

## Использование анализа комплексных трасс для калибровки 4D и подавления 4D шума

Henning Høeber,<sup>1</sup> Steve Campbell,<sup>2</sup> Mel Dyce<sup>2</sup> и Dave Whitcombe<sup>2</sup>

За последние 10 лет или около того, прогресс в методике сейсмической регистрации и алгоритма обработки привел к устойчивому улучшению качества данных мониторинга и принятию методики для применения в разнообразных обстановках. Фундаментальный подход к 4D остается без изменений: близкое повторение геометрии наблюдения, за которой следует методика обработки в целях уменьшения остаточных различий. Но, даже используя сложные 4D методики обработки, все наборы данных 4D характеризуются некоторым уровнем остаточных шумов 4D при получении данных командами для их интерпретации. Вычитание двух 3D наборов данных убирает неизменную, 'геологию' и дает ключ к пониманию и интерпретации изменений, вызванных добычей.

Однако в разностных данных имеется ряд проблем. Первое, 3D шум от двух съемок разных лет добавляется к разностным данным (обе дисперсии шума вносят положительный вклад в разность). Второе, остаточная 'флуктуация фазы' также как и временные сдвиги, связанные с добычей, осложняют интерпретацию разностных разрезов, и частой практикой является попытка провести локальную временную коррекцию данных с целью разрезов разности амплитуд. Мы также позже увидим, что очень малые локальные фазовые неточности (флуктуация фазы) может быть причиной неповторяемости, измеренной в NRMS. (NRMS – часто используемая мера фонового шума 4D и определяется как RMS разности между трассами двух съемок, поделенная на среднюю энергию этих трасс. Значения NRMS могут лежать между 0 и 2 и большие значения NRMS указывают на более шумную 4D разность.)

Имеется множество решений этих проблем, самое простое - подавление дополнительного шума (в реальности сглаживание высокочастотное дрожание фазы) перед тем как производить вычитание 4D, а также различные методики взаимного выравнивания сигналов (смотрите, например, Høeber et al., 2005). При использовании данных методов рекомендуется получить дополнительные данные от интерпретаторов. На практике, мы рассматриваем кубы разности 4D с дополнительной калибровкой как новые атрибуты, полученные по исходным разностям 4D, поскольку большая часть интерпретация заключается в установлении того, что становится частью калиброванных данных, а что убирается. Ключевым моментом во всем этом является то, что имеющиеся методики калибровки являются по своей природе статистическими – калибровка может быть 'запущена вручную', например, путем использования более локальных операторов - и представлять собой интерпретацию разности 4D. И наоборот, в данной работе, мы вводим

понятие *аналитического* разложения разности 4D. Две компоненты данного разложения описывают разность 4D, принимая во внимание изменения амплитуды и фазы. Мы покажем, что в некоторых условиях это может существенно уменьшить NRMS.

**Калибровка мгновенной фазы и амплитуды**

Анализ комплексной трассы (Taner et al., 1979) говорит нам, что мы можем комбинировать записанную трассу  $X(t)$  со своей квадратурной трассой  $X_Q(t)$  для получения комплексной трассы

$$X_C(t) = X(t) + iX_Q(t) = A(t)e^{i\gamma(t)}.$$

Таким образом, записанная трасса, т.е. реальная часть  $X_C(t)$ , является произведением мгновенной амплитуды  $A(t)$  и косинуса мгновенной фазы  $\gamma(t)$ .

На Рисунке 1 дается пример этого разложения на примере двух наборов данных съемок UKCS. Каждая записанная трасса является синусоидой частоты  $f(t)$ , которая является производной фазы, модулированная амплитудой  $A(t)$ . Эти характеристики часто применялись в обработке сейсмических данных (смотрите, например Chopra и Marfurt, 2007).

