Геофизические технологии, № 1, 2018, с. 39–50

www.rjgt.ru

doi: 10.18303/2619-1563-2018-1-4

УДК 550.83

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ КОДОВЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ КОДОИМПУЛЬСНОМ НАКАПЛИВАНИИ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НЕФТЕГАЗОВОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Р.Е. Хасан, Ю.П. Кострыгин

ООО «Новоросморгео», просп. Чекистов, 16, офис 237, Краснодар, 350089, Россия, e-mail: Kostr_p@mail.ru

Путем сравнительного анализа корреляционных функций, соответствующих псевдослучайным импульсным последовательностям и последовательностям с линейным изменением периода следования импульсов, рассмотрена целесообразность применения псевдослучайных кодовых функций при кодоимпульсном накапливании колебаний для решения задач нефтегазовой сейсморазведки. Показано, что спектры главных максимумов корреляционных функций псевдослучайных импульсных последовательностей практически совпадают со спектрами единичных импульсов, используемых для построения этих последовательностей. Указанное обстоятельство свидетельствует о принципиальной возможности применения псевдослучайных последовательностей для решения задач, стоящих перед нефтегазовой сейсморазведкой. Однако псевдослучайные импульсные последовательности характеризуются повышенным уровнем помех корреляционного преобразования, вследствие чего применение псевдослучайных кодовых функций при проведении сейсмических наблюдений на нефть и газ становится не целесообразным. Отмечается, что высокоамплитудным корреляционным фоном характеризуются не только кодоимпульсные псевдослучайные сигналы, но и любые другие псевдослучайные сложные сигналы, например, квазигармонические сигналы типа random, предусмотренные в современных системах управления вибросейсмических комплексов.

Однополярные псевдо-случайные коды, линейно изменяющийся период следования, динамический диапазон корреляционного преобразования

POSSIBILITY AND APPLICABILITY OF PSEUDO-RANDOM CODE FUNCTIONS IN IMPULSE-CODE SEISMIC CONCENTRATION TO OIL AND GAS SEISMOLOGY PROBLEM-SOLVING RESEARCH

R.E. Khasan, Yu. P. Kostrygin

«Novorosmorgeo» Ltd., Chekistov av., 16, office 237, Krasnodar, 350089, Russia, e-mail: Kostr_p@mail.ru

The applicability of pseudo-random code functions in impulse-code seismic concentration to oil and gas seismology problem-solving has been assessed through the comparative analysis of correlation functions in compliance with pseudo-random pulse sequences and linear change in pulse repetition sequences. The research shows that the correlation functions' main peaks spectrums of pseudo-random pulse sequences are almost equal to the single impulses' spectrums used for the sequences development. The given circumstance reflects the general possibility of pseudo-random sequences applicability to oil and gas seismology problem-solving. However, pseudo-random sequences are characterised by the increased interference level of correlative transformation,

which makes the use of pseudo-random code functions in oil and gas seismology inappropriate. It is noted that not only are impulse-code pseudo-random signals characterised by high-amplitude correlation noise, but also all the other pseudo-random complex signals, e.g. random quasi-harmonic signals, contained in modern vibroseis management systems.

Single-phase pseudo-random codes, linearly varying period, dynamics of correlation functions

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время значительные объемы первичных сейсмических записей на суше получают с использованием вибросейсмического метода разведки. Вместе с тем себестоимость серийных сейсмических вибраторов достигает в настоящее время 500 – 700 и более тысяч долларов, что обуславливает для многих геофизических предприятий серьезные экономические проблемы. Наиболее значимой альтернативой вибросейсмическому методу является кодоимпульсный метод, основанный на возбуждении импульсных последовательностей и характеризующийся практически такой же помехоустойчивостью, как и вибросейсмический метод. Однако при реализации кодоимпульсного метода используются конструктивно существенно более простые излучатели колебаний, себестоимость которых в 2–3 раза ниже себестоимости гидравлических вибраторов. Более того, актуальность развития кодоимпульсного способа сейсмической разведки в настоящее время в значительной степени усиливается в связи с санкциями, установленными к Российской Федерации западными странами, и необходимостью импортозамещения, поскольку ряд достаточно сложных элементов отечественных вибраторов производится в США.

