

УДК 550.834

А.Н. Ошкин¹, А.И. Коньков², А.В. Тарасов³, А.А. Шувалов⁴, В.И. Игнатьев⁵**МЕТОДЫ МИНИМИЗАЦИИ И ПОДАВЛЕНИЯ
КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ШУМОВ ОДНОВРЕМЕННО
РАБОТАЮЩИХ ИСТОЧНИКОВ В ВИБРОСЕЙСМОРАЗВЕДКЕ⁶***Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет.
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1**Санкт-Петербургский государственный университет. 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9
ООО «ГЕОДЕВАЙС». 199178, Санкт-Петербург, Малый пр. В.О., д. 58, лит. А**Moscow State University, Faculty of Geology. 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1**St-Petersburg State University. 199034, St-Petersburg, University emb., 7/9**LLC «GEODEVAIS». 199178, St. Petersburg, Maly Ave. V.O., 58, lit. A*

Применение в сейсморазведочных работах нескольких одновременно работающих источников позволяет получать большие объемы данных в единицу времени, чем при классических работах с одним источником, а также усовершенствовать схему регистрации сейсмических данных. В зависимости от типа используемого источника (вибрационный или импульсный) используют разные способы разделения сигналов. При работах вибросейсмическим методом разделение сигналов становится возможным на этапе корреляционной обработки виброграмм. Рассмотрены методы построения некоррелирующих сигналов для применения в вибросейсморазведке (с примером применения таких сигналов на синтетических данных) и гиперболической медианной фильтрации для минимизации корреляционных и некогерентных шумов.

Ключевые слова: мультиисточник, разделение сигналов, псевдослучайные последовательности, медианная фильтрация, бинарный фазоманипулированный сигнал, построение свип-сигналов.

The use of several simultaneously operating sources in seismic operations allows one to obtain large amounts of data per unit of time than for classical works with a single source, and also to improve the seismic data recording system. Depending on the type of seismic source used (vibrating or pulsed), different methods of signal separation are used. When working with vibroseismic method, separation of signals becomes possible at the stage of correlative processing of vibrograms. In this paper, we demonstrate methods for constructing noncorrelating signals for use in vibroseis survey (with an example of using such signals on synthetic data) and hyperbolic median filtering to minimize correlation and incoherent noise.

Key words: simultaneous source, deblending, pseudorandom sequence, median filtering, binary phase-shift keying, sweep design.

Введение. Один из основных факторов, определяющих характер выполняемых сейсморазведочных работ, — их стоимость. По мере развития технологий сейсморазведки возникает спрос на более крупные проекты, поэтому сейчас более чем когда-либо очевидна потребность в повышении эффективности работ.

В последнее время при поисках решения такой задачи возрастает интерес к технологии применения одновременно работающих источников. Ее

суть заключается в одновременной регистрации нескольких источников, расположенных на произвольном удалении от системы наблюдения. Вибросейсмический метод (в отличие от импульсного) позволяет разделять данные от нескольких одновременно работающих источников на этапе корреляционной обработки виброграмм. Для решения этой задачи необходимо, чтобы сигнатуры источников имели низкий уровень взаимной корреляции. Для этих целей во многом

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, ассистент, канд. физ.-мат. н.; *e-mail:* a.oshkin@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет, кафедра физики Земли, ст. науч. с., канд. физ.-мат. н.; *e-mail:* a.konkov@spbu.ru

³ Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет, кафедра физики Земли, аспирант; *e-mail:* aleksei.v.tarasov@gmail.com

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет, кафедра физики Земли, аспирант; *e-mail:* andrei.a.shuvalov@gmail.com

⁵ ООО «Геодавайс», коммерческий директор; *e-mail:* vi@geodevice.ru

⁶ Работа выполнена при поддержке РНФ (проект №17-77-10165).

используются псевдослучайные сигналы (ПСС) и псевдослучайные последовательности (ПСП) [Weik, 2001]. Псевдослучайные сигналы также обладают повышенной помехоустойчивостью и формой автокорреляционной функции, которая лучше (меньше число и уровень боковых лепестков вблизи максимума АКФ), чем у классического свипа с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-сви́па) [Sallas et al., 2008]. ПСС позволяют также расширить частотный диапазон в область низких частот, что при использовании ЛЧМ сигналов затруднительно [Sallas et al., 2011].

Существует множество способов построения некоррелирующих сигналов: фазовая манипуляция несущего сигнала [Cunningham, 1979], фильтрация бинарной псевдослучайной последовательности [Iranpour et al., 2009], пересортировка сегментов ЛЧМ-сви́па [Goupillaud, 1976], генерация и фильтрация последовательности случайных чисел [Goder, 1994], решение оптимизационной задачи и т.д.

Несмотря на все преимущества псевдослучайных сигналов, их реализация и точное воспроизведение могут быть затруднительны для реальных механических систем. Однако в ряде работ, посвященных этой тематике, продемонстрировано [Dean et al., 2017], что на сейсмограммах, полученных как с использованием псевдослучайных сигналов, так и с использованием ЛЧМ-сигналов, прослеживаются одинаковые отражающие границы.

В рамках нашей работы решались следующие задачи: 1) генерация бинарной последовательности для фазовой манипуляции с помощью решения оптимизационной задачи; 2) фильтрация корреляционных шумов с использованием гиперболической медианной фильтрации.

Корреляционные и спектральные свойства фазоманипулированного сигнала. Фазоманипулированные сигналы (ФМн) широко используются в системах передачи информации с многополь-

зовательским доступом (в системах с кодовым разделением сигналов CDMA, таких, как GPS, ГЛОНАСС, 3G, 4G и Wi-Fi). В англоязычной литературе, посвященной применению ПСС в сейсморазведке, такой сигнал иногда называют Wischmeyer sweep [Wischmeyer, 1996], однако в статье мы будем называть его фазоманипулированным сигналом.

