

Оптимальное комбинирование сейсмических данных с различными спектральными характеристиками

Ю. К. Тяпкин, 2019

ООО "Юг-Нефтегазгеология", Киев, Украина

Поступила 3 сентября 2019 г.

За потреби спільного використання сейсмічних зніманих, що перекриваються, і при тестуванні різних джерел енергії геофізикам доводиться мати справу з даними, що мають різні спектральні характеристики. При цьому дуже важливою обставиною є те, що такі дані містять одну й ту саму інформацію про відбивну здатність середовища, яка для нас становить інтерес. Для оптимального комбінування таких даних, в основі якого лежить оцінювання загальної відбивної здатності середовища, у статті запропоновано використовувати багатоканальну зворотну вінерівську фільтрацію. Щоб уникнути проблем, пов'язаних з можливим розходженням систем спостереження у зніманнях, що перекриваються, запропоновано знизити обсяг оброблюваної інформації та комбінувати остаточні сейсмічні зображення, отримані в результаті кожного з незалежних зніманих або з різними джерелами. Викладено теорію оптимального методу і проаналізовано структуру отриманого розв'язку. Метод може бути репрезентований як поєднання оптимального частотно-залежного зваженого підсумовування зображень з подальшою одноканальною зворотною вінерівською фільтрацією (деконволюцією) результату підсумовування. Виконано теоретичне зіставлення оптимального методу зі спрощеними аналогами, у яких першим кроком є просте незважене підсумовування без усунення і з усуненням фазових спектрів елементарних сигналів зображень. Показано, що чим більше розходження спектрів сигнальних компонент зображень на даній частоті, тим більша перевага оптимального методу їх комбінування над спрощеними варіантами. Підкреслено, що оскільки можливості сейсморозвідки діють змозго переважно змінювати тільки параметри сигналів, найбільший ефект від оптимального методу може бути досягнутий шляхом максимального взаємного переміщення (мінімального взаємного перекриття) уздовж осі частот спектрів елементарних сигналів зображень, що комбінуються. Це теоретично підтверджується розрахунком спектра оптимального додаткового сигналу, додавання якого до існуючого набору для участі в оптимальному комбінуванні забезпечує максимальну ефективність цієї процедури. Обґрунтовано, що оптимальну процедуру слід виконувати тільки в межах частотного інтервалу, де усереднений за числом зображень сигнал превалює над осередненим шумом. Метод випробувано на модельних матеріалах, його ефективність монотонно зростає зі збільшенням вхідного відношення сигнал—завада, кількості зображень, що беруть участь в перетворенні, і взаємного частотного зсуву їхніх спектрів, тобто зі зменшенням ступеня перекриття цих спектрів. Ефективність методу підтверджено на польовому профілі у Дніпровсько-Донецькій западині, відпрацьованому незалежно з вибуховими та вібраційними джерелами. Оптимальний метод забезпечує найбільш регулярні та роздільні відбиття на всьому зображенні, що значно перевищує за якістю результати незалежних одноканальних деконволюцій зображень, отриманих з обома типами джерел, і їх спрощеного перетворення.

Ключові слова: комбінування сейсмічних зніманих, багатоканальний вінерівський фільтр, оптимальне частотно-залежне зважене підсумовування, оптимальний додатковий сигнал.

Введение. Геофизикам часто приходится иметь дело с сейсмическими данными, полученными на одной и той же площади или одном и том же профиле, но с разными типами источников энергии, различными параметрами одного и того же типа

источника или разными системами наблюдений. Такая ситуация возникает при необходимости совместного использования перекрывающихся съемок, выполненных в разных проектах или в одном проекте, например в переходных зонах суша—море [Hesthammer, Lokkebo, 1997; Navarro et al., 1999; Mohan et al., 2007; Carter, Pambayuning, 2009; Greer, Fomel, 2018; Pipping et al., 2019]. Кроме того, с этим приходится сталкиваться при тестировании различных сейсмических источников [Zafirooulos et al., 1996; Potter et al., 1997; Tyapkin, 2001; Suarez, Stewart, 2009; Yordkayhun et al., 2009; Kumar et al., 2011; Yassi, Kaba, 2013].

Следует также отметить, что целью полевых сейсморазведочных работ и последующей обработки является получение данных с максимально высоким разрешением, обладающих максимально широким информативным диапазоном частот (ИДЧ), под которым понимается диапазон, в котором сигнал преобладает над помехой. Однако даже при использовании широкополосных источников в поле многочисленные природные и технические ограничения препятствуют получению данных с необходимым высоким разрешением. Среди таких препятствий в первую очередь следует назвать: 1) узкорезонансные свойства среды, о чем свидетельствуют спектральные характеристики сферического излучателя [Ziolkowski et al., 1980; Ziolkowski, 1993] и взаимодействия поверхностного источника с грунтом [Кострыгин, 1991]; 2) вызванное статическими и кинематическими сдвигами несинфазное суммирование сигналов при группировании источников и приемников в поле, а также при многоканальной обработке данных; 3) неупругое поглощение сейсмической энергии и ее рассеяние тонкослоистой средой, объемными неоднородностями и шероховатыми границами; 4) ограниченную мощность управляемых поверхностных источников и, в частности, отсутствие возможности регистрировать очень длинные свип-сигналы при вибрационном возбуждении колебаний.

В качестве примера на рис. 1 демонстрируется полученная в Днепровско-Донецкой впадине (ДДВ) зависимость спектра сейсмического сигнала от веса заряда тротила и глубины, на которой этот заряд взрывается. Здесь видно, что даже в самых благоприятных условиях верхняя граница спектра сигнала не превышает 50 Гц.

Из узости ИДЧ следует низкая эффективность деконволюции, поскольку ее выполнение вне этого диапазона нецелесообразно: это приводит не столько к улучшению разрешенности записи, сколько сопровождается повышением уровня помех за счет совместного искажающего влияния аддитивного шума и ошибок в оценке параметров элементарного сигнала (прямого оператора) [Тяпкин, 1991]. По этой причине на практике, как правило, применяется частотно-ограниченная (полосовая) деконволюция вместо полночастотного варианта. Кроме того, узость ИДЧ не позволяет добиться значительных преимуществ от оптимизации спектров при корректирующей фильтрации [Тяпкин, Силинская, 2007; Tyapkin, Silinskaya, 2007]. Это же обстоятельство является серьезным препятствием для надежной оценки фазовых спектров в полиспектральной области и последующего выполнения фазовой деконволюции [Тяпкин и др., 1993], сейсмической инверсии [Амшилов и др., 2009], коррекции статических и кинематических поправок, а также многих других операций обработки сейсмической информации.

В настоящее время разработаны разнообразные многоканальные процедуры предварительного повышения отношения сигнал—помеха для создания более благоприятных условий функционирования различных вариантов деконволюции [Тяпкин, 1994; Тяпкин и др., 2005; Tyapkin, Ursin, 2005]. Однако возможности таких методов ограничены, поскольку в лучшем случае они понижают относительный уровень шумов при сохранении или незначительном изменении формы спектра сигнала.

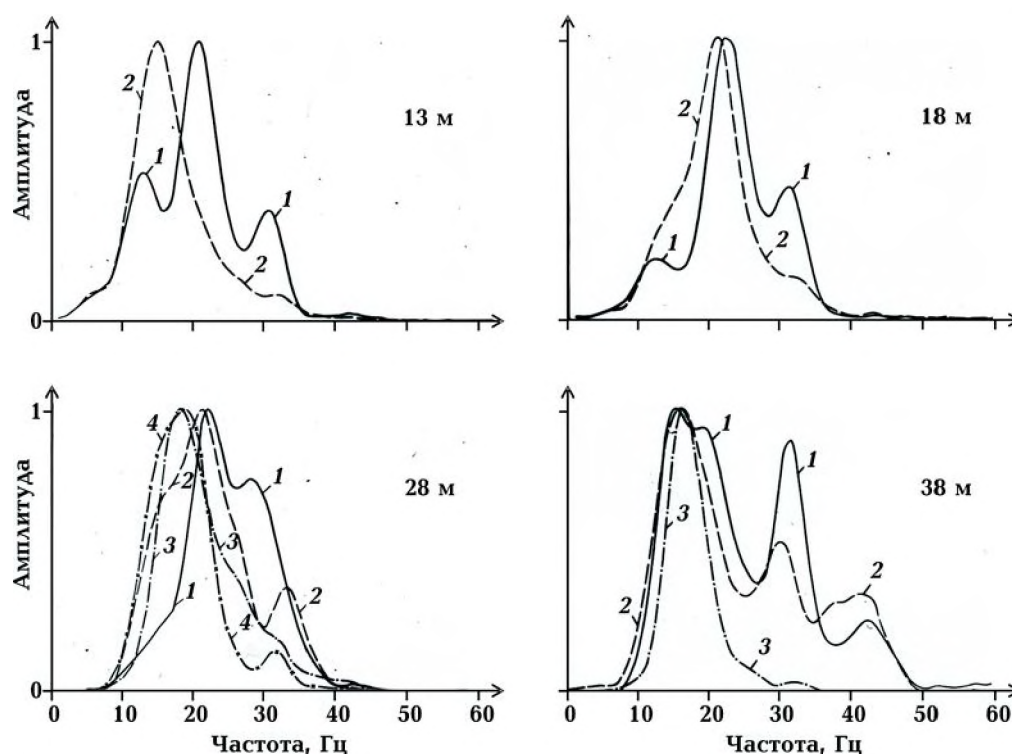


Рис. 1. Спектр мощности сейсмического сигнала на Анастасьевской площади в ДДВ в зависимости от веса заряда тротила (1 — 0,4 кг, 2 — 0,8 кг, 3 — 2,5 кг, 4 — 5 кг) и глубины его погружения в скважину (указана на рисунках).