По результатам многочисленных теоретических и экспериментальных исследований к наиболее эффективным однополярным последовательностям принято относить последовательности ЛИЧ, т. е. последовательности с линейным во времени изменением частоты следования импульсов, последовательности ЛИП, т. е последовательности с линейным во времени изменением периода следования импульсов [Кострыгин, 2014; Кострыгин, Колесников, 2010а, 2010б, 2012; Кострыгин, Удалый, 2013; Лукашин и др., 1977]. При этом важно отметить, что для последовательностей ЛИЧ автокорреляция функций кода имеет спектр, значения которого возрастают с ростом частоты следования, т. е. такие развертки создают эффект аналогичный степенным или логарифмическим вибросейсмическим разверткам. Для последовательностей же ЛИП амплитудный спектр автокорреляции функций кода в большей степени соответствует спектру вибросейсмических ЛЧМ- сигналов [Кострыгин, 2014; Кострыгин, Колесников, 2011].

Помимо указанных разверток в работах [Шайдуров и др., 2013; Шнеерсон, Майоров, 1988; Шнеерсон и др., 1990] отмечается принципиальная возможность при кодоимпульсном накапливании колебаний использовать и псевдослучайные импульсные последовательности. Псевдослучайные последовательности достаточно широко применялись в 70-80-е гг. прошлого столетия при исследовании верхней части разреза. Такая технология получила название mini-sosie и предполагала использование в качестве излучателей ручных переносных трамбовок [Wiles, 1979]. Средняя частота следования импульсов в mini-sosie составляла около 10 Гц, что позволяло за 2-5 мин накапливать до 1500-3000 воздействий. При использовании многоэлементного группирования излучателей способ обеспечивал необходимую глубину изучения верхней части разреза.

В данной статье рассмотрены результаты исследования возможности и целесообразности применения псевдослучайных кодовых функций при кодоимпульсном накапливании колебаний для решения задач

нефтегазовой сейсморазведки. Поставленная задача решалась путем сравнительного анализа корреляционных функций (ФВК), соответствующих псевдослучайным последовательностям и разверткам ЛИП.

Величина периода следования импульсов Т₁ в развертке ЛИП определяется, как известно, условием

$$T_n = T_0 - \Delta T(n-1), \tag{1}$$

где T_0 – начальный период следования импульсов; ΔT – приращение периода следования импульсов; n – номер периода следования в развертке.

Используя формулу суммы членов арифметической прогрессии для последовательности периодов T_n несложно представить функцию кода последовательности ЛИП, т. е. относительное запаздывание n -го импульса t_n в развертке.

$$t_n = nT_0 - n(n-1)\Delta T / 2.$$
 (2)

В данной формуле начальному импульсу присвоен номер «0». При этом приращение периода следования ΔT и длительность развертки T можно определить соответственно из выражений (3) и (4)

$$\Delta T = (T_0 - 1/F_{\text{max}})/(N-1), \tag{3}$$

где N – число импульсов в развертке, $F_{\rm max}$ – максимальная частота следования импульсов.

$$T = NT_0 - \left[N(N-1)\Delta T\right]/2 \tag{4}$$

Для сопоставления с псевдослучайными кодоимпульсными сигналами были использованы последовательности ЛИП с параметрами: $T_0=0,1$ с и $F_{\rm max}=30$ Гц. Число импульсов N в развертках равнялось 300 и 400. В работах [Кострыгин, 2014; Кострыгин, Колесников, 2010б, 2012] показано, что при таких параметрах и при условии формирования широкополосных импульсов, входящих в развертку, последовательности ЛИП обеспечивают качественную динамику корреляционных импульсов в полосе частот до 80-100 Гц, т. е. вполне соответствуют требованиям нефтегазовой сейсморазведки.

В качестве единичного импульса разверток был взят импульс с колокольной огибающей (5)

$$S_0(t) = [\exp(-\beta^2 t^2) \cdot \cos(2\pi f_{euo}t)].$$
 (5)

Видимая частота импульса f_{eud} равнялась 35 Гц, и соблюдалось условие $\beta / f_{eud} = 1$.