Мы рассматривали только двоичную фазовую манипуляцию, что соответствует изменению фазы на π . Такое изменение фазы сигнала эквивалентно изменению знака несущей внутри одного прямоугольного импульса $S(t)$. Это позволяет записать его математическую модель в виде амплитудно-модулированного сигнала. Частота несущей $f_0 = 1/T$, где T — длительность прямоугольного импульса. Используя управляющую последовательность a длины N , элементы которой принимают значения $+1$ или -1 , сигнал $W(t)$ можно записать в виде:

$$W(t) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k S(t - kT) \sin 2\pi f_0 t.$$

На рис. 1, *a* представлен отрезок фазоманипулированного сигнала (пунктирной линией выделена огибающая сигнала), на рис. 1, *б* — его амплитудный спектр. Частота сигнала $f_0 = 75$ Гц, число элементов последовательности N равно 1023, длительность сигнала $NT \approx 13,6$ с.

Основной лепесток спектра имеет ширину $\Delta f = 2/T$ с максимумом на частоте $f_{\max} = f_0$, а боковые лепестки имеют ширину, равную $1/T$. В общем случае, когда в прямоугольном импульсе аналогичной длины заключено несколько периодов несущей n , это приводит к смещению максимума основного лепестка на частоту $f_{\max n} = nf_0$. Остальные параметры остаются неизменными. Случаи $n \neq 1$ не представляют интерес для целей сейсморазведки,

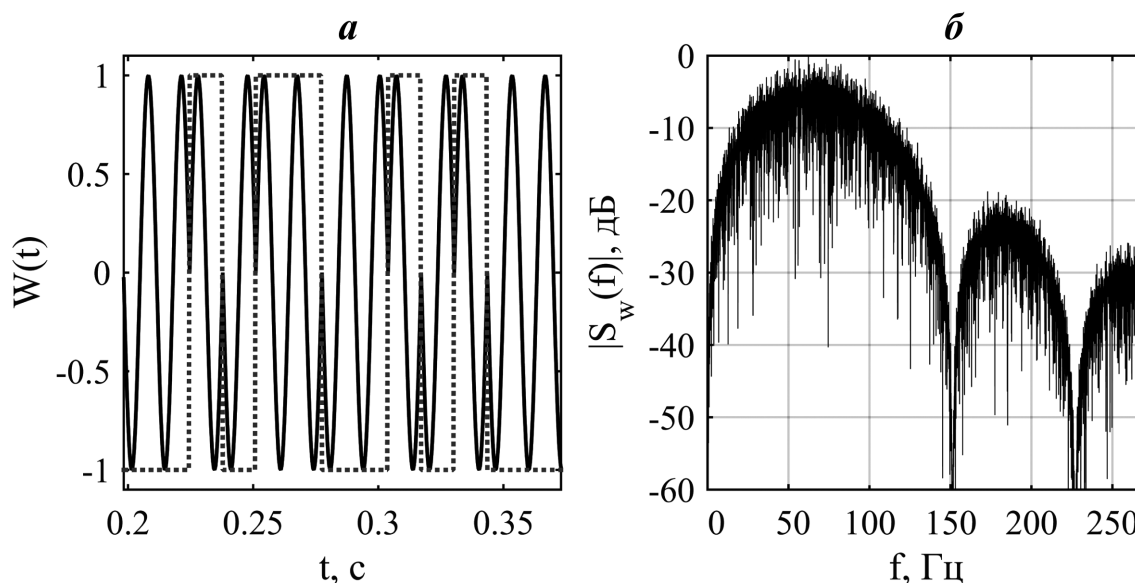


Рис. 1. Сегмент ФМн сигнала длительностью 13,6 с и несущей частотой 75 Гц (*a*) и амплитудный спектр ФМн сигнала (*б*)

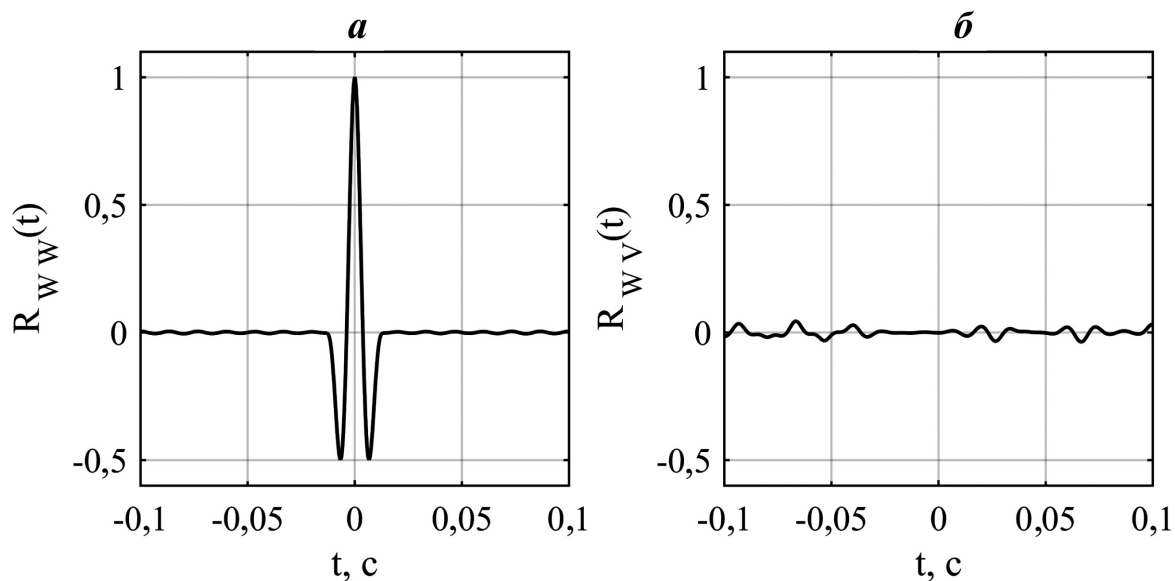


Рис. 2. Автокорреляционная функция сигнала на рис. 1, *a* (*a*) и взаимокорреляционная функция двух PSK-сигналов, управляемых различными последовательностями (*б*)

поскольку приводят к появлению дополнительных боковых лепестков автокорреляционной функции.