ла. Учитывая ярко выраженную финитность спектра сейсмического сигнала, эти методы не могут значительно расширить ИДЧ.

Как при совместном использовании перекрывающихся съемок, так и при тестировании различных источников энергии мы имеем дело с сейсмическими данными, обладающими различными спектральными свойствами. Однако при этом очень важным обстоятельством является то, что эти данные содержат одну и ту же интересующую нас информацию о таком свойстве нижнего полупространства, как отражательная способность среды. Поэтому имеет смысл выполнить оптимальное комбинирование таких данных, которые в дальнейшем будут называться имеющими различные спектральные характеристики. Избыточность таких данных должна обеспечить благоприятные условия для более успешной структурной и количественной интерпретации результативных сейсмических изображений.

Для комбинирования сейсмических данных с различными спектральными характеристиками были разработаны разнообразные подходы [Ziolkowski, Lerwill, 1979; Dittert, 1987; Hesthammer, Lokkebo, 1997; Тяпкин, 1998; Туаркин, 2001; Deplante, 2009; Carter, Pambayuning, 2009; Greer, Fomel, 2018; Pipping et al., 2019]. В настоящей статье описывается и анализируется новый метод, впервые предложенный в работах [Тяпкин, 1998; Туаркин, 2001]. По существу, он представляет собой оценку общей для таких данных отражательной способности среды, для чего используется оптимальная многоканальная винеровская фильтрация. Чтобы избежать проблем, связанных с различием систем наблюдения при выполнении независимых съемок, предлагается понизить объем обрабатываемой информации и комбинировать окончательные сейсмические изображения, полученные в результате каждой из неза-

висимых съемок. Эффективность метода демонстрируется на модельных материалах и на полевом профиле из ДДВ, отработанном с взрывными и вибрационными источниками.

Теория метода. Представим i -ю составляющую набора из N сейсмических изображений с различными спектральными характеристиками в виде

$$u_i(t) = w_i(t) * r(t) + n_i(t), \quad i = 1, \dots, N. \quad (1)$$

Первый член в правой части этого уравнения представляет сигнальную компоненту, имеющую вид свертки стационарной случайной отражательной способности $r(t)$ с элементарным сигналом $w_i(t)$, а второй член $n_i(t)$ — это стационарный гауссовский случайный шум с нулевым средним, некоррелируемый как с $r(t)$, так и с шумом любого другого изображения, входящего в данный набор. Таким образом, предполагается, что совпадающие в пространстве изображения $u_i(t)$ сформированы общей отражательной способностью $r(t)$, но отличаются элементарными сигналами $w_i(t)$ и помехами $n_i(t)$. Поскольку помехи предполагаются нерегулярными, все их регулярные составляющие должны быть максимально устранены на этапе получения независимых изображений.

Представим комбинирование сейсмических изображений с различными спектральными характеристиками как оценку общей отражательной способности среды $r(t)$, участвующей в их формировании. Для оптимального использования избыточности имеющейся в нашем распоряжении информации об этой функции воспользуемся многоканальной винеровской фильтрацией. В этом случае необходимо определить обратный многоканальный фильтр $h_i(t)$, $i = 1, \dots, N$, позволяющий получить наилучшую в среднеквадратическом смысле оценку $r(t)$:

$$\min_{h_i(t)} E \left[\sum_{i=1}^N u_i(t) * h_i(t) - r(t) \right]^2, \quad (2)$$

где E — математическое ожидание. Эта задача сводится к частному случаю системы нормальных уравнений для многоканальных фильтров [Robinson, 1967], который в спектральной области имеет вид

$$\sum_{j=1}^N \left[W_i^*(\omega) W_j(\omega) + R_r^{-1}(\omega) R_i^n(\omega) \delta_{ij} \right] H_j(\omega) = W_i^*(\omega), \quad (3)$$

где $H_i(\omega)$ — искомая спектральная характеристика весовой функции фильтра $h_i(t)$, $W_i(\omega)$ — комплексный спектр элементарного сигнала $w_i(t)$, $R_r(\omega)$ и $R_i^n(\omega)$ — соответственно спектры мощности $r(t)$ и $n_i(t)$, а δ_{ij} и $*$ — соответственно символы Кронекера и комплексного сопряжения.

Система уравнений (3) имеет решение [Тяпкин, 1998; Tyarkin, 2001]

$$H_i(\omega) = \frac{W_i^*(\omega)}{R_i^n(\omega)} \left[\frac{1}{R_r(\omega)} + \sum_{j=1}^N \frac{R_j^w(\omega)}{R_j^n(\omega)} \right]^{-1}, \quad (4)$$

где $R_j^w(\omega) = W_j(\omega) W_j^*(\omega)$ — спектр мощности сигнала $w_j(t)$.

Справедливость этого решения может быть проверена простой подстановкой в уравнение (3). Кроме того, решение может быть доказано с помощью метода мате-

математической индукции. В самом деле, справедливость формулы (4) при $N = 1$ легко подтверждается тем, что она превращается в известную спектральную характеристику одноканального обратного винеровского фильтра [Franks, 1969]:

$$H(\omega) = W^*(\omega) \left[R^w(\omega) + \frac{R^n(\omega)}{R_r(\omega)} \right]^{-1}. \quad (5)$$

Затем, разбив матрицу в уравнении (3) на блоки по методу, описанному в работе [Horn, Johnson, 1986], можно легко показать, что справедливость решения для $N - 1$ изображения влечет аналогичный вывод для N изображений.

Анализ оптимального метода. Уравнение (4) позволяет представить полученный многоканальный фильтр и связанный с ним процесс обработки сейсмических материалов в виде последовательности трех операций. Первая из них — это согласованная фильтрация [Franks, 1969] каждого изображения с индивидуальной спектральной характеристикой

$$H_i^{(1)}(\omega) = W_i^*(\omega) / R_i^n(\omega). \quad (6)$$

Комплексное сопряжение в числителе данного уравнения формально описывает устранение фазовых характеристик всех участвующих в преобразовании сейсмических изображений, что необходимо для их последующего синфазного суммирования.

Вторым шагом является прямое суммирование результатов согласованной фильтрации, которое совместно с первым шагом представляет собой оптимальное частотно-зависимое взвешенное суммирование изображений [White, 1977]. Этот процесс обеспечивает максимальное отношение сигнал—шум на всех частотах и поэтому создает максимально благоприятные условия для последующего третьего шага. Им является одноканальная нуль-фазовая винеровская обратная фильтрация суммарных данных, имеющая спектральную характеристику

$$H^{(2)}(\omega) = \left[\frac{1}{R_r(\omega)} + \sum_{j=1}^N \frac{R_j^w(\omega)}{R_j^n(\omega)} \right]^{-1}. \quad (7)$$

Такое представление предлагаемого многоканального фильтра, в дальнейшем называемого *оптимальным методом*, способствует его простой реализации на практике. Целесообразно сделать несколько комментариев по разработанному методу.

Решение, представленное уравнением (4), получено в спектральной области. Во временной области эта задача сводится к решению системы уравнений с блочно-теплицевой матрицей. В этом случае для ускорения решения удобно применить быстрый рекурсивный алгоритм Винера—Левинсона, обобщенный на многоканальный случай Виггинсом и Робинсоном [Wiggins, Robinson, 1965].