Для формирования же псевдослучайных последовательностей также использовались значения периодов следования T_n , определяемые выражением (1), однако распределенные вдоль развертки в соответствие с законом случайных чисел. Повторные значения T_n в псевдослучайных развертках были исключены. При этом по аналогии с заданными последовательностями ЛИП максимальное значение периода

следования $T_{\rm max}$ равнялось 0,1 с, а максимальная частота следования $F_{\rm max}=30\,$ Гц. Число импульсов N также как и для разверток ЛИП, равнялось 300 и 400.

Очевидно, что выбранные для сопоставления с развертками ЛИП последовательности не строго соответствуют случайным последовательностям, т. к. в данном случае были заданы вполне конкретные значения T_n , T_{\max} , F_{\max} и N. Вместе с тем выполненные расчеты показывают, что ФАК выбранных псевдослучайных кодовых функций практически не отличается от единичного импульса Кронекера (см. рис. 1). Это весьма важное обстоятельство, указывающее на то, что динамика главных максимумов корреляционных импульсов таких последовательностей может лишь весьма незначительно отличаться от динамики единичных импульсов в зарегистрированных последовательностях.

Так, на рис. 2 нормированный спектр единичных импульсов (5), входящих в кодоимпульсные последовательности, сопоставлен с нормированными спектрами главных максимумов корреляционных функций псевдослучайных разверток.

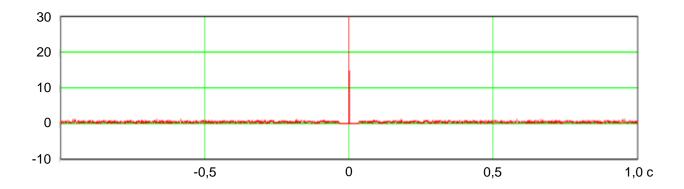


Рис. 1. ФАК функции кода псевдослучайной последовательности (N = 300)

Из рис. 2 видно, что спектры главных максимумов корреляционных функций заданных псевдослучайных последовательностей практически совпадают со спектром единичного импульса (5), используемого для построения этих последовательностей. Т. е. в результате корреляционной обработки выбранных псевдослучайных последовательностей сохраняется динамика единичных импульсов, входящих в развертку. Указанные обстоятельства свидетельствуют о принципиальной возможности применения рассматриваемых псевдослучайных последовательностей для решения задач, стоящих перед нефтегазовой сейсморазведкой. Некоторые, весьма несущественные различия сопоставляемых спектров, связаны с тем, что при спектральном анализе корреляционных импульсов окно анализа частично захватывало область существования корреляционного фона. И это приводило к незначительным искажениям спектральных характеристик.

Как уже отмечалось выше, однополярные импульсные последовательности ЛИП относятся к наиболее эффективным последовательностям для кодоимпульсного накапливания колебаний с целью решения задач нефтегазовой сейсморазведки. Поэтому, безусловно, представляется интересным сопоставление амплитудных спектров главных максимумов ФВК псевдослучайных последовательностей и последовательностей ЛИП. Спектры корреляционных импульсов таких последовательностей сопоставлены на рис. 3.

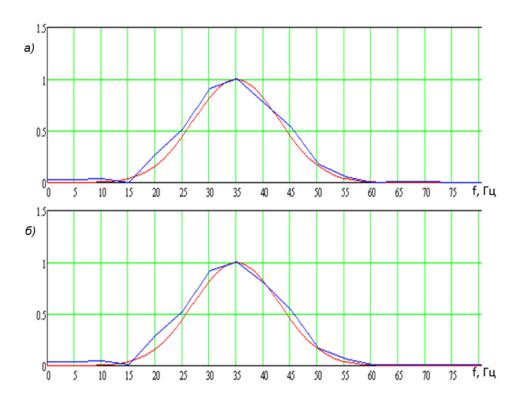


Рис. 2. Сопоставление спектра единичных импульсов, входящих в кодоимпульсные последовательности (показан красным цветом), со спектрами главных максимумов корреляционных функций псевдослучайных развёрток (показаны синим цветом): a) N = 300; б) N = 400