Используя разложение двух наборов мониторинговых данных, мы имеем:

$$\begin{aligned} X_1(t) &= A_1(t) \cdot \cos(\gamma_1(t)), \\ X_2(t) &= A_2(t) \cdot \cos(\gamma_2(t)). \end{aligned}$$

Разложение,

показанное выше, позволяет нам собирать данные с амплитудой или косинусом фазы (далее называемым 'фазой' для простоты), которые заменяются соответствующими значениями для других годов съемки. Мы называем это 'мгновенная калибровка'. В качестве альтернативы, мы можем рассчитать средние амплитуды и фазы. Обозначая средние значения чертой, средняя мгновенная калибровка амплитуды становится:

$$\begin{aligned} A_1 \cdot \cos \gamma_1 &\rightarrow \bar{A} \cdot \cos \gamma_1 \\ A_2 \cdot \cos \gamma_2 &\rightarrow \bar{A} \cdot \cos \gamma_2 \end{aligned}$$

Средняя мгновенная калибровка фазы достигается путем:

$$\begin{aligned} A_1 \cdot \cos \gamma_1 &\rightarrow A_1 \cdot \overline{\cos \gamma} \\ A_2 \cdot \cos \gamma_2 &\rightarrow A_2 \cdot \overline{\cos \gamma} \end{aligned}$$

<sup>1</sup> CGGVeritas, Oslo, Norway.

<sup>2</sup> BP, Aberdeen, UK.