Предположим, что спектральные свойства аддитивного шума одинаковы на всех N участвующих в преобразовании сейсмических изображениях. Тогда множитель $1/R^n(\omega)$ не зависит от i и поэтому может быть успешно перемещен из уравнения (6) в уравнение (7). В этом случае, во-первых, спектральные свойства шума могут быть полностью учтены на последнем третьем шаге обработки, когда выполняется одноканальная нуль-фазовая деконволюция суммарного изображения. Во-вторых, первые два шага обработки превращаются в простую корреляцию каждого изобра-

жения с соответствующим элементарным сигналом $w_i(t)$ и последующим суммированием результатов корреляции. Поэтому известная технология работы с вибрационными источниками сейсмической энергии, называемая "Комбисвип" [Werner, Креу, 1979] и базирующаяся на суммировании результатов корреляции (коррелограмм) с использованием нескольких различных свип-сигналов, может рассматриваться как частный случай первых двух шагов предлагаемого в настоящей статье метода.

Представим уравнение (4) в виде

$$H_i(\omega) = W_i^*(\omega) \left[R_i^w(\omega) + \frac{R_i^n(\omega)}{R_r(\omega)} + R_i^n(\omega) \sum_{j \neq i} \frac{R_j^w(\omega)}{R_j^n(\omega)} \right]^{-1}. \quad (8)$$

Отсюда видно, что каждая из частотных характеристик индивидуальных фильтров, в отличие от одноканального варианта (5), имеет в знаменателе дополнительный член, учитывающий уровень помех на данном изображении и суммарное отношение сигнал—помеха на смежных изображениях. Следовательно, чем меньше величины этих двух характеристик на некоторой частоте, тем большую роль играют данное изображение в паре с соответствующим фильтром в формировании окончательного изображения.

Рассмотрим частный случай полученного решения, когда спектры элементарных сигналов $W_i(\omega)$ и спектры мощности помех $R_i^n(\omega)$ одинаковы у всех изображений с точностью до постоянных множителей:

$$W_i(\omega) = a_i W(\omega), \quad (9)$$

$$R_i^n(\omega) = \sigma_i^2 R^n(\omega). \quad (10)$$

Здесь a_i и σ_i^2 — соответственно амплитуды элементарных сигналов и дисперсии помех, а инвариантные к номеру изображения формы спектров $W(\omega)$ и $R^n(\omega)$ для однозначного представления удовлетворяют условию $\|W\| = \|R^n\| = 1$, где $\|\cdot\|$ — норма L_2 .

Подстановка (9) и (10) в уравнение (4) приводит к следующему уравнению:

$$H_i(\omega) = a_i \sigma_i^{-2} \left(\sum_{j=1}^N a_j^2 \sigma_j^{-2} \right)^{-1} W^*(\omega) \left[R^w(\omega) + \frac{R^n(\omega) \left(\sum_{j=1}^N a_j^2 \sigma_j^{-2} \right)^{-1}}{R_r(\omega)} \right]^{-1}. \quad (11)$$

В этом уравнении величина $a_i \sigma_i^{-2} \left(\sum_{j=1}^N a_j^2 \sigma_j^{-2} \right)^{-1}$ является весовым множителем,

обеспечивающим оптимальное взвешенное суммирование как процесс оценки $W(\omega)$ по критерию максимального правдоподобия [Тяпкин и др., 2005; Туаркин, Ursin, 2005]. Остаток правой части уравнения (11) представляет собой одноканальную обратную винеровскую фильтрацию, на входе в которую после оптимального

взвешенного суммирования спектр мощности помех равен $R^n(\omega) \left(\sum_{j=1}^N a_j^2 \sigma_j^{-2} \right)^{-1}$.

Оптимальное взвешенное суммирование используется в работе [Pipping et al., 2019] для комбинирования изображений, полученных независимо с разноазимутальными 3D морскими наблюдениями. Поскольку эти съемки были выполнены с приблизительно одинаковыми источниками, формы элементарных сигналов и корреляционные свойства помех можно считать одинаковыми с точностью до соответствующих постоянных множителей, что служит обоснованием применения указанной процедуры в этом случае.

Теоретическое сопоставление оптимального и упрощенного методов. Одним из простейших способов комбинирования изображений с различными спектральными характеристиками является их простое суммирование. Например, А. Циолковский и В. Лервилл [Ziolkowski, Lerwill, 1979] добились повышения разрешенности сейсмических данных путем независимого возбуждения небольшого заряда динамита и пары детонаторов с последующим простым суммированием полученных таким образом сейсмограмм. Покажем, что такая операция в сочетании с последующей одноканальной винеровской деконволюцией (будем в дальнейшем называть такое сочетание *упрощенным методом*) менее успешно восстанавливает отражательную способность среды, чем предложенный выше оптимальный метод. Для этого будем использовать дисперсию оценки отражательной способности среды как меру разрешенности изображения и уменьшение дисперсии будем рассматривать как повышение разрешенности.

Дисперсия оценки отражательной способности произвольным одноканальным фильтром с частотной характеристикой $H(\omega)$ может быть представлена так [Franks, 1969]:

$$\sigma_r^2 = \int_{-\infty}^{\infty} R_r(\omega) |1 - H(\omega) W(\omega)|^2 d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} R^n(\omega) |H(\omega)|^2 d\omega. \quad (12)$$

Это выражение содержит влияние двух искажающих факторов. Первый из них — неполная компенсация фильтрующего эффекта элементарного сигнала, а второй — присутствие аддитивного шума на выходе фильтра. Дисперсия (12) достигает минимального значения

$$\sigma_{r \min}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{R_r(\omega)} + \frac{R^w(\omega)}{R^n(\omega)} \right]^{-1} d\omega \quad (13)$$

при использовании обратного винеровского фильтра с частотной характеристикой (5) [Franks, 1969].

Уравнение (12) легко обобщается на случай произвольного многоканального фильтра с частотными характеристиками $H_i(\omega)$, $i = 1, \dots, N$:

$$\sigma_r^2 = \int_{-\infty}^{\infty} R_r(\omega) \left| 1 - \sum_{i=1}^N H_i(\omega) W_i(\omega) \right|^2 d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^N R_i^n(\omega) |H_i(\omega)|^2 d\omega. \quad (14)$$

Нетрудно показать, что это выражение достигает своего минимума

$$\sigma_r^2 \min = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{R_r(\omega)} + \sum_{i=1}^N \frac{R_i^w(\omega)}{R_i^n(\omega)} \right]^{-1} d\omega \quad (15)$$

при использовании фильтра со спектральной характеристикой (4). Из данного уравнения видно, что оптимальный метод обеспечивает монотонное понижение дисперсии оценки отражательной способности среды по мере увеличения числа используемых сейсмических изображений с различными спектральными характеристиками.

Из выражения (13) следует, что упрощенный метод приводит к дисперсии оценки отражательной способности среды

$$\sigma_r^2 \text{ simp} = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{R_r(\omega)} + \frac{\left| \sum_{i=1}^N W_i(\omega) \right|^2}{\sum_{i=1}^N R_i^n(\omega)} \right]^{-1} d\omega. \quad (16)$$

В отличие от оптимального метода упрощенный вариант не всегда обеспечивает монотонную зависимость дисперсии оценки отражательной способности среды от N . Так, из выражения (16) следует, что дополнительное участие N -го изображения в упрощенном методе при условии

$$\frac{\left| \sum_{i=1}^{N-1} W_i(\omega) \right|^2}{\sum_{i=1}^{N-1} R_i^n(\omega)} > \frac{2 |W_N(\omega)| \left| \sum_{i=1}^{N-1} W_i(\omega) \right| \cos[\varphi_N(\omega) - \varphi_{N-1}(\omega)] + |W_N(\omega)|^2}{R_N^n(\omega)} \quad (17)$$

ухудшает результат, приводя к увеличению дисперсии. Здесь $\varphi_N(\omega)$ и $\varphi_{N-1}(\omega)$ — фазовые компоненты комплексных спектров $W_N(\omega)$ и $\sum_{i=1}^{N-1} W_i(\omega)$ соответственно.

Заметим, что такому условию может удовлетворять дополнительное изображение, обладающее 1) относительно высоким уровнем помех, 2) относительно низким уровнем сигнала или 3) сигналом, резко отличающимся своим фазовым спектром от суммы предшествующих сигналов, что приводит к его несинфазному подсуммированию к предшествующему набору.

Нетрудно показать, что всегда $\sigma_r^2 \text{ simp} \geq \sigma_r^2 \min$, поскольку

$$\sum_{i=1}^N \frac{R_i^w(\omega)}{R_i^n(\omega)} \geq \frac{\left| \sum_{i=1}^N W_i(\omega) \right|^2}{\sum_{i=1}^N R_i^n(\omega)}, \quad (18)$$

или, что эквивалентно,

$$\sum_{i=1}^N R_i^n(\omega) \sum_{i=1}^N \frac{R_i^w(\omega)}{R_i^n(\omega)} \geq \left| \sum_{i=1}^N W_i(\omega) \right|^2. \quad (19)$$

Для доказательства неравенства (19) введем в рассмотрение два вектора:

$$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N)^T, \quad x_i = R_i^{n-1/2}(\omega),$$

$$\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_N)^T, \quad y_i = W_i(\omega) R_i^{n-1/2}(\omega).$$

Тогда (19) является прямым следствием неравенства Коши—Шварца [Horn, Johnson, 1985]:

$$(\mathbf{x}^T \mathbf{x})(\mathbf{y}^T \mathbf{y}) \geq |\mathbf{x}^T \mathbf{y}|^2, \quad (20)$$

где T обозначает эрмитово транспонирование.