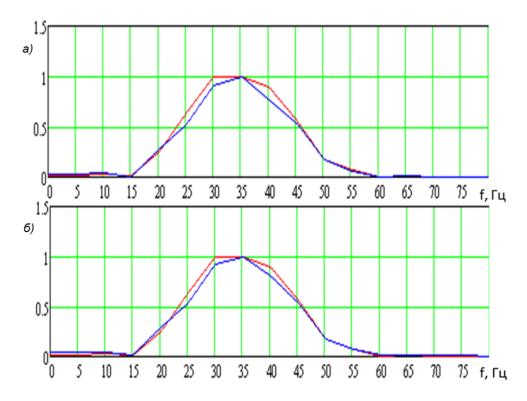


Рис. 3. Сопоставление спектров главных максимумов корреляционных функций развёрток ЛИП (показаны красным цветом) и псевдослучайных развёрток (показаны синим цветом): *a*) N = 300; *б*) N = 400

Из рис. З видно, что корреляционные импульсы заданных псевдослучайных разверток и наиболее перспективных разверток ЛИП характеризуются практически одинаковыми амплитудными спектрами, т. е. равноценной динамикой колебаний. Это обстоятельство подтверждает принципиальную возможность применения псевдослучайных разверток при использовании кодоимпульсного метода сейсморазведки для решения задач, стоящих перед нефтегазовой сейсморазведкой.

Вместе с тем при проведении сейсморазведочных работ на нефть и газ с применением сложных сигналов качество получаемых материалов в значительной степени, как известно, зависит не только от динамики корреляционных импульсов, но и от уровня помех корреляционного преобразования. С целью сопоставления интенсивности корреляционного фона, формируемого при использовании псевдослучайных последовательностей и последовательностей ЛИП, на рис. 4 приведены ФВК рассматриваемых разверток, рассчитанные до 5 секунд.

Из рис. 4 видно, что в отличие от последовательностей ЛИП псевдослучайные последовательности характеризуются существенно меньшим динамическим диапазоном корреляционного преобразования, что в значительной степени снижает целесообразность применения таких разверток для решения задач, стоящих перед нефтегазовой сейсморазведкой. Количественные значения динамического диапазона преобразования D(т) в децибелах для различных удалений от главных максимумов корреляционных функций приведены в табл. 1. Расчет значений D(т) осуществлялся с использованием общепринятой в сейсморазведке формулы (6).

$$D(\tau) = 20 \lg A_{max} / \sigma(\tau) \tag{6}$$

где A_{max} – пиковая амплитуда главного максимума ФВК; $\sigma(\tau)$ – среднеквадратичная амплитуда корреляционного фона, которая в данной работе рассчитывалась во временном окне $\approx 0.5\,$ с.

Таблица 1. Значения динамического диапазона корреляционного преобразования для различных участков ФВК сопоставляемых последовательностей

| Тип развертки | Количество импульсов в развертке | τ =1 c | 1,5 с | 2 c | 2,5 с | 3 c | 3,5 с | 4 c | 4,5 c | 5 c |
|---------------------------------------|----------------------------------|-----------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| Последовательности ЛИП | N = 300 | 48,2 | 49,5 | 49,8 | 49,4 | 49,8 | 52,3 | 48,4 | 44,7 | 41,5 |
| | N = 400 | 47,7 | 48,1 | 52,5 | 52,8 | 52,0 | 52,1 | 52,4 | 52,0 | 52,9 |
| Псевдослучайные последовательности | N = 300 | 31,2 | 32,6 | 30,6 | 30,9 | 30,9 | 30,7 | 33,3 | 33,1 | 31,7 |
| | N = 400 | 31,0 | 31,1 | 32,8 | 32,6 | 36,2 | 32,4 | 33,2 | 33,1 | 35,0 |

Из табл. 1 видно, что при $N=300\div400\,$ для большей части временного интервала ФВК уровень корреляционного фона при использовании псевдослучайной последовательности возрастает по сравнению с развертками ЛИП на $15\div20\,$ дБ.