Как отмечено выше, для одновременного использования нескольких источников необходимо, чтобы соответствующие сигналы имели низкий уровень взаимной корреляции. Взаимная корреляция двух ФМн сигналов $W(t)$ и $V(t)$, построенных с использованием различных последовательностей *a* и *b* соответственно, выражается следующим образом:

$$R_{wv}(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_{ab}(m) R_s(t - mT), \quad (1)$$

$$R_{ab}(m) = \sum_{l=0}^{N-1} a_l b_{l-m},$$

где R_s — автокорреляция одного периода несущей, R_{ab} — взаимная корреляция двух последовательностей. Для расчета автокорреляции сигнала необходимо в выражение (1) подставить одну и ту же последовательность. На рис. 2, *a* представлен пример автокорреляционной функции ФМн сигнала, на рис. 2, *б* — пример взаимной корреляции двух ФМн сигналов с разными управляющими последовательностями. Двоичная фазовая манипуляция проводится с использованием m -последовательностей [Wong, 2013].

Таким образом, для построения некоррелирующих сигналов с приемлемыми для решения поставленной задачи свойствами автокорреляционных функций необходимо задействовать последовательности, обладающие такими же свойствами. К настоящему времени разработано множество последовательностей (m -последовательности, коды Баркера [Barker, 1953], коды Голда [Gold, 1967], коды Касами [Welch, 1974] и т.п.), которые эффективны в случае расчета периодических корреляци-

онных функций. Однако для целей сейсморазведки необходимо рассчитывать апериодические корреляционные функции, в связи с чем эти последовательности могут быть неоптимальными. Кроме того, указанные последовательности определяются не для произвольной длины последовательности, а их усечение приводит к неблагоприятным результатам. Итак, в сейсморазведке возникает задача построения некоррелирующих последовательностей произвольной длины с минимальным шумом автокорреляции.

Построение бинарных последовательностей с помощью решения оптимизационной задачи. Последовательность, элементы которой могут принимать два значения, называется бинарной. Сигналы, построенные на основе бинарной последовательности, представляют большой интерес, поскольку их энергии равны. Это особенно важно при сейсморазведочных работах, поскольку в этом случае источники энергетически равны, а соответствующие сейсмограммы характеризуются эквивалентным динамическим диапазоном.

В последнее время возрос интерес к методам генерации последовательностей [Soltanian, 2012], обладающих необходимыми свойствами для конкретных задач, однако их обзор выходит за рамки статьи, поэтому результаты предложенного метода будут сопоставляться с характеристиками m -последовательностей.

В качестве параметров, определяющих оптимальность корреляционных функций последовательностей, можно выделить *PSL* (Peak Sidelobe Level) — максимальный уровень бокового лепестка АКФ, *ISL* (Integrated Sidelobe Level) — интегральный уровень бокового лепестка АКФ, *PCCL* (Peak Cross-Correlation Level) — максимальный уровень шума ВКФ и *ICCL* (Integrated Cross-Correlation

Level) — интегральный уровень шума ВКФ. Эти параметры определяются следующим образом:

$$ISL(a) = \sum_{k=1}^{N-1} |R_a(k)|^2, \quad PSL(a) = \max\{|R_a(k)|^2\}_{k=1}^{N-1},$$

$$ICCL(a, b) = \sum_{k=-(N-1)}^{N-1} |R_{ab}(k)|^2,$$

$$PCCL(a, b) = \max\{|R_{ab}(k)|^2\}_{k=-(N-1)}^{N-1}.$$

Использование интегральных характеристик позволяет определять уровень корреляционного шума на всей сейсмической записи. Максимальный уровень бокового лепестка представляет меньший интерес, поскольку информация о нем несет локальный характер, однако его слишком высокое значение может привести к появлению ложного импульса высокой амплитуды, что недопустимо. В связи с этим параметр PSL не применялся в алгоритме построения последовательности и использовался только для оценки результатов.

Задачу построения некоррелирующих последовательностей предлагается решать, как задачу многокритериальной оптимизации, в которой необходимо построить пару последовательностей, обладающих минимальным интегральным уровнем бокового лепестка АКФ и минимальным интегральным уровнем ВКФ. Поскольку одновременно удовлетворить обоим критериям невозможно, то для построения оптимальных последовательностей предлагается провести скаляризацию задачи и минимизировать следующий функционал:

$$F_\theta(a, b) = \theta[ISL(a) + ISL(b)] + (1-\theta)ICCL(a, b).$$

Введение управляющего параметра θ позволяет регулировать вклад в функционал отдельных параметров. Определение значения оптимального параметра θ — следующий шаг для решения задачи построения сигналов. Для минимизации функционала использовался метод генетического алгоритма, который позволяет вводить ограничения на целочисленность значений искомых параметров. В генетическом алгоритме реализованы различные процедуры поиска решения и методы выхода из локального минимума, которые построены, в том числе, и на вероятностном подходе, что позволяет при каждой симуляции генерировать новые пары [Zhang et al., 2007].

Отметим негативные особенности получаемых последовательностей при минимизации этого функционала. Например, при $\theta = 1$ можно сгенерировать множество пар, которые будут обладать схожей суммой параметров $ISL(a)$ и $ISL(b)$, однако индивидуальные значения параметра ISL для последовательностей этой пары могут сильно отличаться. Несмотря на это алгоритм позволяет получить оптимальный набор пар, среди которых

в дальнейшем можно выбрать пару со схожими параметрами ISL .

Выбор оптимальных параметров проводился для последовательностей с длиной $N=1023$. Поскольку применение генетического алгоритма — задача ресурсоемкая, то в качестве результата приводится медианное значение параметров среди 7 сгенерированных пар для каждого значения управляющего параметра θ .

На рис. 3 представлен результат расчета параметров построенных последовательностей (сплошная линия) и значение тех же параметров для пары m -последовательностей (пунктирная линия).