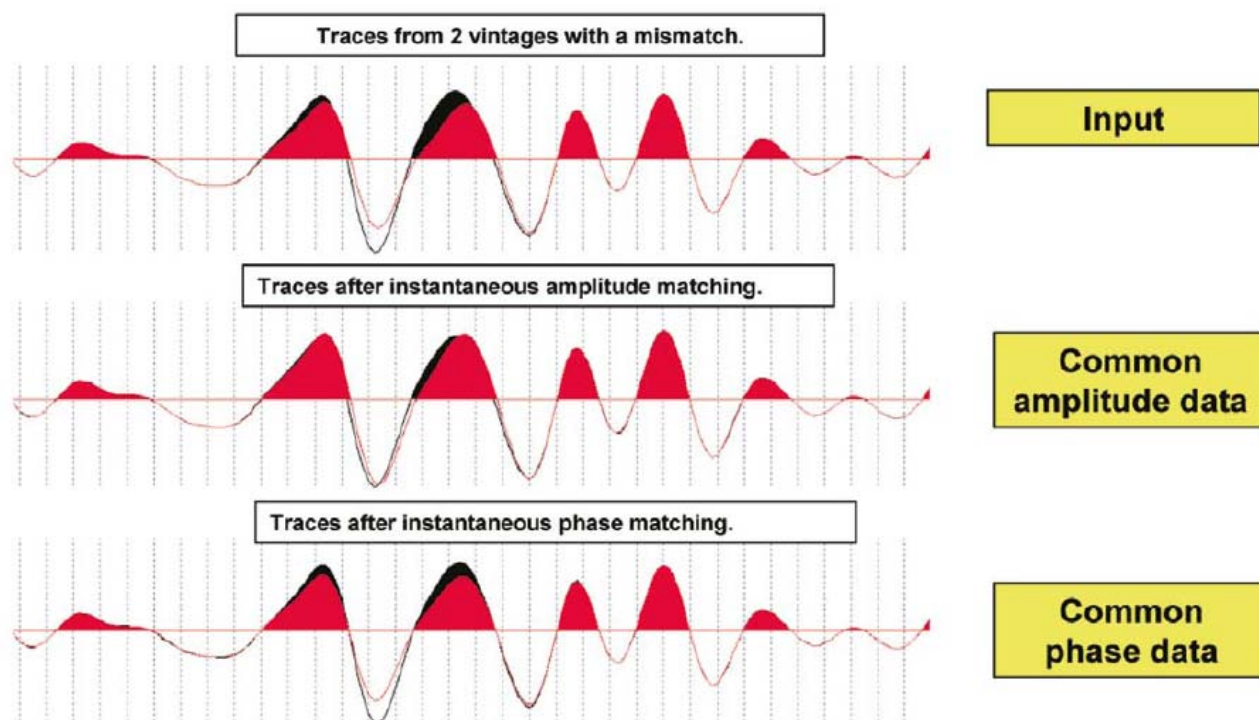
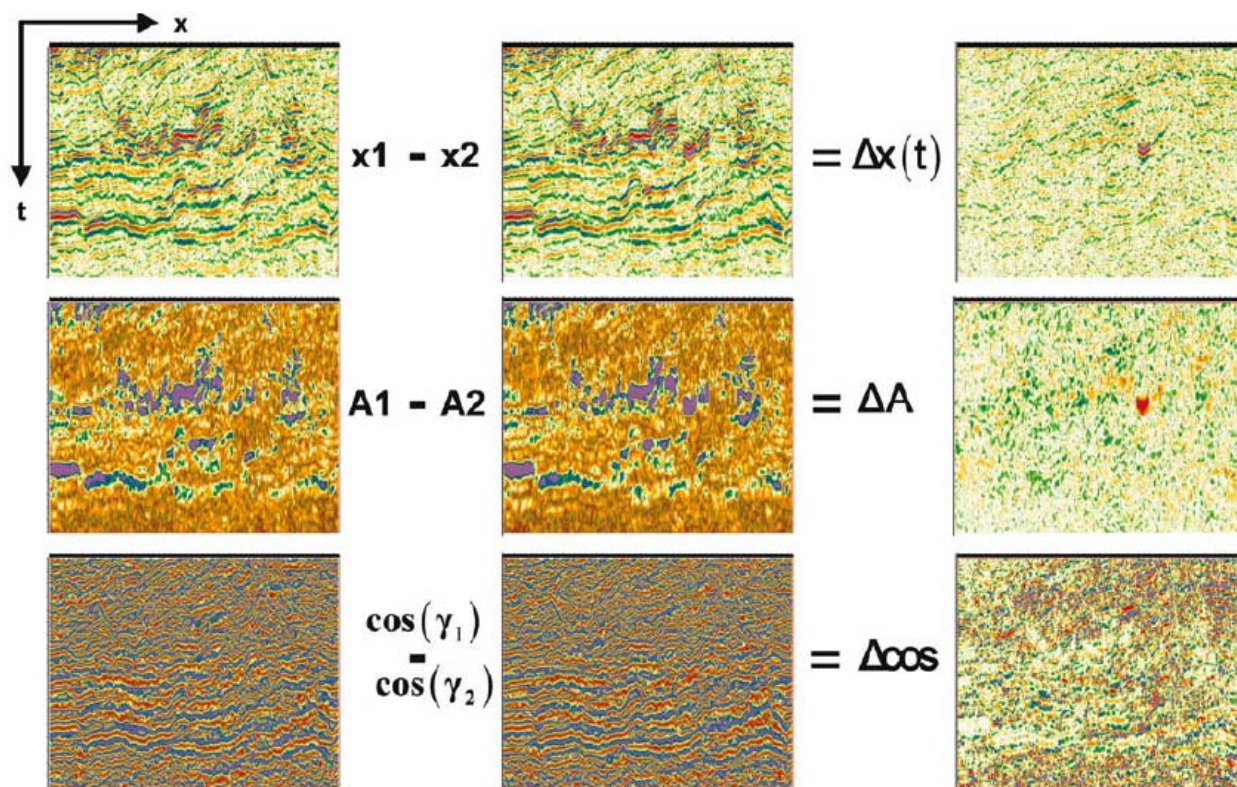


Рисунок 1 Исходные данные (верхнее изображение) и соответствующие мгновенные атрибуты: амплитуда (посередине) и фаза (внизу), которые являются составляющими описываемой методики.

Рисунок 2 Две сейсмотрассы (красный и черный) с 4D разностью (вверху); после калибровки мгновенной амплитуды (посередине) остаточная разность 4D объясняется только остаточным дребезгом фазы; и наоборот, после калибровки мгновенной фазы (внизу) дрожание фазы было убрано, осталась только разница амплитуд.