Равенство в выражении (20) возникает только в том случае, когда векторы \mathbf{x} и \mathbf{y} пропорциональны, что эквивалентно независимости от i значений $W_i(\omega)/R_i^n(\omega)$ для любой частоты ω . Для удовлетворения этого условия необходима независимость от i как фазовых спектров элементарных сигналов $w_i(t)$, так и значений $|W_i(\omega)|/R_i^n(\omega)$. Только при таком условии каждая частотная характеристика (6) не зависит от i и оптимальный многоканальный фильтр вырождается в прямое суммирование сейсмических изображений с различными спектральными характеристиками, сопровождающееся одноканальной винеровской фильтрацией результата. Естественно, при этом дисперсии $\sigma_{r \min}^2$ и $\sigma_{r \text{ simp}}^2$ как показатели эффективности оптимального и упрощенного методов совпадают. Отсюда же следует, что чем больше разница в амплитудах и фазах комплексных величин $W_i(\omega)/R_i^n(\omega)$, тем большее преимущество достигается оптимальным методом над упрощенным вариантом.

Упрощенный метод становится более эффективным, если с помощью фазовой деконволюции перед суммированием устраняются фазовые спектры сигналов. Это

приводит к их синфазному суммированию и влечет за собой замену $\left| \sum_{i=1}^N W_i(\omega) \right|$ на $\sum_{i=1}^N |W_i(\omega)|$ в подынтегральном выражении (16). Тот факт, что неравенство

$$\left| \sum_{i=1}^N W_i(\omega) \right| \leq \sum_{i=1}^N |W_i(\omega)| \quad (21)$$

превращается в равенство только для действительных спектров (нуль-фазовых сигналов), подтверждает, что устранение фазовых спектров сигналов понижает дисперсию (16), повышая эффективность упрощенного метода. Тем не менее, даже в этом случае он уступает по своей эффективности оптимальному методу, что следует из того же неравенства (20), в котором \mathbf{y} превращается в вектор с действительными компонентами $|W_i(\omega)|/R_i^{n/2}(\omega)$.

Рассмотрим случай, когда 1) сигналы — нуль-фазовые и, следовательно, $R_i^w(\omega) = W_i^2(\omega)$, 2) спектры мощности помех $R^n(\omega)$ не зависят от i и 3) отношение сигнал—помеха значительно превышает единицу. Тогда отношение подынтегральных выражений в (16) и (15) можно представить следующим образом:

$$\left\{ 1 + \frac{R_r(\omega)}{R^n(\omega)} \sum_{i=1}^N W_i^2(\omega) \right\} \times \left\{ 1 + \frac{R_r(\omega)}{NR^n(\omega)} \left[\sum_{i=1}^N W_i(\omega) \right]^2 \right\}^{-1} \cong$$

$$\cong \frac{N \sum_{i=1}^N W_i^2(\omega)}{\left[\sum_{i=1}^N W_i(\omega) \right]^2} = 1 + \frac{\sum_{i=1}^N [W_i(\omega) - \bar{W}(\omega)]^2}{N \bar{W}^2(\omega)} = 1 + \frac{\sigma_w^2(\omega)}{\bar{W}^2(\omega)}, \quad (22)$$

где $\bar{W}(\omega) = N^{-1} \sum_{i=1}^N W_i(\omega)$ и $\sigma_w^2(\omega) = N^{-1} \sum_{i=1}^N [W_i(\omega) - \bar{W}(\omega)]^2$ — соответственно осредненный по количеству изображений спектр и среднее квадратическое отклонение спектров от их среднего значения.

Выражение (22) показывает, что чем больше различие спектров сигнальных компонент изображений на данной частоте, тем значительнее преимущество оптимального метода их совместной обработки над упрощенным вариантом. Поскольку возможности сейсморазведки позволяют в основном менять только параметры сигналов, наибольший эффект может быть достигнут за счет максимального взаимного перемещения (минимального взаимного перекрытия) вдоль оси частот спектров элементарных сигналов комбинируемых изображений. Это подтверждается расчетом спектральной характеристики оптимального дополнительного сигнала, а также приведенными ниже результатами модельных исследований.

Введем понятие оптимального дополнительного сигнала. Пусть имеется набор из $N - 1$ изображений с различными спектральными характеристиками. Возникает вопрос, какую форму должен иметь спектр мощности $R_N^w(\omega)$ дополнительного N -го элементарного сигнала, чтобы его участие в комбинировании с предшествующим набором обеспечило наилучшую оценку отражательной способности среды? Естественно, для однозначности решения допустимая энергия этого сигнала должна быть ограничена. Исходя из уравнения (15), задача может быть сформулирована следующим образом:

$$\min_{R_N^w(\omega)} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{R_r(\omega)} + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{R_i^w(\omega)}{R_i^n(\omega)} + \frac{R_N^w(\omega)}{R_N^n(\omega)} \right]^{-1} d\omega \quad (23)$$

при условии-ограничении

$$\int_{-\infty}^{\infty} R_N^w(\omega) d\omega \leq E, \quad (24)$$

где E — максимальная энергия дополнительного сигнала.

Метод неизвестных множителей Лагранжа [Franks, 1968] позволяет получить искомым спектр мощности сигнала, который удобно представить в виде отношения к спектру мощности соответствующего шума:

$$\frac{R_N^w(\omega)}{R_N^n(\omega)} = \frac{E + \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{R_r(\omega)} + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{R_i^w(\omega)}{R_i^n(\omega)} \right] R_N^n(\omega) d\omega}{\sqrt{R_N^n(\omega)} \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{R_N^n(\omega)} d\omega} - \frac{1}{R_r(\omega)} - \sum_{i=1}^{N-1} \frac{R_i^w(\omega)}{R_i^n(\omega)}. \quad (25)$$

Из этого выражения видно, что отношение спектра мощности оптимального дополнительного сигнала к соответствующему спектру мощности шума на любой частоте зависит от влияния нескольких факторов. Так, первый член в правой части уравнения (25) показывает, что локальный рост спектра мощности шума $R_N^n(\omega)$ локально понижает интересующее нас отношение спектров мощности, а увеличение допустимой энергии элементарного сигнала E повышает это отношение. Второй член свидетельствует об относительном увеличении отношения спектров мощности при росте спектра мощности отражательной способности среды $R_r(\omega)$.

В наибольшей степени для нас интересна зависимость отношения спектров мощности дополнительного изображения от суммы отношения спектров предшествующего набора. Третий член в правой части уравнения (25) показывает, что на тех частотах, где суммарный предшествующий набор имел повышенные значения сигнал—помеха, дополнительное изображение должно обладать пониженными величинами этой характеристики. Это подтверждает, что для максимально эффективной работы оптимального метода комбинирования сейсмических изображений их спектры должны минимально перекрываться.

Спектр оптимального дополнительного сигнала, описываемый уравнением (25), не ограничен по частоте. В реальной ситуации такой сигнал всегда подвержен влиянию множества частотно-зависимых механизмов, отмеченных во введении настоящей статьи. Суммарная функция их влияния ограничивает возможность возбуждения оптимального дополнительного сигнала на высоких частотах, делая его спектр финитным [Туаркин, 2001]. Однако и при учете суммарной функции поглощения сохраняется та же тенденция минимального наложения спектра дополнительного сигнала на спектр суммарного набора предшествующих сигналов.

Перед тестированием на модельных и полевых материалах необходимо подчеркнуть, что предлагаемый здесь оптимальный метод комбинирования сейсмических изображений с различными спектральными характеристиками для достижения своей теоретической эффективности должен быть обеспечен надежными оценками таких входных параметров, как спектры сигнала и шума. В противном случае его теоретические преимущества остаются под вопросом. Используя функцию множественной когерентности стационарных случайных процессов, Уайт [White, 1977] сделал обобщающий вывод, что любые оценки спектров сигнала и шума достаточно надежны только в пределах частотного интервала, где осредненный по числу каналов сигнал превалирует над осредненным шумом. Поэтому только в этом спектральном диапазоне, названном выше ИДЧ, оптимальное частотно-зависимое взвешенное суммирование работает эффективно и превышает по качеству простое суммирование. Кроме того, по той же причине ненадежных оценок спектров элементарного сигнала и шума вне ИДЧ [Тяпкин, 1991] этот спектральный интервал играет главную роль на этапе одноканальной деконволюции суммарных изображений. Отсюда следует вывод, что предлагаемый в настоящей статье оптимальный метод комбинирования сейсмических изображений с различными спектральными характеристиками целесообразно осуществлять только в пределах их ИДЧ.