Видно, что этот алгоритм позволяет получать последовательности с меньшим суммарным шумом АКФ и ВКФ при $0,65 < \theta < 0,9$ (рис. 3, а, б). Кроме того, при любом значении параметра θ функционал позволил обеспечить меньшее значение максимального бокового лепестка ВКФ, чем для m -последовательностей (рис. 3, в), однако расчет для последовательностей другой длины продемонстрировал, что подобного результата удастся добиться при $\theta < 0,8$. Также отметим, что не удалось получить меньшее значение параметра PSL ни при каких значениях θ , однако параметр PSL начинает выходить на асимптоту при $\theta = 0,75$ (рис. 3, в). Таким образом, оптимальное значение управляющего параметра лежит в диапазоне $0,75 < \theta < 0,8$.

Фильтрация корреляционных шумов с помощью гиперболической медианной фильтрации. После разделения сигналов на коррелограммах остается шум взаимной корреляции, уровень которого возрастает с увеличением числа используемых источников. Наличие этого шума оказывается неизбежным при работе с несколькими источниками. Его характерная особенность заключается в том, что он находится в той же полосе частот, что и полезный сигнал, в связи с чем алгоритмы фильтрации, использующие спектральные свойства случайного шума, оказываются неэффективны для подавления помех такого типа. Использование нелинейных методов фильтрации, пример которых — медианная фильтрация, позволяет разрешить эту проблему.

В современной литературе демонстрируется эффективность мультинаправленного медианного фильтра [Huo et al., 2009], применение которого позволяет выделять на зашумленной сейсмограмме волны с локально постоянными значениями кажущейся скорости.

Мы предлагаем метод гиперболической медианной фильтрации (HypMF — Hyperbolic median filter). Он использует кинематические свойства целевых отраженных волн. Известно, что годограф отраженных волн хорошо описывается уравнением гиперболы в случае горизонтальных и субгоризонтальных границ раздела сред, поэтому предлагается использовать локализованные в окне гиперболы, которые проходят через фильтруемый отсчет при разных значениях скорости.

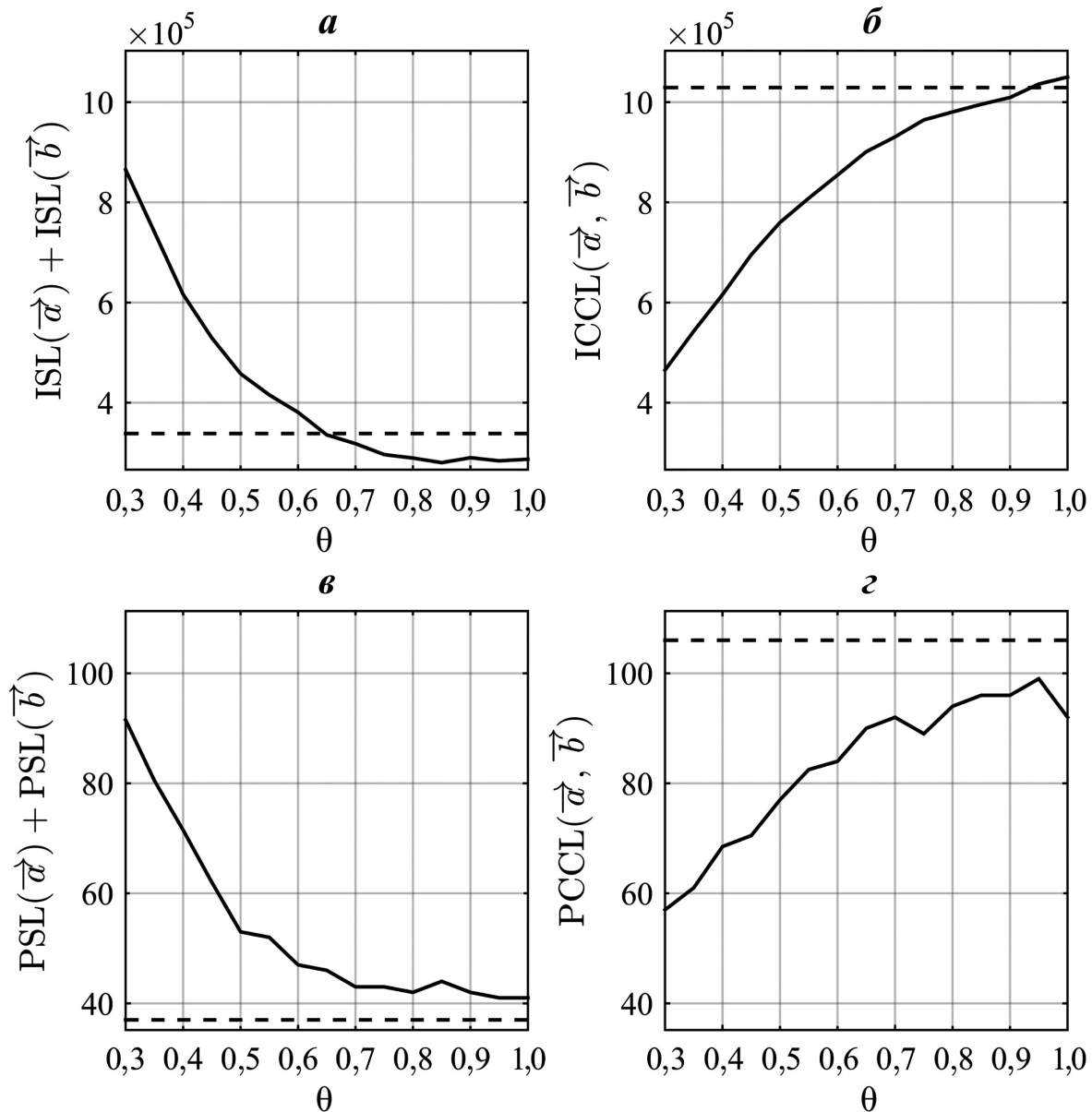


Рис. 3. Параметры оптимальности корреляционных функций сгенерированных последовательностей в сравнении с m -последовательностями: *a* — сумма интегральных уровней бокового лепестка последовательностей, *б* — интегральный уровень шума взаимной корреляции двух последовательностей, *в* — сумма максимальных уровней бокового лепестка последовательностей, *г* — максимальный уровень шума взаимной корреляции двух последовательностей