На рисунке 2 показан синтетический пример, в котором используются две трассы, где вторая трасса была создана путем добавления небольшого остаточного локального сдвига фазы и амплитуды к данным в области импеданса. Мы видим, что трассы хорошо увязаны по амплитуде после калибровки мгновенной амплитуды и что они хорошо выровнены, если мы выбираем калибровку по мгновенной фазе. Методика очевидно идеально подходит для подавления остаточного небольшого дрейза фазы среди плохо выровненных сейсмограмм и позже мы увидим дополнительные примеры. Отметим, что мы не радуем за использование калибровки мгновенной фазы для выравнивания данных по времени. При наличии крупных временных сдвигов, рекомендуется каскадный подход, при котором калибровка мгновенной фазы выполняется после начального выравнивания во времени с использованием взаимной корреляции или более устойчивых методик изменения масштаба/трансформации.

Мы можем рассматривать компоненты средних мгновенных атрибутов как общие области амплитуд и фаз. Общие части были введены Coleou, Hoeser, и Lescerf (2002), которые использовали методику пространственного факторного кокринга для разложения разностного разреза на фазовую и амплитудную компоненты. Как отмечено выше, ключом к этим типам статистического анализа является тщательный выбор параметризации с тем, чтобы по неосмотрительности не удалить часть сигнала 4D при выполнении статистической калибровки. Альтернативная методика была недавно представлена Reid et al. (2005), который использовал SVD разложения при работе над данными перемежающихся съемок разных лет для разделения двух групп данных на четыре собственных или «айген» изображения общей части, разности 4D и двух частей остаточного шума. Имея обе эти методики, форма 4D сигнала также как и шум, содержатся в частичных разностях 4D съемок, относящихся к общей части сейсмических данных. В условиях 4D, может быть весьма полезно комбинировать два набора данных с разными характеристиками сигнал/шум (смотрите, например, Duffaut et al., 2003) такие как данные океанического донного кабеля (ОБС) и данные, полученные с косой. Разность, относящаяся к общей части, может быть избавлена от шума с помощью разных операторов, приспособленных под характеристики шума тех или иных данных. В данной работе мы уделяем внимание преимущественно данным, полученным с косой и таким образом, будем использовать только среднее значение фаз и амплитуд (и мы используем термины «среднее» и «общее» как взаимозаменяющие). Мы отмечаем, однако, что более сложные общие части могут быть получены по мгновенным атрибутам.

Instantaneous phase matching	Instantaneous amplitude matching
$A_1 \cdot \cos(\gamma_1) \rightarrow A_1 \cdot \cos(\gamma_1)$	$A_1 \cdot \cos(\gamma_1) \rightarrow A_1 \cdot \cos(\gamma_1)$
$A_2 \cdot \cos(\gamma_2) \rightarrow A_2 \cdot \cos(\gamma_1)$	$A_2 \cdot \cos(\gamma_2) \rightarrow A_1 \cdot \cos(\gamma_2)$
Common phase matching	Common amplitude matching
$A_1 \cdot \cos(\gamma_1) \rightarrow A_1 \cdot \overline{\cos(\gamma)}$	$A_1 \cdot \cos(\gamma_1) \rightarrow \bar{A} \cdot \cos(\gamma_1)$
$A_2 \cdot \cos(\gamma_2) \rightarrow A_2 \cdot \overline{\cos(\gamma)}$	$A_2 \cdot \cos(\gamma_2) \rightarrow \bar{A} \cdot \cos(\gamma_2)$

**Рисунок 3** Использование мгновенных атрибутов для создания калиброванных наборов данных: Две группы данных делятся на мгновенные атрибуты, которые затем могут быть рекомбинированы различными способами для получения новых калиброванных групп данных, как показано. Полоса сверху означает общую часть атрибута; в простейшем случае, это может быть среднее двух данных.