Модельный пример. В процессе тестирования оптимального метода на модельных материалах использовалось до трех сейсмических трасс с различными спектральными характеристиками. Спектры мощности их элементарных сигналов имели форму гауссиана, ширина которого составляла 20 Гц на уровне 0,5 от максимального значения. Максимум спектра самого низкочастотного сигнала был зафиксирован на частоте $f_0 = \omega_0 / (2\pi) = 20$ Гц, а два других получались путем сдвига гауссиана на $\Delta\omega$ и $2\Delta\omega$ в область высоких частот (рис. 2). Трассы с различными спектральными характеристиками моделировались сверткой одной и той же отражательной способности, содержащей 256 отсчетов центрированного псевдослучайного процесса, с нуль-фазовыми сигналами, соответствующими указанным спектрам мощности. Результаты осложнялись центрированным аддитивным белым шумом с различной дисперсией, не зависящей от номера трассы. Это обеспечивало различие в отношении сигнал—помеха на входе в оптимальный метод комбинирования трасс с различными спектральными характеристиками.

На рис. 3 представлена зависимость аналитических оценок средней квадратической ошибки восстановления отражательной способности среды, полученных по формуле (15), от отношения сигнал—помеха на входе в оптимальную процедуру, количества используемых трасс с различными спектральными характеристиками и взаимного частотного сдвига их спектров. Рисунок показывает, что эффективность оптимального метода монотонно возрастает по мере увеличения входного отношения сигнал—помеха, количества участвующих в преобразовании трасс и взаимного частотного сдвига их спектров, т. е. по мере уменьшения степени перекрытия их спектров.

Эта закономерность хорошо согласуется с приведенным на рис. 4 поведением численных оценок коэффициента корреляции указанной модельной отражательной способности среды и результата ее восстановления оптимальным методом. Здесь коэффициент корреляции монотонно возрастает с увеличением тех же параметров набора трасс с различными спектральными характеристиками. Исключением является небольшое относительное понижение коэффициента корреляции, наблюдающееся на рис. 4, а при $N = 3$ и взаимных частотных сдвигах 40 и 45 Гц. Это может быть вызвано сильным влиянием аддитивного шума в условиях низкого отношения сигнал—помеха (0,5), когда соответствующие теоретические оценки средней квадратической ошибки восстановления модельной отражательной способности среды оптимальным методом становятся практически независимыми от взаимного частотного сдвига спектров элементарных сигналов (см. рис. 3, а).

Практический пример. Эффективность предложенного оптимального метода и его преимущество над упрощенным аналогом демонстрируются на профиле из ДДВ. Этот профиль был отработан при одной и той же системе наблюдения независимо с взрывными источниками (три 400-граммовых заряда тротила) и группой из трех сейсмических вибраторов (логарифмический свип длиной 16 с в частотном интервале 8—65 Гц).



Рис. 2. Разнесенные по оси частот гауссианы, имитирующие спектры мощности элементарных сигналов набора сейсмических трасс с различными спектральными характеристиками. Спектр мощности аддитивного белого шума (горизонтальная линия) — переменный, но не зависит от номера трассы.

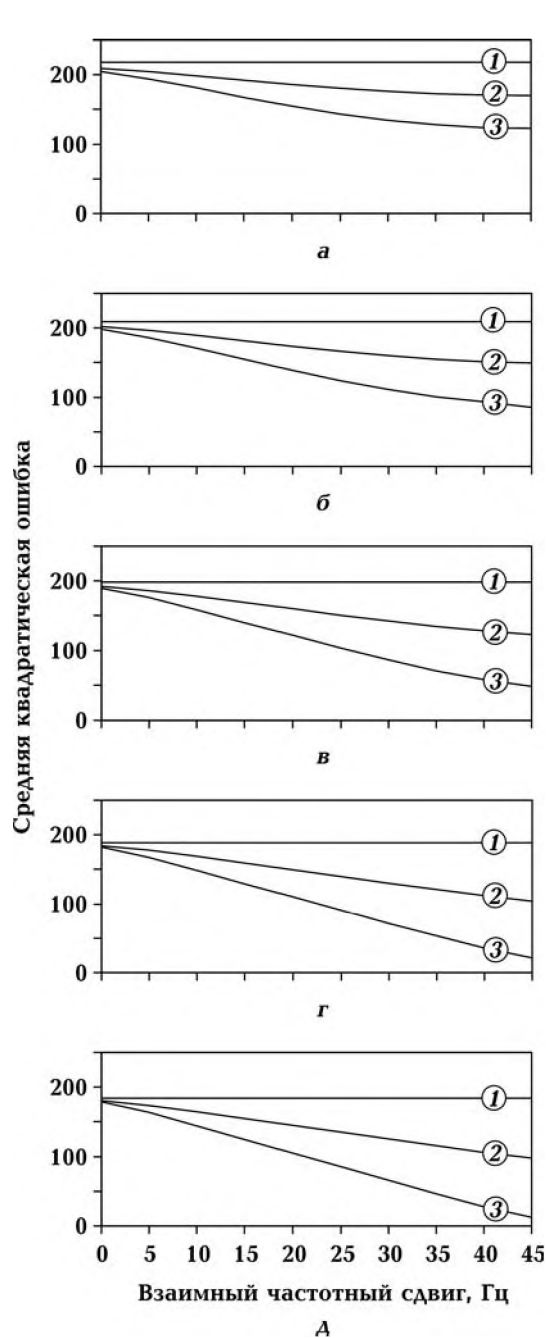


Рис. 3. Зависимость аналитических оценок средней квадратической ошибки восстановления модельной отражательной способности среды оптимальным методом $\sigma_{r \min}^2$ от взаимного частотного сдвига спектров элементарных сигналов $\Delta\omega$ для разного количества комбинируемых трасс N и разного отношения сигнал—помеха на входе в оптимальную процедуру: 0,5 (а), 1 (б), 3 (в), 10 (г) и 20 (д). Соответствующее число N для каждого из графиков обведено окружностью. Для удобства сопоставления величина $\sigma_{r \min}^2$ при $N=1$ представлена зависимой от взаимного частотного сдвига спектров элементарных сигналов, хотя таковой не является.

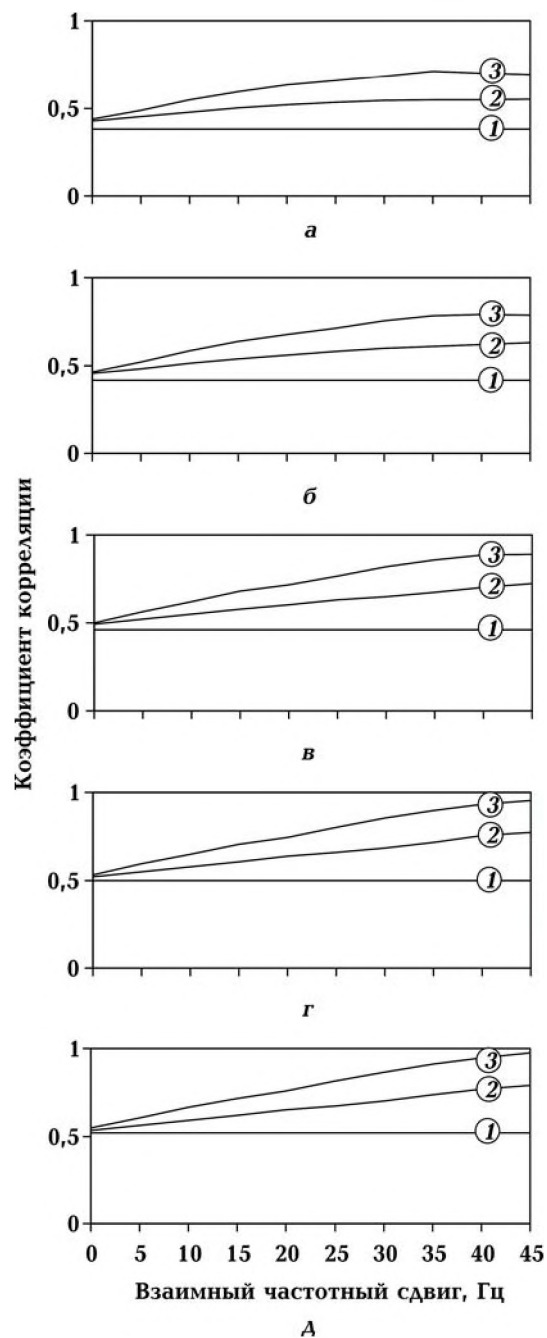


Рис. 4. Зависимость численных оценок коэффициента корреляции модельной отражательной способности среды и результата ее восстановления оптимальным методом от взаимного частотного сдвига спектров элементарных сигналов $\Delta\omega$ для разного количества комбинируемых трасс N и разного отношения сигнал—помеха на входе в оптимальную процедуру: 0,5 (а), 1 (б), 3 (в), 10 (г) и 20 (д). Соответствующее число N для каждого из графиков обведено окружностью. Для удобства сопоставления коэффициент корреляции при $N=1$ представлен зависимым от взаимного частотного сдвига спектров элементарных сигналов, хотя таковым не является.