Рассмотрим алгоритм работы НурМФ. Входными данными для алгоритма служат сейсмограмма $D(t, x)$, диапазон скорости $\vec{V} = [V_1, V_2, \dots, V_K]$ и диапазон трасс L , используемых для фильтрации. При фильтрации задействуются трассы слева и справа от трассы, для которой фильтруется отсчет. Дальнейшие изложения будут проведены для трасс, которые имеют равное число трасс слева и справа, равное δ , которое связано с диапазоном трасс как $2\delta + 1 = L$. Замечания по фильтрации крайних трасс будут отмечены ниже.

Сейсмограмма представляет собой двумерный массив данных размером $M \times N$, в котором каждому столбцу соответствует номер приемника, а строки

соответствуют отсчетам сеймотрасс, регистрируемых с шагом дискретизации Δt , который, как правило, одинаков для всех приемников. Шаг по приемникам (столбцы) не постоянный, вместо этого используется обращение к приемнику по значению удаления от источника x . Это позволяет учесть удаление первого канала, корректировать удаление в ходе предобработки и не использовать все каналы, если какие-то из них оказались неисправны. Соответственно, обращение к элементам сейсмограммы с помощью пары индексов осуществляется следующим образом:

$$D(t, x) = D(i\Delta t, x_j) = D_{ij}.$$

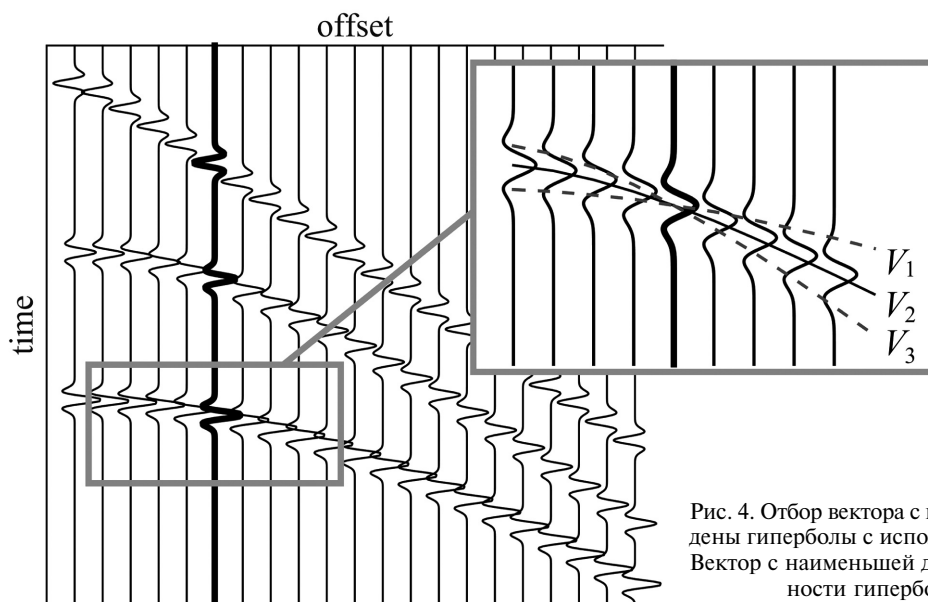


Рис. 4. Отбор вектора с наименьшей дисперсией. Справа приведены гиперболы с использованием разных значений скорости. Вектор с наименьшей дисперсией проходит через ось синфазности гиперболы, отвечающей скорости V_2

Годограф отраженной волны хорошо аппроксимируется уравнением гиперболы

$$t = \sqrt{T^2 + \frac{x^2}{V^2}},$$

где T — двойное вертикальное время хода луча, V — скорость. Здесь имеется два свободных параметра — T и V , на один из которых необходимо наложить ограничение, связанное с тем, что гипербола должна проходить через фильтруемый отсчет с индексами I и J , а другой параметр остается управляющим при переборе гипербол. В качестве управляющего параметра алгоритма естественно выбрать скорость, поскольку этот элемент используется во многих процедурах обработки: двумерная фильтрация, скоростной анализ и введение кинематических поправок, миграционные преобразования и т.д. Таким образом, получается уравнение связи на вертикальное время хода для проведения гиперболы через отсчет с индексами I и J с соответствующей скоростью V_n :

$$I\Delta t = \sqrt{T_{IJ,V_n}^2 + \frac{x_J^2}{V_n^2}}.$$

Далее из отсчетов сейсмограммы формируется матрица $h^{(IJ)}$, столбцы которой соответствуют гиперболам с разными значениями скорости, а строки соответствуют отсчетам, взятым из разных трасс в окне. Элементы матрицы строятся следующим образом:

$$h_{mn}^{(IJ)} = D(t_{mn}^{(IJ)}, x_{J+m-\delta-1}),$$

$$t_{mn}^{(IJ)} = \sqrt{T_{IJ,V_n}^2 + \frac{x_{J+m-\delta-1}^2}{V_n^2}}.$$

Для дальнейших выкладок удобно обозначить столбцы матрицы по следующему правилу:

$$H_n^{(IJ)} = [h_{1n}^{(IJ)}, h_{2n}^{(IJ)}, \dots, h_{Ln}^{(IJ)}]$$

В случае, если фильтруемый отсчет находится на оси синфазности некоторой отраженной волны, которой соответствует некоторая реальная скорость ϑ , среди всего набора векторов H необходимо отобрать тот, который наилучшим образом описывает годограф этой волны. В качестве критерия отбора наилучшего вектора $\hat{H}$ была выбрана минимальность дисперсии отсчетов векторов. Для получения нового значения отсчета после фильтрации $\tilde{D}_{IJ}$ вычисляется медиана вектора $\hat{H}$. Выбор в пользу медианы обусловлен ее эффективностью для борьбы с сильными импульсными помехами. При отсутствии сильных отклонений вычисление среднего и медианного значения дают практически одинаковые результаты.