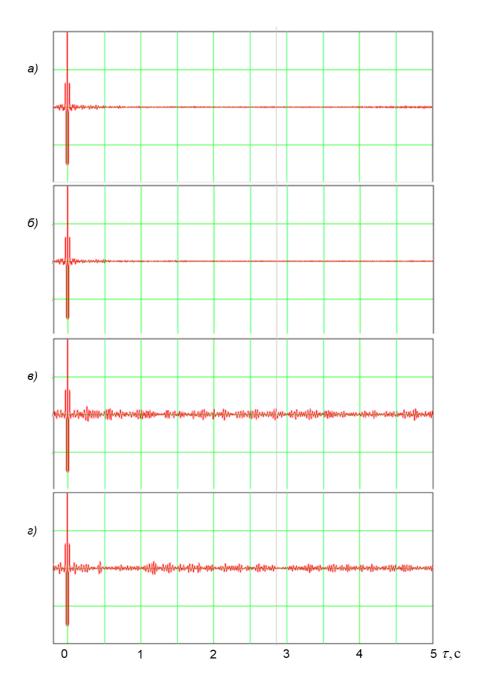


Рис. 4. Сопоставление ФВК импульсных последовательностей ЛИП и псевдослучайных последовательностей: a – последовательность ЛИП, N=300; b – ПСЕВДОСЛУЧАЙНАЯ последовательность, N = 300; b – псевдослучайная последовательность, N=400

Наряду с развертками, для которых периоды следования импульсов определялись выражением (1) и располагались в последовательности в соответствии со случайным законом, дополнительно были исследованы псевдослучайные последовательности, для которых периоды следования также изменялись от 0,1 с до (1/30) с, однако значения периодов следования не были детерминированы. ФВК таких последовательностей и значения динамического диапазона корреляционного преобразования приведены соответственно на рис. 5 и в табл. 2. Из табл. 2 следует, что для большей части временного интервала ФВК, уровень корреляционного фона при

использовании псевдослучайной последовательности с недетерминированными значениями периода следования возрастает по сравнению с развертками ЛИП на 11 ÷ 23 дБ.

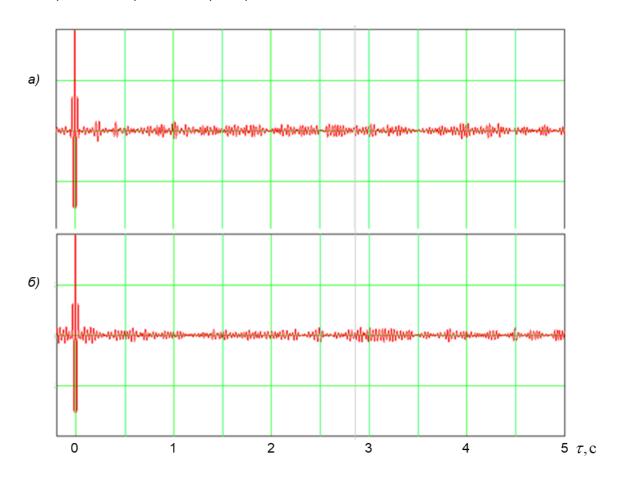


Рис. 5. ФВК псевдослучайных импульсных последовательностей с недетерминированными значениями периодов следования Tn: *a)* N=300; *б)* N=400

Таблица 2. Значения динамического диапазона корреляционного преобразования для псевдослучайных импульсных последовательностей с детерминированными и недетерминированными значениями периодов следования Tn

| Тип разверток | 1 c | 1,5 c | 2 c | 2,5 c | 3 c | 3,5 c | 4 c | 4,5 c | 5 c |
|---------------------------------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| N=300, Tn не детерминированы | 30.0 | 31.4 | 31.3 | 30.1 | 31.5 | 34.4 | 30.0 | 33.4 | 32.9 |
| N=400, Tn не детерминированы | 35.0 | 33.7 | 32.2 | 32.9 | 28.4 | 33.2 | 32.7 | 32.4 | 31.9 |
| N=300, Tn детерминированы | 31,2 | 32,6 | 30,6 | 30,9 | 30,9 | 30,7 | 33,3 | 33,1 | 31,7 |
| N=400, Tn детерминированы | 31,0 | 31,1 | 32,8 | 32,6 | 36,2 | 32,4 | 33,2 | 33,1 | 35,0 |

Таким образом, при решении задач нефтегазовой сейсморазведки, безусловно, существует принципиальная возможность кодоимпульсного накапливания сейсмических колебаний с использованием псевдослучайных кодовых функций. Однако импульсные последовательности при реализации такой технологии отличаются повышенным корреляционным фоном, вследствие чего применение псевдослучайных кодовых функций становится не целесообразным.