Для расчета спектра мощности $R_r(\omega)$, необходимого для последующей оценки элементарных сигналов, использовались данные акустического и плотностного каротажа. При обработке информации, полученной с взрывными источниками, была выбрана минимально-фазовая модель элементарного сигнала. В свою очередь, данные, полученные с невзрывными источниками, после процедур корреляции и вращения фазы предполагались имеющими нуль-фазовый сигнал. Оба набора данных были подвергнуты одинаковой обработке перед временной миграцией. В соответствии с упомянутыми модельными предположениями к изображениям, полученным с взрывными и невзрывными источниками, была применена деконволюция с минимально-фазовым (рис. 5, а) и нуль-фазовым (рис. 5, б) операторами соответственно. Из этих рисунков можно сделать вывод, что ни один из источников не обеспечивает достаточно широкий результирующий спектр и достаточно высокую разрешенность сейсмического изображения, поскольку после взрывов отсутствуют высокие частоты, а после вибраторов с выбранными параметрами свип-сигнала — низкие. Естественным выводом из этой ситуации является комбинирование двух исходных изображений. Результат их простого суммирования с последующей нуль-фазовой деконволюцией, представленный на рис. 5, в, явно уступает по качеству изображениям на рис. 5, а и б. Это вызвано существенным различием фазовых спектров элементарных сигналов, порожденных взрывными и невзрывными источниками. Такое различие приводит к несинфазному суммированию сигналов, существенно ослабляющему, а не усиливающему их. В отличие от упрощенного метода оптимальный вариант, включающий индивидуальную согласованную фильтрацию обоих изоб-

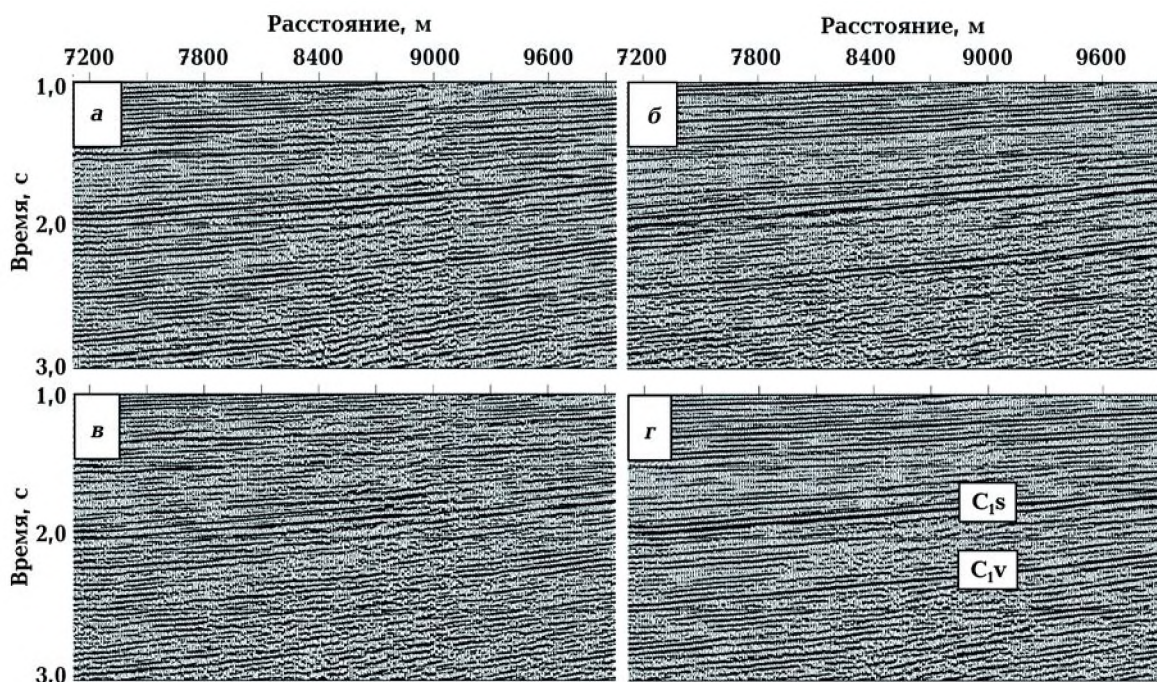


Рис. 5. Сейсмические изображения, полученные с взрывным источником и минимально-фазовой деконволюцией (а); невзрывным источником и нуль-фазовой деконволюцией (б); простым суммированием изображений, соответствующих двум типам источников, с последующей нуль-фазовой деконволюцией (в); суммированием подвергнутых предварительной индивидуальной согласованной фильтрации изображений, соответствующих двум типам источников, с последующей нуль-фазовой деконволюцией (г).

ражений перед их суммированием, дает результат (рис. 5, г), значительно более качественный, чем окончательные изображения, представленные на рис. 5, а и б. На рис. 5, г видно, что оптимальный метод обеспечивает наиболее регулярные и разрешенные отражения по всему изображению. Наиболее отчетливо это проявляется на уровне визейского (C_{1v}) и серпуховского (C_{1s}) ярусов, которые на данной площади содержат перспективные стратиграфические ловушки углеводородов.

Выводы. При необходимости совместного использования перекрывающихся сейсмических съемок и при тестировании различных источников энергии геофизикам приходится иметь дело с данными, обладающими различными спектральными характеристиками. При этом очень важным обстоятельством является то, что такие данные содержат одну и ту же интересующую нас информацию об отражательной способности среды. Для оптимального комбинирования таких данных, в основе которого лежит оценка общей отражательной способности среды, в настоящей статье предложено использовать многоканальную обратную винеровскую фильтрацию. Чтобы избежать проблем, связанных с возможным различием систем наблюдения в перекрывающихся съемках, предложено понизить объем обрабатываемой информации и комбинировать окончательные сейсмические изображения, полученные в результате каждой из независимых съемок или с разными источниками. В статье изложена теория оптимального метода и проанализирована структура полученного решения. Показано, что метод может быть представлен как сочетание оптимального частотно-зависимого взвешенного суммирования изображений с последующей одноканальной обратной винеровской фильтрацией (деконволюцией) результата суммирования. Выполнено теоретическое сопоставление оптимального метода с упрощенными аналогами, у которых первым шагом является простое невзвешенное суммирование без устранения и с устранением фазовых спектров элементарных сигналов изображений. Показано, что чем больше различие спектров сигнальных компонент изображений на данной частоте, тем значительно преимущество оптимального метода их комбинирования над упрощенными вариантами. В статье подчеркивается, что поскольку возможности сейсморазведки позволяют в основном изменять только параметры сигналов, наибольший эффект от оптимального метода может быть достигнут за счет максимального взаимного перемещения (минимального взаимного перекрытия) вдоль оси частот спектров элементарных сигналов комбинируемых изображений. Это теоретически подтверждается расчетом спектра оптимального дополнительного сигнала, добавление которого к существующему набору для участия в оптимальном комбинировании обеспечивает максимальную эффективность этой процедуры. Приводится обоснование того, что оптимальная процедура должна выполняться только в пределах частотного интервала, где осредненный по числу изображений сигнал превалирует над осредненным шумом. Метод опробован на модельных материалах. При этом показано, что его эффективность монотонно возрастает по мере увеличения входного отношения сигнал—помеха, количества участвующих в преобразовании изображений и взаимного частотного сдвига их спектров, т. е. по мере уменьшения степени перекрытия этих спектров. Кроме того, эффективность метода подтверждена на полевом профиле из ДДВ, отработанном независимо с взрывными и вибрационными источниками. При этом показано, что оптимальный метод обеспечивает наиболее регулярные и разрешенные отражения по всему изображению, что значительно превышает по качеству результаты независимых одноканальных деконволюций изображений, полученных с обоими типами источников, и их упрощенного преобразования.

