотропия с вертикальной осью симметрии может стать значительной).



• Fig. 1b. The same VectorSeis recording seen in Fig. 1a after successful attenuation of the heterogeneous surface wave via the Vector system and processing of the signal.

• Рис. 1b. Та же запись VectorSeis, что и на рис. 1a, но с успешно ослабленной неоднородной поверхностной волной с помощью фильтра Vector и обработки сигнала.

• Full-wave acquisition techniques for improved P and S-wave images require high capacity, high channel count systems that can efficiently acquire, transfer and record large amounts of data (Mougenot, 2004). In addition, full-wave survey designs with adequate wide-azimuth sampling at target depths require a large number of deployed receiver stations. When combined with three-component sensors, the required system channel count can easily exceed 10,000. An additional factor is that full-wave acquisition

4. Достаточно высокая канальность для удовлетворения требований, изложенных в пунктах 2 и 3 выше, без пространственного алейсинга целевых объектов, освещаемых на Р (продольных) и С (обменных) волнах (отметим, что для ослабления волн-помех не требуется ни регистрация помех без алейсинга, ни избыточное квантование на уровне целевых объектов).

• Методика многоволновой сейсморазведки для улучшения изображений на Р- и S-волнах требует применения мощных высокочанальных регистрирующих систем, которые могут эффективно передавать и записывать большие объемы данных (См. библиографию: Mougenot, 2004). Кроме того, системы наблюдений для регистрации полного волнового поля должны быть достаточно широкоазимутальными и высокочанальными. С учетом трехкомпонентных датчиков требуемая канальность может легко превысить 10 000. Нужно также иметь в виду, что для записи полного волнового поля требуется большее время регистрации, поскольку скорости S-волны меньше, чем скорости Р-волны.

• Площадными расстановками сейсмоприемников с большим числом активных каналов необходимо эффективно управлять, чтобы свести до минимума потребление энергии и провести контроль качества различных параметров в реальном времени. Наряду с этими требованиями, необходимо применять облегченное, легко устанавливаемое оборудование, которое достаточно надежно для работы в жестких полевых условиях.

• Современные регистрирующие системы, такие как System Four компании I/O, соответствуют этим требованиям создания многоволновых отображений среды. Опволоконные поперечные (межлинейные) кабели, обеспечивающие высокоскоростную передачу данных, быстродей-

**Serving the World's Oil & Gas Operating, Service and Supply Companies Across the Value Chain in Russia and the CIS**

**IPRESS Eurasia**



**UPSTREAM**

**DOWNSTREAM**

**OFFSHORE**

**MOSCOW**

Phone/fax: +7 095 229 1055

Phone/fax: +7 095 229 9894

sales@oge.ru

**HOUSTON**

Phone: +1 281 463 0502

fax: +1 281 855 07026

mikeloughlin@sbcglobal.net

**LONDON**

Phone: +44 (0) 7710 122 258

Phone/fax: +44 (0) 1702 480 455

stephen@habermel.fsnet.co.uk

BPA Worldwide membership applied for in July 2004.

requires longer listen times as S-wave velocities are lower than P-wave velocities.

- Large spreads and active receiver patches must be managed efficiently to minimize power consumption and to carry out a variety of QC parameters in real time. Coupled with these demanding data handling, efficiency and QC requirements is the need for lightweight, easily deployed equipment that is sufficiently robust to operate reliably in harsh field environments.

- Modern recording systems such as I/O System Four address these full-wave imaging requirements. Fibre-optic cross-lines capable of high data transmission rates; fast, reliable network telemetry architectures and power delivery systems that self-heal in redundant deployment enable cost-effective full-wave acquisition. Parallel network architectures coupled with buffering and handshaking protocols ensure that there is a path for seismic data to get back to the recorder, even when severe cable disruption occurs.

5. Point-source and point-receiver acquisition (to preserve as faithfully as possible the anisotropy, especially given the acquisition of the long offsets at widely varying azimuths and to accommodate No. 6 below).

6. To faithfully record and preserve the maximum bandwidth of frequencies the earth will return, with special considerations given to the low frequencies (given the very deep targets now being explored where p-wave bandwidth is normally limited, given that converted-wave data is already band-limited and considering that high-resolution reservoir analysis using acoustic and elastic inversion normally requires a link between amplitude and velocity that normally does not exist in seismic data).