На рисунке 3 приводится обзор имеющихся методик, о которых говорилось до сих пор. Теперь мы обратимся к приложению идеи к определению разности 4D.

#### 4D разность в терминах атрибутов комплексной трассы

После вычитания мы обнаруживаем следующее точное выражение разности двух данных в терминах их мгновенных амплитуд и фаз:

$$X_1 - X_2 = (A_1 - A_2) \times \overline{\cos(\gamma)} + \bar{A} \times (\cos(\gamma_1) - \cos(\gamma_2))$$

или более краткая запись

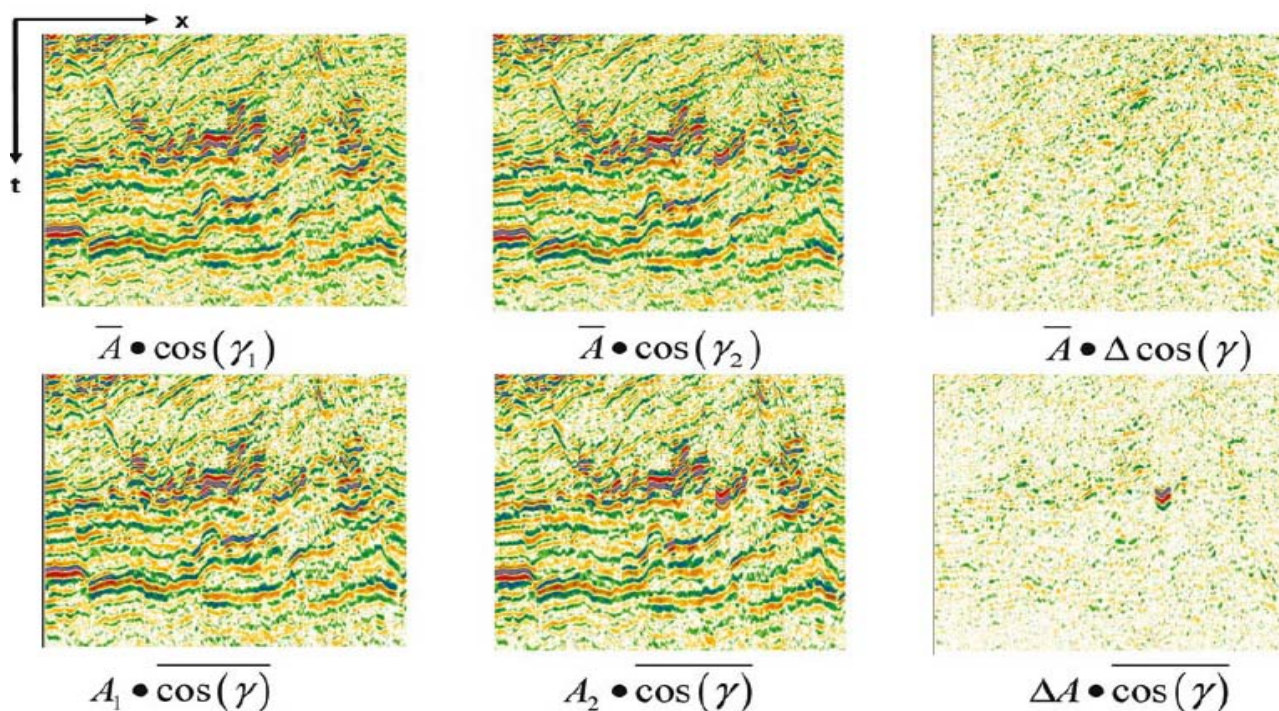
$$\Delta X = \Delta A \times \overline{\cos(\gamma)} + \bar{A} \times \Delta \cos(\gamma)$$