Принципиальная схема алгоритма НурМФ:

1. Входные данные:
 - а) сейсмограмма D ;
 - б) вектор скоростей $\vec{V} = [V_1, V_2, \dots, V_K]$;
 - в) диапазон используемых трасс L (окно).
2. Цикл алгоритма: для каждого отсчета с индексами I и J :
 - а) формирование векторов из отсчетов, соответствующих различным гиперболам $H_n^{(IJ)}$, $n=1, \dots, K$;
 - б) выбор вектора с наименьшей дисперсией $\hat{H} = \arg \min_{n=1 \dots K} (\text{Var}(H_n^{(IJ)}))$;
 - в) вычисление медианного значения для нового отсчета $\tilde{D}_{IJ} = \text{median}(\hat{H})$.
3. Выходные данные:
 - а) фильтрованная сейсмограмма $\tilde{D}$;
 - б) скоростная карта W , состоящая из «лучших» скоростей, отвечающих выбранным векторам $\hat{H}$.

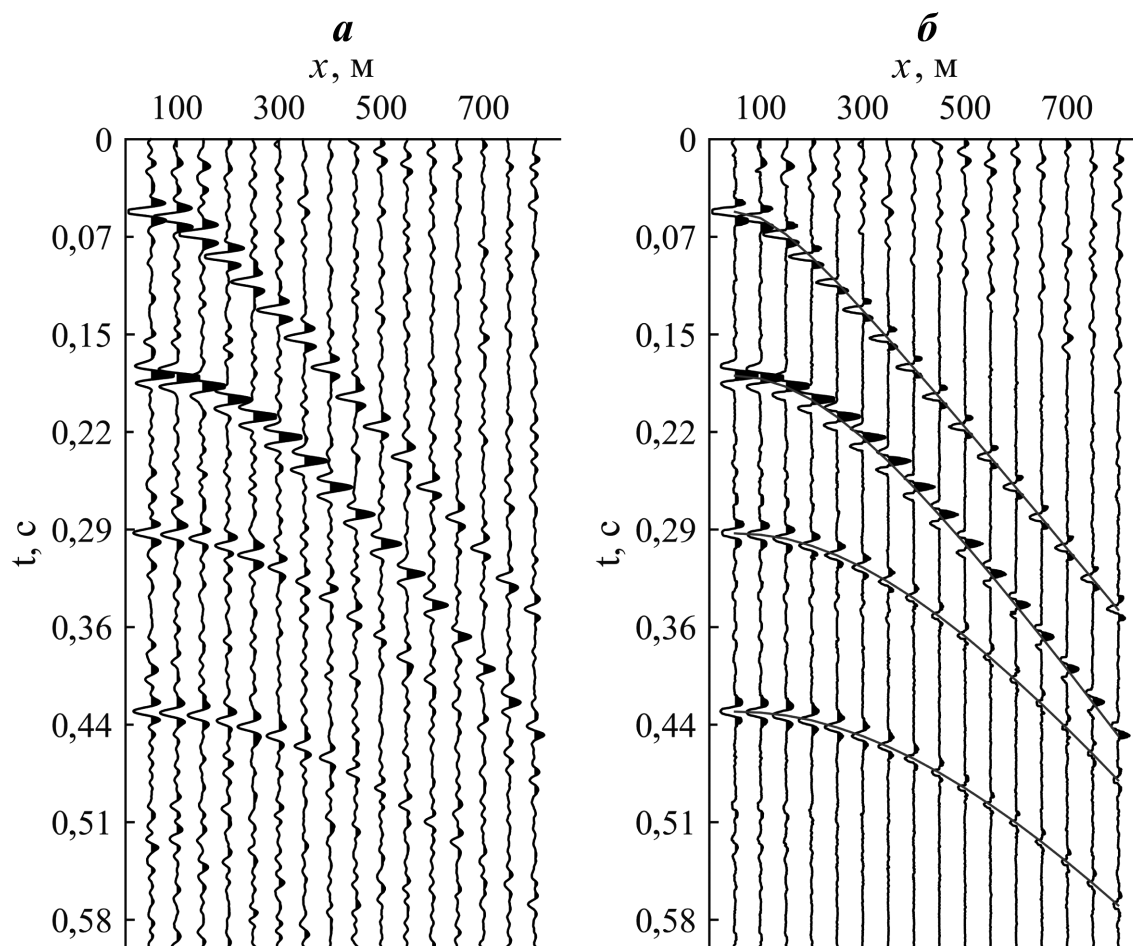


Рис. 5. Коррелограмма первого источника после разделения сигналов (а) и результат применения гиперболической медианной фильтрации (б). Линии — годографы импульсной сейсмограммы

На рис. 4 продемонстрирована схема отбора векторов. Фильтрации подвергается трасса с номером 6, размер окна равен 9, фильтруемый отсчет соответствует пику сигнала. В правой части рис. 4 проведены 3 годографа отраженной волны, соответствующие 3 разным значениям скорости V_1 , V_2 и V_3 . На рис. 4 видно, что вектор, отвечающий скорости V_2 , обладает наименьшей дисперсией.

Скоростную карту W можно использовать как вспомогательный инструмент для проведения скоростного анализа. На ее основе можно также построить скоростной закон, который можно использовать в качестве входных данных для миграционных преобразований и введения кинематических поправок.

Для фильтрации краевых трасс используется та же принципиальная схема, но берется неодинаковое число трасс слева и справа, которые помещаются в окно. Например, если $\delta=2$ и фильтруется отсчет из второй трассы, то в выборку попадают отсчеты из 1-й, 2-й, 3-й и 4-й трасс.