## Conclusions

Over the last 50 years, seismic imaging advances have occurred in a number of technological waves, each resulting in improved exploration successes and better hydrocarbon reservoir characterizations that result from clearer seismic images. This latest imaging revolution – full-wave imaging – together with the technologies that make it possible, delivers high-quality seismic images to oil companies and operational benefits to contractors. With high-fidelity, three-component, single-point receivers and wide-azimuth surveys, full-wave imaging delivers improved resolution, more efficient noise suppression and higher quality seismic images that ultimately improve our geological and geophysical understanding of oil and gas reservoirs. 🔴

### ACKNOWLEDGEMENTS:

The authors gratefully acknowledge input from the VectorSeis Leadership Team, Joe Jacquot and Cara Kiger at Input/Output.

ствующие, надежные сетевые телеметрические структуры и системы энергоснабжения, которые самовосстанавливаются при резервном развертывании, обеспечивают экономичную регистрацию полного сигнала. Параллельные сетевые структуры, объединенные с протоколами буферизации и установления связи, обеспечивают маршрут передачи сейсмических данных на записывающее устройство даже в том случае, когда происходит значительное повреждение кабеля.

5. Получение данных с использованием точечных источников и точечных приемников (чтобы определить анизотропию как можно точнее, особенно при регистрации данных на больших удалениях «источник-приемник» в широком диапазоне азимутов, и для того, чтобы соответствовать требованиям пункта 6 ниже).

6. Сохранение максимальной полосы частот полезных волн, уделяя особое внимание низким частотам (с учетом большой глубины залегания объектов, исследуемых сейчас, где полоса частот Р-волн обычно ограничена и с учетом того, что обменные волны уже имеют ограниченный диапазон частот, а также учитывая, что для высокоразрешающего анализа коллекторов с использованием акустической и упругой инверсии требуется связь между амплитудой и скоростью, которой обычно не существует в сейсмических данных).

## Выводы

За последние 50 лет прогресс в построении сейсмических изображений среды происходил в виде ряда технологических волн, каждая из которых приводила к более успешной сейсморазведке и лучшему описанию нефтегазовых коллекторов, получаемому в результате более точных сейсмических изображений. Многоволновое отображение – действительно революционное достижение – наряду с технологиями, сделавшими его возможным, обеспечивает высококачественные сейсмические изображения для нефтяных компаний и, таким образом, повышает эффективность работы подрядчиков. С высокоточными, трехкомпонентными точечными приемниками и широкоазимутальными системами наблюдений, многоволновое отображение обеспечивает улучшенную разрешающую способность, более эффективное подавление помех и более высокое качество сейсмических изображений, что, в итоге, улучшает наше понимание геологических и геофизических свойств нефтяных и газовых пластов. 🔵

### БЛАГОДАРНОСТЬ:

Авторы выражают искреннюю благодарность за помощь руководству VectorSeis, Джо Джакуту и Каре Кигерт, компания Input/Output.

## Selected References • Избранная библиография

**Tessman, D. J., Bahorich, M., and Monk, D. [2004]** Recent advances in point receiver technology: Are field arrays a requirement any longer? AGE Research Workshop, Advances in seismic acquisition technology. (Последние достижения в технологии использования точечных приемников: Нужны ли еще группы сейсмоприемников?)

**IAGC [2003] Industry at a crossroads:** A message from the geophysical industry. The Leading Edge, 14-17. (Промышленность на перепутье: Информация от геофизической отрасли).

**Tessman, D. J. and Maxwell, P. [2003]** Full-Wave Digital Seismic Recording and the Impact of Vector Fidelity on Improved P-Wave Data, Canadian Society of Exploration Geophysicists Recorder 28, 22-24. (Запись полного цифрового сейсмического сигнала и влияние векторной точности на качество регистрации продольных волн).

**Maxwell, P., Tessman, D. J., and Reichert, B. [2001]** Design through to production of a MEMS digital accelerometer for seismic acquisition. First Break, 19, 141-144. (От проектирования до производства цифрового акселерометра MEMS для сбора сейсмических данных).

**Mougenot, D. [2004]** Land seismic: needs and answers. First Break 22, 59-63. (Наземная сейсмика: потребности и решения).

**Kappius, R. and Crews, G. [2001]** Adaptive vector filters for ground roll reduction, Canadian Society of Exploration Geophysicists Annual Convention Expanded Abstracts. (Адаптивные векторные фильтры для ослабления поверхностных волн-помех).

**Williams, M. and Jenner, E. [2002]** Interpreting seismic data in the presence of azimuthal anisotropy; or azimuthal anisotropy in the presence of the seismic interpretation. The Leading Edge, 8, 771-774. (Интерпретация сейсмических данных при наличии азимутальной анизотропии или азимутальная анизотропия при сейсмической интерпретации).

**Jenner, E. [2002]** Azimuthal AVO: Methodology and data examples. The Leading Edge, 8, 782-786. (Азимутальная зависимость амплитуды отражения от удаления: Методология и примеры данных).