Список литературы

- Ампиров Ю. П., Барков А. Ю., Яковлев И. В., Филиппова К. Е., Приезжев И. И. Почти все о сейсмической инверсии. Ч. 1. *Технологии сейсморазведки*. 2009. Т. 6. № 4. С. 3—16.
- Кострыгин Ю. П. Сейсморазведка на сложных зондирующих сигналах. Москва: Недра, 1991. 176 с.
- Тяпкин Ю. К. Оптимальный диапазон частот корректирующей фильтрации сейсмических записей. *Геофиз. журн.* 1991. Т. 13. № 1. С. 62—69.
- Тяпкин Ю. К. Оптимизированные оценки усложненной модели многоканальной сейсмической записи со статистической и детерминированной регуляризацией. *Геология и геофизика*. 1994. Т. 35. № 1. С. 128—135.
- Тяпкин Ю. К. Повышение разрешающей способности сейсморазведки на основе оптимизированного использования записей с различными спектральными характеристиками. 1. Теория и метод. *Геофиз. журн.* 1998. Т. 20. № 1. С. 82—90.
- Тяпкин Ю. К., Приходченко Д. Ф., Некрасов И. А. Оптимизация процесса выделения сигнала из многоканальной сейсмической записи. *Геофиз. журн.* 2005. Т. 27. № 5. С. 718—729.
- Тяпкин Ю. К., Силюнская Е. А. Деконволюция сейсмических записей с оптимизацией взвешенных нормированных квадратичных функционалов. 2. Частотная область. *Геофиз. журн.* 2007. Т. 29. № 6. С. 32—44.
- Тяпкин Ю. К., Шатило А. П., Старостенко Е. В. Итерационные алгоритмы оптимальной в L_1 и L_2 оценки фазовой характеристики сейсмического сигнала с помощью триспектра записи. *Геофиз. журн.* 1993. Т. 15. № 2. С. 85—92.
- Carter, D., & Pambayuning, S. (2009). Extended bandwidth by a frequency domain merge of two 3D seismic volumes. *The Leading Edge*, 28(4), 400—406. doi: 10.1190/1.3112752.
- Deplante, C. (2009). Spectral Fusion: a tool to merge low and high frequency datasets. *International Petroleum Technology Conference*, Paper 14078. doi: 10.2523/IPTC-14078-MS.
- Dittert, K. K. (1987). Method for filtering and combining seismic data having different spectral characteristics. US Patent no. 4,715,021.
- Franks, L. E. (1969). *Signal Theory*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 332 p.
- Greer, S., & Fomel, S. (2018). Matching and merging high-resolution and legacy seismic images. *Geophysics*, 83(2), V115—V122. doi: 10.1190/geo2017-0238.1.
- Hesthammer, J., & Lokkebo, S. M. (1997). Combining seismic surveys to improve data quality. *First Break*, 15(4), 103—115. doi: 10.3997/1365-2397.1997010.
- Horn, R. A., & Johnson, C. R. (1985). *Matrix Analysis*. Cambridge Univ. Press.
- Kumar, R., Al-Saeed, M. A., Lipkov, Y., & Roth, J. (2011). Seismic source comparison for shallow targets in north Kuwait field: 81st SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts (pp. 102—106). doi: 10.1190/1.3627380.
- Mohan, T. R. M., Yadava, C. B., Kumar, S., Mishra, K. K., & Niyogi, K. (2007). Prestack merging of land 3D vintages — A case history from Kavery Basin, India: 77th SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts (pp. 437—441). doi: 10.1190/1.2792458.

- Navarro, J., Thiessen, J., Zoch, H.-J., Janie, H., & Fischer, K. (1999). Depth imaging in the Heide-Buesum transition zone area: *61st EAGE Conference and Exhibition, Extended Abstracts*, Paper 1-03. doi: 10.3997/2214-4609.201407600.
- Pipping, J. C. P., Wever, A., Bachmann, R., Smirnov, V., & Deneuvillers, S. (2019). K18-Golf Field seismic and reservoir modeling challenges. *First Break*, 37(5), 59—65.
- Potter, G., Mann, A., Jenkerson, M., & Rodriguez, J.-M. (1997). Comparison of marine vibrator, dynamite and airgun sources in the transition zone: *59th EAGE Conference and Exhibition, Extended Abstracts*, Paper B018.
- Robinson, E. A. (1967). *Multichannel Time Series Analysis with Digital Computer Programs*. Holden-Day, San Francisco.
- Suarez, G. M. & Stewart, R. R. (2009). Seismic source comparison for compressional and converted-wave generation at Spring Coulee, Alberta: *79th SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts* (pp. 99—103). doi: 10.1190/1.3255919.
- Тяпкин, Y. K. (2001). Optimum primary and supplementary signals optimizing the seismic data resolution. *Journal of Applied Geophysics*, 46(3), 175—187. doi: 10.1016/S0926-9851(01)00037-4.
- Тяпкин, Y., & Silinskaya, E. (2007). Seismic data resolution enhancement by optimizing the generalized radius of gyration: *69th EAGE Conference and Exhibition, Extended Abstracts*, Paper P268. doi: 10.3997/2214-4609.201401917.
- Тяпкин, Yu., & Ursin, B. (2005). Optimum stacking of seismic records with irregular noise. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2(3), 177—187. doi: 10.1088/1742-2132/2/3/001.
- Werner, H., & Krey, Th. (1979). Combisweep — a contribution to sweep techniques. *Geophysical Prospecting*, 27(1), 78—105. doi: 10.1111/j.1365-2478.1978.tb00960.x.
- White, R. E. (1977). The performance of optimum stacking filters in suppressing uncorrelated noise. *Geophysical Prospecting*, 25(1), 165—178. doi: 10.1111/j.1365-2478.1977.tb01158.x.
- Wiggins, R. A., & Robinson, E. A. (1965). Recursive solution to the multichannel filtering problem. *Journal of Geophysical Research*, 70(8), 1885—1991. doi: 10.1029/JZ070i008p01885.
- Yassi, N., & Kaba, A. (2013). Seismic source comparison in Surat Basin, Queensland: *23rd ASEG-PESA International Geophysical Conference, Abstracts*. doi: 10.1071/PVv2013n165p55.
- Yordkayhun, S., Ivanova, A., Giese, R., Juhlin, C., & Cosma, C. (2009). Comparison of surface seismic sources at the CO₂SINK site, Ketzin, Germany. *Geophysical Prospecting*, 57(1), 125—139. doi: 10.1111/j.1365-2478.2008.00737.x.
- Zafiropoulos, G., Tziolas, C., Dimitrakopoulos, D., & Economou, A. (1996). Field comparison of seismic sources for coal exploration: *58th EAGE Conference and Exhibition, Extended Abstracts*, Paper PO22. doi: 10.3997/2214-4609.201408794.
- Ziolkowski, A., (1993). Determination of the signature of a dynamite source using source scaling, Part 1: Theory. *Geophysics*, 58(8), 1174—1182. doi: 10.1190/1.1443501.
- Ziolkowski, A., & Lerwill, W. E. (1979). A simple approach to high resolution seismic profiling for coal. *Geophysical Prospecting*, 27(2), 360—393. doi: 10.1111/j.1365-2478.1979.tb00975.x.
- Ziolkowski, A. M., Lerwill, W. E., March, D. W., & Peardon, L. G. (1980). Wavelet deconvolution using a source scaling law. *Geophysical Prospecting*, 28(6), 872—901. doi: 10.1111/j.1365-2478.1980.tb01266.x.

Optimal combining seismic data with different spectral characteristics

Yu. K. Tyapkin, 2019

When it comes to sharing overlapping seismic surveys and testing various energy sources, geophysicists have to deal with data having different spectral characteristics. It is very important to note that such data share the same information on the reflectivity of the medium, which is of interest to us. To combine such data optimally, which is based on an assessment of the common reflectivity of the medium, this article proposes the use of multichannel inverse Wiener filtering. To avoid the problems associated with a possible difference in the data acquisition systems of overlapping surveys, it is proposed to reduce the amount of information processed and to combine the final seismic images obtained from each of the independent surveys or from different sources. The theory of the optimal method is presented and the structure of the solution obtained is analyzed. It is shown that the method can be represented as a combination of the optimal frequency-dependent weighted summation of images with the subsequent single-channel inverse Wiener filtering (deconvolution) of the summation result. A theoretical comparison of the optimal method with simplified analogues wherein the first step is a simple unweighted summation without and with elimination of the wavelet phase spectra of images is performed. It is shown that the greater the difference between the spectra of the signal components of images at a given frequency, the greater the advantage of the optimal method of combining them over the simplified variants. The article stresses that since seismic exploration capabilities basically allow only signal parameters to be changed, the greatest effect from the optimal method can be achieved due to maximum mutual displacement (minimum mutual overlap) along the frequency axis of the spectra of the wavelets of combined images. This is theoretically confirmed by the calculation of the spectrum of the optimal complementary signal the addition of which to the existing set to participate in optimally combining ensures maximum efficiency of this procedure. The rationale is given that the optimal procedure should be performed only within the frequency interval where the signal averaged over the number of images prevails over the averaged noise. The method is tested on synthetic data. It is shown that its efficiency monotonically increases with increasing the input signal-to-noise ratio, the number of images involved in processing, and the mutual frequency shift of their spectra, i. e. as the degree of overlap of these spectra decreases. Moreover, the effectiveness of the method is confirmed on a field line from the Dnieper-Donets depression, which was independently worked out with dynamite and vibratory sources. It is shown that the optimal method provides the most regular and resolved reflections across the entire image, which significantly exceeds the results of independent single-channel deconvolutions of the images obtained with both types of sources and of their simplified combination.