Одно из самых уязвимых мест алгоритма в его программной реализации и быстродействии — формирование матрицы h , что особенно актуально при обработке множества сейсмограмм. Поскольку схема отбора гиперболических волн регулируется только раз-

мерами сейсмограммы M и N , вектором значений скорости $\bar{V}$ и размером окна L , то эту проблему можно разрешить путем построения матрицы-маски для отбора гиперболических волн и последующей обработки всех сейсмограмм с использованием одинаковых управляющих параметров.

Также отметим, что не через каждый отсчет можно провести гиперболу, используя заданные значения скорости, что особенно актуально для малых времен и больших удалений. Такие отсчеты фильтрации не подвергаются.

Функционал этого метода можно расширить для сохранения после фильтрации осей синфазности дифракционных волн, поскольку годограф этого типа волн также определяется уравнением гиперболы, однако в данном случае вершина гиперболы может быть смещена.

Для подавления импульсных шумов можно было также использовать вычисление среднего взвешенного, однако расчет весовых коэффициентов требует дополнительных вычислительных затрат и операций для каждой сейсмограммы. Вычисление же медианы вектора происходит гораздо быстрее, поскольку происходит лишь сортировка элементов в порядке их возрастания и обращение к элементам по их адресу в памяти.

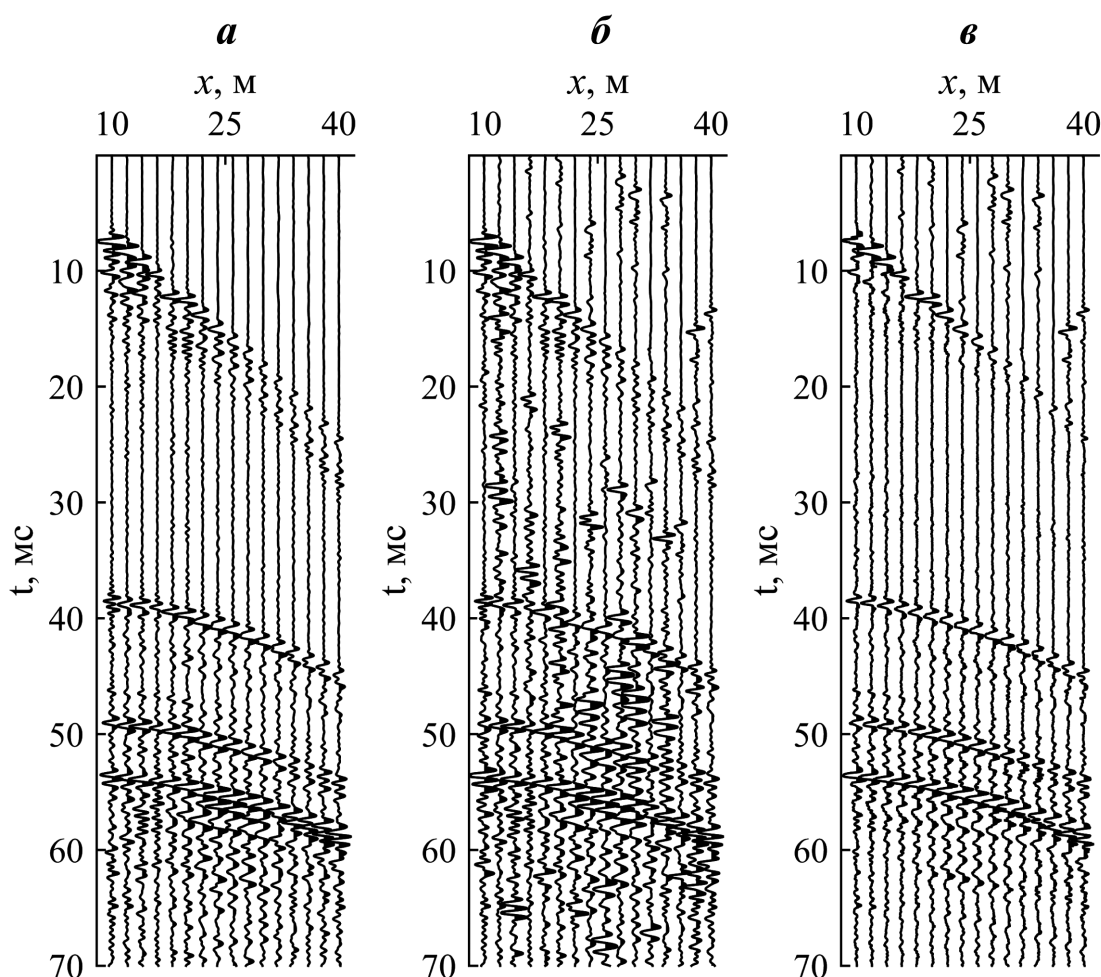


Рис. 6. Сейсмограмма, полученная с использованием одного источника (а), результат наложения второго источника со случайными временными задержками (б) и результат применения гиперболической медианной фильтрации (в)

Возможность удаления импульсных шумов больше важна для работы с несколькими импульсными источниками, что будет также продемонстрировано на примерах.

Применение построенных сигналов и фильтрация корреляционного шума на синтетических данных. В ходе тестов построены два фазоманипулированных сигнала с несущей частотой 75 Гц и длительностью 13,6 с, которые затем сворачивались с синтетической импульсной сейсмограммой. На полученную виброграмму был наложен случайный шум с нормальным распределением, после чего рассчитывалась коррелограмма для первого источника (рис. 5, а). Коррелограмма первого источника содержит остаточный шум автокорреляции, взаимной корреляции и наложенный шум. Применение гиперболической медианной фильтрации позволило эффективно удалить шумы и выделить целевые волны (рис. 5, б). Верхняя часть сейсмограммы не подвергалась фильтрации, поскольку для некоторых отсчетов невозможно провести гиперболы, используя заданный диапазон значений скорости.

Для полноценной демонстрации возможностей НурМФ мы также продемонстрируем работу

алгоритма по обработке сейсмограмм, полученных с применением нескольких импульсных источников. Разделение источников на таких сейсмограммах представляет более сложную задачу.