Следует отметить, что высокоамплитудным корреляционным фоном характеризуются не только кодоимпульсные псевдослучайные сигналы, но и любые другие псевдослучайные сложные сигналы. Так, современные системы управления вибросейсмических комплексов обеспечивают возможность применения сигналов, получивших название **random**, т. е. квазигармонических сигналов, у которых мгновенная частота развертки меняется случайным образом в заданной полосе частот. Такие сигналы отличаются повышенной скоростью изменения частоты в развертке, и поэтому элементы конструкций зданий и сооружений, находящихся в непосредственной близости от пунктов возбуждения, не успевают войти в резонанс, что позволяет существенно снизить опасность их разрушения. Однако, несмотря на очевидные преимущества сигнала типа **random**, он отличается чрезвычайно высоким уровнем корреляционного фона и поэтому при проведении вибросейсмических наблюдений практически не используется [Кострыгин, 2014].

На рис. 6 приведены амплитудные спектры ФАК (а), корреляционные импульсы (б), а также графики динамического диапазона корреляционного преобразования (в), рассчитанные для вибросейсмического ЛЧМ-сигнала с частотным диапазоном △F = 10-70 Гц (1) и псевдослучайного сигнала типа random (2). Предварительно перед вычислением представленных статистических характеристик псевдослучайный сигнал был отфильтрован полосовым фильтром с полосой пропускания 10-70 Гц. Из рис. 6 можно видеть, что главные максимумы корреляционных импульсов сопоставляемых сигналов практически не отличаются друг от друга. Именно это обстоятельство и определяет принципиальную возможность использования псевдослучайных сигналов для вибросейсмической разведки. Вместе с тем корреляционные функции псевдослучайных сигналов характеризуются повышенной дисперсией значений амплитудных спектров и чрезвычайно малым динамическим диапазоном корреляционного преобразования, равным 18-24 дБ. Указанное обстоятельство в большинстве случаев исключает возможность применения таких управляющих сигналов для практического использования с целью проведения вибросейсмических наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1. Спектры главных максимумов корреляционных функций псевдослучайных импульсных последовательностей практически совпадают со спектрами единичных импульсов, используемых для построения этих последовательностей. Указанное обстоятельство свидетельствует о принципиальной возможности применения псевдослучайных последовательностей для решения задач, стоящих перед нефтегазовой сейсморазведкой
- 2. Однако псевдослучайные импульсные последовательности характеризуются повышенным уровнем помех корреляционного преобразования, вследствие чего применение псевдослучайных кодовых функций при проведении сейсмических наблюдений на нефть и газ становится не целесообразным.

3. Высокоамплитудным корреляционным фоном характеризуются не только псевдослучайные кодоимпульсные сигналы, но и псевдослучайные квазигармонические сигналы, например, типа random, предусмотренные в системах управления вибросейсмических комплексов и характеризующиеся случайным законом изменения мгновенной частоты развертки.