Key words: combining seismic surveys, multichannel Wiener filter, optimal frequency-dependent weighted summation, optimal complementary signal.

References

- Ampilov, Yu. P., Barkov, A. Yu., Yakovlev, I. V., Filippova, K. E., & Priyetzhev I. I. (2009). Almost everything about seismic inversion. Part 1. *Tekhnologii seismorazvedki*, 6(4), 3—16 (in Russian).
- Kostrogina, Yu. P. (1991). *Seismic surveys with complex sounding signals*. Moscow: Nedra, 176 p. (in Russian).

- Тяпкин, Yu. K. (1991). Optimum frequency range of the corrective filtering of seismic records. *Geofizicheskiy zhurnal*, 13(1), 62—69 (in Russian).
- Тяпкин, Yu. K. (1994). Optimized estimates of a complicated multichannel seismic record model with statistical and deterministic regularization. *Geologiya i geofizika*, 35(1), 128—135 (in Russian).
- Тяпкин, Yu. K. (1998). Increasing the resolving power of seismic method based on optimized use of records with different spectral characteristics. 1. Theory and method. *Geofizicheskiy zhurnal*, 20(1), 82—90 (in Russian).
- Тяпкин, Yu. K., Prihodchenko, D. F., & Nekrasov, I. A. (2005). Optimizing the process of extracting the signal from a multichannel seismic record. *Geofizicheskiy zhurnal*, 27(5), 718—729 (in Russian).
- Тяпкин, Yu. K., & Silinskaya, E. A. (2007). Deconvolution of seismic records with the optimization of weighted normalized quadratic functionals. 2. Frequency domain. *Geofizicheskiy zhurnal*, 29(6), 32—44 (in Russian).
- Тяпкин, Yu. K., Shatilo, A. P., & Starostenko, E. V. (1993). Iterative algorithms for optimum in L_1 and L_2 estimation of the phase characteristic of a seismic signal using the recording tri-spectrum. *Geofizicheskiy zhurnal*, 15(2), 85—92 (in Russian).
- Carter, D., & Pambayuning, S. (2009). Extended bandwidth by a frequency domain merge of two 3D seismic volumes. *The Leading Edge*, 28(4), 400—406. doi: 10.1190/1.3112752.
- Deplante, C. (2009). Spectral Fusion: a tool to merge low and high frequency datasets. *International Petroleum Technology Conference*, Paper 14078. doi: 10.2523/IPTC-14078-MS.
- Dittert, K. K. (1987). Method for filtering and combining seismic data having different spectral characteristics. US Patent no. 4,715,021.
- Franks, L. E. (1969). *Signal Theory*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 332 p.
- Greer, S., & Fomel, S. (2018). Matching and merging high-resolution and legacy seismic images. *Geophysics*, 83(2), V115—V122. doi: 10.1190/geo2017-0238.1.
- Hesthammer, J., & Lokkebo, S. M. (1997). Combining seismic surveys to improve data quality. *First Break*, 15(4), 103—115. doi: 10.3997/1365-2397.1997010.
- Horn, R. A., & Johnson, C. R. (1985). *Matrix Analysis*. Cambridge Univ. Press.
- Kumar, R., Al-Saeed, M. A., Lipkov, Y., & Roth, J. (2011). Seismic source comparison for shallow targets in north Kuwait field: 81st SEG Annual Meeting, *Expanded Abstracts* (pp. 102—106). doi: 10.1190/1.3627380.
- Mohan, T. R. M., Yadava, C. B., Kumar, S., Mishra, K. K., & Niyogi, K. (2007). Prestack merging of land 3D vintages — A case history from Kavery Basin, India: 77th SEG Annual Meeting, *Expanded Abstracts* (pp. 437—441). doi: 10.1190/1.2792458.
- Navarro, J., Thiessen, J., Zoch, H.-J., Janie, H., & Fischer, K. (1999). Depth imaging in the Heide-Buesum transition zone area: 61st EAGE Conference and Exhibition, *Extended Abstracts*, Paper 1-03. doi: 10.3997/2214-4609.201407600.

- Pipping, J. C. P., Wever, A., Bachmann, R., Smirnov, V., & Deneuvillers, S. (2019). K18-Golf Field seismic and reservoir modeling challenges. *First Break*, 37(5), 59—65.
- Potter, G., Mann, A., Jenkerson, M., & Rodriguez, J.-M. (1997). Comparison of marine vibrator, dynamite and airgun sources in the transition zone: 59th EAGE Conference and Exhibition, *Extended Abstracts*, Paper B018.
- Robinson, E. A. (1967). *Multichannel Time Series Analysis with Digital Computer Programs*. Holden-Day, San Francisco.
- Suarez, G. M., & Stewart, R. R. (2009). Seismic source comparison for compressional and converted-wave generation at Spring Coulee, Alberta: 79th SEG Annual Meeting, *Expanded Abstracts* (pp. 99—103). doi: 10.1190/1.3255919.
- Tyapkin, Y. K. (2001). Optimum primary and supplementary signals optimizing the seismic data resolution. *Journal of Applied Geophysics*, 46(3), 175—187. doi: 10.1016/S0926-9851(01)00037-4.
- Tyapkin, Y., & Silinskaya, E. (2007). Seismic data resolution enhancement by optimizing the generalized radius of gyration: 69th EAGE Conference and Exhibition, *Extended Abstracts*, Paper P268. doi: 10.3997/2214-4609.201401917.
- Tyapkin, Yu., & Ursin, B. (2005). Optimum stacking of seismic records with irregular noise. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2(3), 177—187. doi: 10.1088/1742-2132/2/3/001.
- Werner, H., & Krey, Th. (1979). Combisweep — a contribution to sweep techniques. *Geophysical Prospecting*, 27(1), 78—105. doi: 10.1111/j.1365-2478.1978.tb00960.x.
- White, R. E. (1977). The performance of optimum stacking filters in suppressing uncorrelated noise. *Geophysical Prospecting*, 25(1), 165—178. doi: 10.1111/j.1365-2478.1977.tb01158.x.
- Wiggins, R. A., & Robinson, E. A. (1965). Recursive solution to the multichannel filtering problem. *Journal of Geophysical Research*, 70(8), 1885—1991. doi: 10.1029/JZ070i008p01885.
- Yassi, N., & Kaba, A. (2013). Seismic source comparison in Surat Basin, Queensland: 23rd ASEG-PESA International Geophysical Conference, *Abstracts*. doi: 10.1071/PVv2013n165p55.
- Yordkayhun, S., Ivanova, A., Giese, R., Juhlin, C., & Cosma, C. (2009). Comparison of surface seismic sources at the CO₂SINK site, Ketzin, Germany. *Geophysical Prospecting*, 57(1), 125—139. doi: 10.1111/j.1365-2478.2008.00737.x.
- Zafiroopoulos, G., Tziolas, C., Dimitrakopoulos, D., & Economou, A. (1996). Field comparison of seismic sources for coal exploration: 58th EAGE Conference and Exhibition, *Extended Abstracts*, Paper PO22. doi: 10.3997/2214-4609.201408794.
- Ziolkowski, A., (1993). Determination of the signature of a dynamite source using source scaling, Part 1: Theory. *Geophysics*, 58(8), 1174—1182. doi: 10.1190/1.1443501.
- Ziolkowski, A., & Lerwill, W. E. (1979). A simple approach to high resolution seismic profiling for coal. *Geophysical Prospecting*, 27(2), 360—393. doi: 10.1111/j.1365-2478.1979.tb00975.x.
- Ziolkowski, A. M., Lerwill, W. E., March, D. W., & Peardon, L. G. (1980). Wavelet deconvolution using a source scaling law. *Geophysical Prospecting*, 28(6), 872—901. doi: 10.1111/j.1365-2478.1980.tb01266.x.