Это точное разложение разности 4D на два члена, описывающих амплитудные и фазовые разности, соответственно. Назовем первый член 'общая фаза', а второй 'общая амплитуда'. Например, если в разности 4D преобладает изменение амплитуд и отсутствуют временные сдвиги, вызванные добычей, или наблюдается небольшое остаточное дрожание фазы, то первый член доминирует в разности 4D. В этом случае, калибровка мгновенной амплитуды существенно уменьшает 4D сигнал, тогда как калибровка фазы уменьшает 4D шум. И наоборот, на участках, где данные имеют равную амплитуду, но не лежат на одной линии, будет важен второй член. Это разложение позволяет нам производить простую интерпретацию 4D разности на основе атрибутов и методик калибровки, которые были введены в предыдущем разделе. Они также обеспечивают подходящий QC в целях проверки успешного выполнения процедуры выравнивания по времени при устранении небольших остаточных дрожаний фазы.

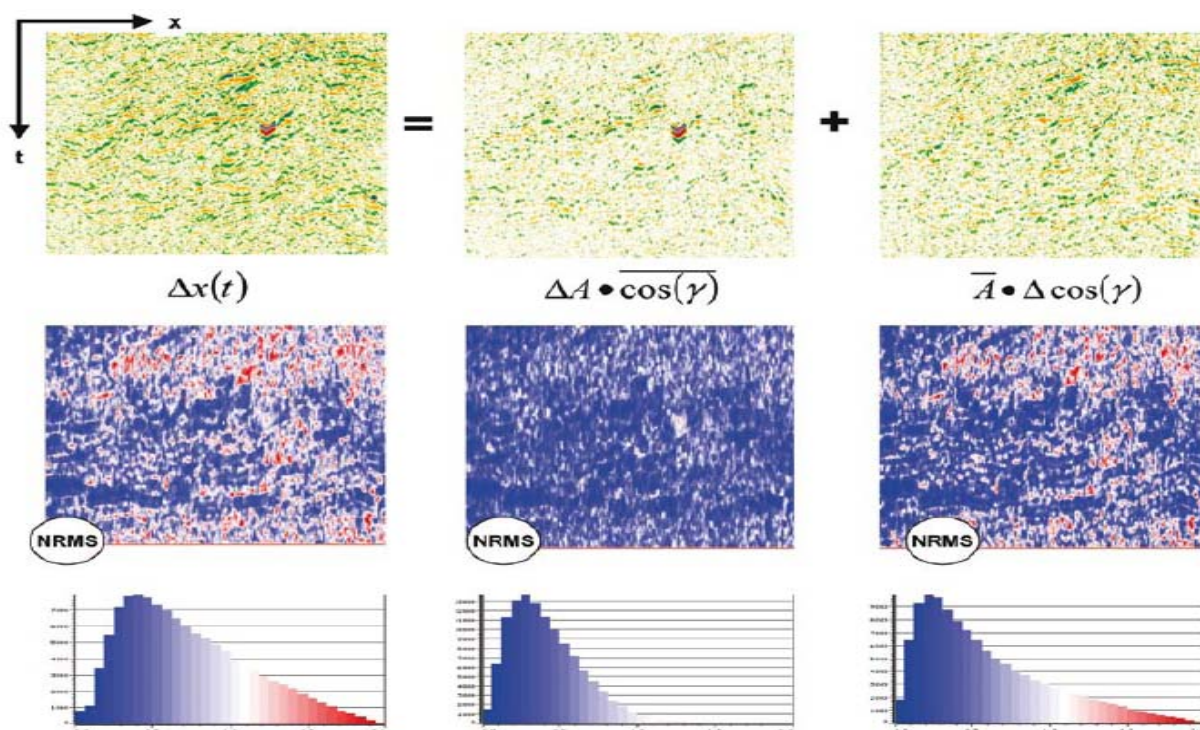
На рисунке 4 приведено разложение данных для УКС с Рисунка 1 на эти компоненты. Данные были получены без учета дальнейших работ 4D и, таким образом, большое количество фонового шума все еще остается после параллельной обработки, 4D бинирования, миграции Кирхгофа во временной области, и общей калибровки. Аномалия 4D, связанная с добычей четко видна на данных с калиброванной фазой, при гораздо меньшей фоновой энергии, чем на исходной разности 4D. И, наоборот, на данных с калибровкой амплитуд виден только остаточный шум 4D, который указывает на то, что влияние добычи на этом месторождении проявляется в амплитудных изменениях. На Рисунке 5 дается представление вышеозначенного уравнения. Мы иллюстрируем NRMS, рассчитанные в скользящем окне (длиной 40 мс) и выводим его в виде непрерывного атрибута 3D, а не просто упоминаем глобальные значения. Таким образом, подчеркиваются локальные вариации в данных. Из результата видно, что в NRMS на разностном разрезе 4D полностью доминируют колебания фазы данных двух лет.