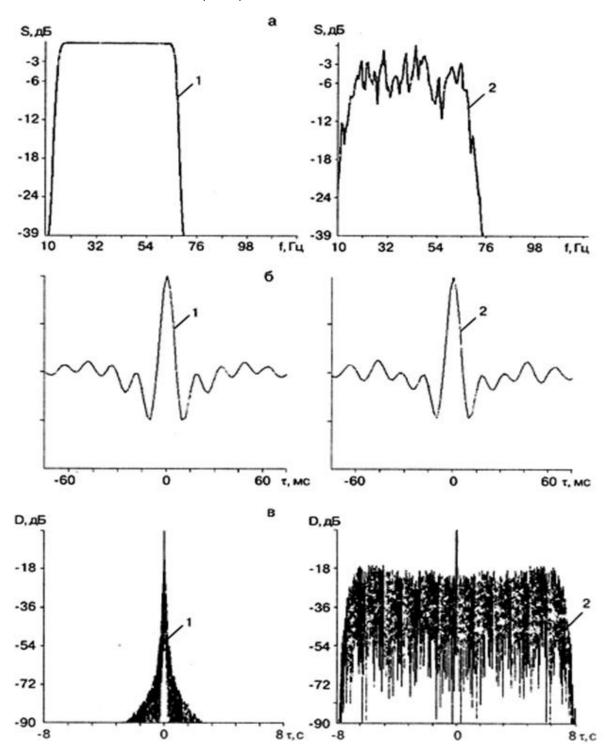


Рис. 6. Результаты анализа ФАК ЛЧМ-сигнала (1) и квазигармонического сигнала типа random (2): *a* – амплитудные спектры; *б* – главные максимумы ФАК; *в* – графики динамического диапазона корреляционного преобразования

ЛИТЕРАТУРА

Кострыгин Ю.П. Вибросейсмический и кодоимпульсный методы сейсмической разведки. – Краснодар: Просвещение-Юг, 2014. – 494 с.

Кострыгин Ю.П., Колесников Д.А. Исследование возможностей кодоимпульсного метода сейсмической разведки. Часть 1 // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2012. – № 3. – С. 73–79.

Кострыгин Ю.П., Колесников Д.А. Исследование возможностей кодоимпульсного метода сейсмической разведки. Часть 2 // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2012. – № 4. – С. 57–67.

Кострыгин Ю.П., Колесников Д.А. Методические возможности ослабления корреляционного фона при кодоимпульсном накапливании колебаний с использованием однополярных кодов // Технологии сейсморазведки. – 2011. – № 1. – С. 52–58.

Кострыгин Ю.П., Колесников Д.А. Оценка влияния амплитудной неидентичности импульсов в развертках на эффективность кодоимпульсного накапливания сейсмических колебаний // Технологии сейсморазведки. – 2011. – № 2. – С. 97–108.

Кострыгин Ю.П., Колесников Д.А. Оценка возможности повышения эффективности кодоимпульсного накапливания сейсмических колебаний с использованием однополярных кодов ЛИЧ путем увеличения длительности и максимальной частоты разверток // Технологии сейсморазведки. — 2010. — № 3. — С. 110—114.

Кострыгин Ю.П., Колесников Д.А. Сравнительный анализ эффективности кодоимпульсного накапливания сейсмических колебаний при использовании однополярных кодов ЛИЧ и ЛИП // Технологии сейсморазведки. – 2010. – № 4. – С. 46–52.

Кострыгин Ю.П., Удалый М.Н. Исследование возможности и целесообразности применения кодоимпульсного метода для инженерной сейсморазведки // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2013. – № 3. – С. 84–96.

Лукашин Ю.П., Гродзянская Т.М., Пушкин А.Г. Способ сейсмической разведки: патент СССР № 545946, 05.02.1977.

Шайдуров Г.Я., Воронцов Ю.С., Кудинов Д.С., Щитников А.А., Копылов М.А. К обоснованию создания кодоимпульсного источника сейсмических волн // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2013. – № 3. – С. 97–101.

Шнеерсон М.Б., Майоров В.В. Наземная невзрывная сейсморазведка. – М., Недра, 1988. – 237 с.

Шнеерсон М.Б., Потапов О.А., Гродзенский В.А., Иноземцев А.Н., Лев И.С., Жуков А.П. Вибрационная сейсморазведка. – М.: Недра, 1990. – 240 с.

Wiles C.J. MINI – SOSIE: New concept in high resolutions seismic surveys // Oil and Gas J. –1979. – Vol. 77, No. 11. – P. 94–97.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ХАСАН Ресуль Енес – студент магистратуры Кубанского государственного университета. Область научных интересов: поиски полезных ископаемых с использованием невзрывных методов сейсмической разведки.

КОСТРЫГИН Юрий Петрович — доктор технических наук, профессор Кубанского государственного университета, директор ООО «Новоросморгео». Область научных интересов: сейсморазведка с использованием сложных сигналов.