Разделение сигналов при работе с импульсными источниками с помощью гиперболической медианной фильтрации. Не будем подробно рассказывать о методах и особенностях разделения сигналов импульсных источников, а лишь кратко обозначим некоторые положения. При одновременной работе двух импульсных источников первый источник активируется в каждом пункте взрыва, как при классическом проведении сейсмических работ, а второй источник активируется с небольшой временной задержкой относительно первого. Небольшие временные сдвиги активации второго источника приводят к тому, что на сейсмограммах общей средней точки (ОСТ) и общего пункта приема (ОПП) данные второго источника выглядят как случайные импульсные помехи, которые необходимо устранить. Получив данные первого источника после фильтрации, их можно вычесть из суммарных данных и получить данные второго источника. Затем, зная времена задержек активации второго источника, с помощью статических

поправок можно получить данные второго источника без временных сдвигов.

Продemonстрируем эффективность алгоритма с использованием реальных данных, полученных на Онежском озере (рис. 6).

При фильтрации использовалось окно в 7 трасс. На рис. 6, б показана сложная интерференционная картина, на которой целевые отраженные волны подвергаются заметному искажению. Видно, что алгоритм смог восстановить отраженные волны, которые наблюдаются на исходной сейсмограмме, и даже несколько улучшить картину волнового поля. Отметим негативную особенность алгоритма, которая заключается в том, что алгоритм может «находить» гиперболы там, где их нет изначально, что актуально для больших времен и умеренных удалений. В связи с этим видимые гиперболы ниже 55 мс подлежат совместному анализу с другими сейсмограммами. При фильтрации сейсмограмм, полученных с использованием только одного источника, такая проблема не возникает.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Barker R.H. Group synchronizing of binary digital systems // *Communication Theory*. London: Butterworth, 1953. P. 273–287.

Cunningham A.B. Some alternate vibrator signals // *Geophysics*. 1979. Vol. 44. P. 1901–1921.

Dean T., Tulett J., Lane D. The use of pseudorandom sweeps for vibroseis acquisition // *First Break*. 2017. Vol. 35, N 1. P. 107–112.

Goder A. Minimum phase correlation of pseudo-random vibrator signals // 64th SEG meeting. Expand. Abstr. Los Angeles, 1994. P. 884–885.

Gold R. Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing // *IEEE Transactions on Inform. Theory*. 1967, Vol. 13. P. 619–621.

Goupillaud P.L. Signal design in the «vibroseis» technique // *Geophysics*. 1976. Vol. 41. P. 1291–1304.

Huo S., Luo Y., Kelamis P.G. Simultaneous sources separation via multi-directional vector-median filter // 79th Ann. Intern. Meeting. SEG. Expand. Abstr. 2009. P. 31–35.

Imamura S., Inazaki T., Kita T., Sakanishi K. Development and application of improved high-speed resistivity profiling system // Proceed. of the 11th SEGJ Intern. Symp. SEG. Expand. Abstr. 2013. P. 68–71.

Iranpour K., Eriksson S., Hoerline C. Generating sweep sequences // Intern. Patent application. 2009. WO 2009/026024.

Omijeh B., Oteheri T. Binary phase shift keying digital modulation technique for noiseless and noisy transmission // *Sci. J. of Circuits, Systems and Signal Processing*. 2016. Vol. 5. N 3. P. 24–30.

Sallas J., Gibson J., Lin F. et al. Broadband vibroseis using simultaneous pseudorandom sweeps // 78th Ann. Intern. Meeting, SEG. Expand. Abstr. 2008. Vol. 27. P. 100–104.

Заключение. Продemonстрирована эффективность применения квазиортогональных сигналов для технологии применения нескольких одновременно работающих источников.

Предложен метод построения некоррелирующих последовательностей с использованием стохастического метода минимизации функционала на примере генетического алгоритма. Построенные таким способом последовательности можно также эффективно применять, например, в электротомографии [Imamura et al., 2013; Yamashita et al., 2014] и в других способах построения сигналов на их основе [Omijeh et al., 2016; Tang et al., 2009].

Предложен метод гиперболической медианной фильтрации для подавления корреляционных помех, а также случайного некогерентного шума. Гиперболическую медианную фильтрацию можно использовать как мощный инструмент для эффективного разделения импульсных источников (аналог — морские вибраторы, использующие одинаковые свипы) при морских сейсморазведочных работах.

Sallas J., Gibson J., Maxwell P., Lin F. Pseudorandom sweeps for simultaneous sourcing and low-frequency generation // *The Leading Edge*. 2011. Vol. 30(10). P. 1162–1172, DOI 10.1190/1.3657077.

Soltanian M. Computational design of sequences with good correlation properties // *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2012. Vol. 60, N 5. P. 2180–2193.

Tang S.C., Clement G. Acoustic standing wave suppression using randomized phase-shift-keying excitations // *T. J. Acoustical Soc. Amer.* 2009. Vol. 126, N 4. P. 1667–1670.

Weik M. Computer science and communications dictionary. 2001. ISBN: 9780792384250.

Welch L. Lower bounds on the maximum cross correlation of signals // *IEEE Transactions on Inform. Theory*. 1974. Vol. 20. P. 397–399.

Wischmeyer C.R. Method and apparatus for continuous wave seismic prospecting // *US Patent*. 1996. N 3,234,504.

Wong J. Multiple simultaneous vibrators controlled by m-sequences // 83rd Ann. Intern. Meeting. SEG. Expand. Abstr. 2013. P. 109–113.

Yamashita Y., Lebert F., Gourry J-C. et al. A method to calculate chargeability on multiple-transmission resistivity profile using code-division multiple-access // *SEG Technical Program*. Expand. Abstr. 2014. P. 1775–1779.

Zhang J., Chung H., Lo W.L. Clustering-Based Adaptive Crossover and Mutation Probabilities for Genetic Algorithms // *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2007. Vol. 11, N 3. P. 326–335.

Поступила в редакцию 27.02.2018

Поступила с доработки 27.03.2018

Принята к публикации 27.03.2018