Эти небольшие проблемы выравнивания трудно обнаружить и устранить с помощью большинства алгоритмов выравнивания, и что еще хуже, можно внести случайный шум в анализ временных сдвигов 4D. Например, корреляционный анализ 500 мс исходных данных дает карту временных сдвигов, которая приводится на рисунке 6. Мы знаем

## 4D сейсморазведка



**Рисунок 4** Калибровка мгновенной амплитуды (вверху) и мгновенной фазы (внизу) с результирующими разрезами разности 4D (правая колонка). Данные с калиброванной амплитудой (вверху справа) демонстрируют преимущественно остаточный шум, тогда как на данных калиброванной амплитуды (внизу справа) демонстрируется незначительный остаточный шум 4D и сильная амплитудная аномалия. Она показывает, что в эффекте 4D преобладает изменение амплитуд.



**Рисунок 5** Исходная разность 4D и NRMS (обе в виде разреза) а также две компоненты разложения 4D. NRMS рассчитывается по-трассе в скользящем окне 40 мс. Диапазон гистограмм NRMS от 0 до 2.



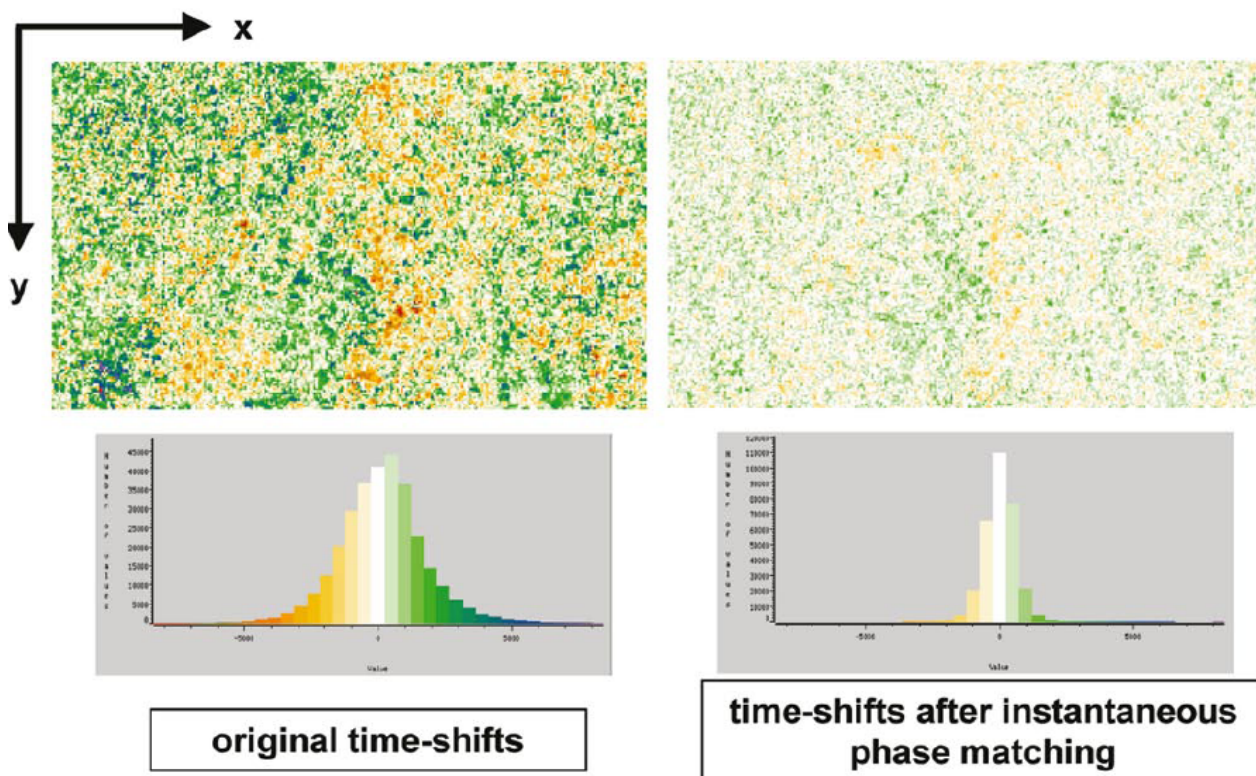


Рисунок 6 Просмотр с отображением (и связанные с ним гистограммы) оценок временных сдвигов по взаимной корреляции до и после калибровки взаимной фазы.

конечно, по нашему вышеприведенному анализу, что в данных не присутствует существенных временных сдвигов. Однако, результат по корреляционному анализу можно проинтерпретировать наоборот. Фактически мы видим характеристики на корреляционной карте, которые ошибочно можно проинтерпретировать как каналы. На рисунке 6 показано, что фазовая калибровка существенно прояснила результаты и устранила каналы-призраки. Также, NRMS для данных, калиброванных по фазе, на Рисунке 5 уменьшились более чем на 40% по сравнению с исходной разностью 4D, и представляют собой более четкий и пригодный для интерпретации разрез.

#### Выводы

Мы рассказали о нескольких приложениях анализа комплексной трассы в условиях 4D. Мы можем использовать разложение трасс на мгновенные амплитуды и фазы для калибровки сейсмограмм и построения общих кубов. Более того, калиброванные атрибуты можно использовать для аналитического разложения 4D разности на две компоненты – амплитуду и фазу. Метод позволяет определять: чем вызвана 4D разность – амплитудными изменениями или фазовыми искажениями. Если в 4D доминирует остаточный шум, вызванный колебанием фазы, калибровка мгновенной фазы может существенно уменьшить шум 4D, улучшить повторяемость и, таким образом, улучшить возможность интерпретации и разрешение эффекта 4D.

#### Благодарности

Мы хотим поблагодарить руководство CGGVeritas и BP за разрешение на публикацию данной работы. Henning Høeбер также приносит благодарность Roger Taylor (CGGVeritas) за внимательное редактирование данной статьи.

#### Литература

- Chopra, S. and Marfurt, K.J. [2007] *Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization*, SEG, Tulsa, USA.
- Coleou, T., Høeбер, H., and Lecerf, D. [2002] Multivariate geostatistical filtering of time-lapse seismic data for an improved 4D signature. *72<sup>nd</sup> SEG Annual Meeting*, Salt Lake City, 1662-1666.
- Duffaut, K., Foldal, R., Helgesen, J., Lecerf, D., Oexnevad, G., and Thompson, M. [2003] Processing of OBC and surface seismic data for reservoir monitoring at the Statfjord field. *65<sup>th</sup> EAGE Conference*, Stavanger.
- Høeбер, H., Lecerf, D., Zaghouani, H., and Whitcombe, D. [2005] Matching of multiple time-lapse data using multi-coherence analysis. *75<sup>th</sup> SEG Annual Meeting*, Houston, 2418-2421.
- Reid, R., Bertrand, A., McNally, A., and MacBeth, C. [2005] 4D signal enhancement using singular value decomposition. *Geophysical Prospecting*, 53, 253-263.
- Taner, M.T., Koehler, R., and Sheriff, R.R. [1979] Complex seismic trace analysis, *Geophysics*, 44, 1041-1063.