



МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОСЛАБЛЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ФОНА ПРИ КОДОИМПУЛЬСНОМ НАКАПЛИВАНИИ КОЛЕБАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОПОЛЯРНЫХ КОДОВ

Ю.П. Кострыгин, Д.А. Колесников

ООО “Новоросморгео”, просп. Чекистов, 16, офис 237, Краснодар, 350089, Россия,
e-mail: Kostr_p@mail.ru, spirit_defh@mail.ru

Рассмотрены возможности ослабления корреляционного фона при кодоимпульсном накоплении колебаний с использованием однополярных кодов путем огибания импульсных последовательностей и реализации технологии комбинированных сигналов. Показано, что в результате совместного применения для наиболее эффективных кодоимпульсных сигналов ЛИЧ скосов и комбинированных разверток динамический диапазон корреляционного преобразования во временном окне $\tau = 0,5-5,0$ с достигает в среднем 57 дБ при значении видимой частоты единичных импульсов $f_{\text{вид}} = 55$ Гц и 47,1 дБ при $f_{\text{вид}} = 35$ Гц. Для наиболее эффективных последовательностей ЛИП среднее значение динамического диапазона преобразования в интервале $\tau = 0,5-4,0$ с составляет 53,8–59,7 дБ в зависимости от преобладающей частоты импульсов в развертке и числа сегментов в комбинированном сигнале.

Однополярные коды, корреляционный фон, скосы, комбинированные развертки

METHODICAL POSSIBILITIES OF ATTENUATION OF CORRELATION BACKGROUND DURING CODE PULSE ACCUMULATION OF VIBRATIONS WHILE SINGLE-PHASE CODES

Yu.P. Kostrygin, D.A. Kolesnikov

“Novorosmorgeo” Ltd., Chekistov av., 16, office 237, Krasnodar, 350089, Russia,
e-mail: Kostr_p@mail.ru, spirit_defh@mail.ru

In this article we study possibility to attenuate correlation background at code pulse seismic vibrations accumulation single-phase codes by means of pulse pattern enveloping and realization of combined signals technology. It is shown that as the result of joint application of most efficient code pulse signals of linearly varying period ramp and combined scannings, volume range of correlative transformation in the time window $\tau = 0,5-5,0$ s reaches 57 dB on average at the value of visible frequency of specific impulses of $f_v = 55$ Hz and 47,1 dB at $f_v = 35$ Hz. For the most efficient linearly varying period sequences the average value of dynamic transformation range in $\tau = 0,5-4,0$ s interval reaches 53,8–59,7 dB depending on the prevailing frequency of impulses in the scanning and the number of segments in the combines signal.

Single-phase codes, correlation background, combined scannings, pattern enveloping

ВВЕДЕНИЕ

Наряду с вибросейсмическим методом, значительный практический интерес представляет метод, основанный на использовании сложных кодоимпульсных (виброимпульсных) сигналов [1]. Так же, как и вибросейсмический метод, кодоимпульсный метод характеризуется повышенной помехоустойчивостью по отношению к некогерентным помехам. Вместе с тем излучатели, формирующие импульсные последовательности, отличаются по сравнению с сейсмическими вибраторами более простой конструкцией и существенно меньшей себестоимостью. Весьма успешно в течение длительного времени кодоимпульсный метод применялся в Костромской геофизической экспедиции ПГО “Центргеофизика”, а также в ряде геофизических предприятий Украины. Однако в связи с распадом Советского Союза завод-изготовитель серийных кодоимпульсных излучателей ИКИ-10/40 оказался за пределами России, и сейсмические наблюдения с использованием технологии кодоимпульс-

ного накопления колебаний были практически прекращены.

В настоящее время себестоимость серийных гидравлических вибраторов, применяемых для возбуждения квазигармонических колебаний, достигает 500–700 тыс. долл. и более, что обуславливает для многих геофизических предприятий серьезные экономические проблемы. По этой причине интерес к кодоимпульсному методу сейсмической разведки среди геофизиков-производственников существенно повысился, в связи с чем возникла необходимость более детального обсуждения вопросов, касающихся исследования и внедрения данного способа в производство.

При проведении сейсмических наблюдений с использованием кодоимпульсного способа в основном применялись однополярные импульсные последовательности с линейным изменением частоты следования импульсов (коды ЛИЧ). Временное положение

n -го импульса в развертках ЛИЧ, характеризующихся возрастанием частоты следования импульсов, определяется из выражения [1, 2]

$$t_n = (T/\Delta F) \left(\sqrt{F_n^2 + 2n\Delta F/T} - F_n \right), \quad (1)$$

где t_n – временное положение n -го импульса в развертке (начальному импульсу присвоен номер “0”); T – длительность развертки; F_n – начальная частота в развертке; ΔF – ширина частотного диапазона развертки.

Наряду с кодами ЛИЧ значительный интерес при кодоимпульсном накапливании сейсмических колебаний представляют однополярные коды с линейным изменением периода следования импульсов (коды ЛИП) [2]. Такие коды выгодно отличаются от кодов ЛИЧ более равномерным распределением помех корреляционного преобразования и отсутствием интервалов с аномально высокими значениями корреляционного фона, либо их значительным смещением на 1–1,5 с в область больших времен [1]. Временное положение n -го импульса в развертках ЛИП определяется из выражения

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

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

В работе [2] показано, что при кодоимпульсном накапливании колебаний с использованием однополярных кодов ЛИЧ наиболее эффективные для нефтегазовой сейсморазведки импульсные последовательности формируются при $F_{\max} \approx 80$ Гц и $T = 20$ –30 с, где F_{\max} и T – максимальная частота следования импульсов и длительность разверток соответственно. При использовании однополярных кодов с линейным изменением периода следования импульсов (коды ЛИП) наиболее эффективные последовательности формируются при $F_{\max} = 30$ –40 Гц и $T = 20$ –30 с. Реализация указанных режимов создает принципиальные возможности для повышения временной разрешающей способности кодоимпульсного метода до уровня разрешающей способности вибросейсмического метода [2]. В этом случае форма главных максимумов ФВК последовательностей ЛИЧ и ЛИП практически не отличается от собственного процесса совокупной колебательной системы “излучатель–грунт” и геологической среды. Вместе с тем, как показано в работе [2], даже наиболее эффективные последовательности ЛИЧ и ЛИП характеризуются во временном интервале $\tau = 1$ –4 с динамическим диапазоном корреляционного преобразования, равным 42,4–56 дБ, что меньше динамического диапазона преобразования для вибросейсмических ЛЧМ-сигналов, рассчитанных с учетом частотных искажений в реальных геологических средах [1]. Такие особенности однополярных кодоимпульсных сигналов могут приводить к снижению эффективности кодоимпульсного метода по сравнению с эффективностью вибросейсмического метода в условиях, характеризующихся повышенным динамическим диапазоном сейсмических записей.

В настоящей работе рассмотрены методические приемы, позволяющие дополнительно ослабить для однополярных импульсных последовательностей уровень корреляционного фона и приблизить, таким образом, кодоимпульсный метод по своим возможностям к вибросейсмическому методу.

В вибросейсмической разведке уменьшение интенсивности помех корреляционного преобразования достигается, как известно, путем применения управляющих сигналов с плавно возрастающими в начале и убывающими в конце развертки амплитудами. Интервал времени изменения амплитудных значений сигнала в краевых частях развертки называется конусностью или временем скоса $t_{\text{ск}}$. По аналогии с вибросейсмическим методом, нами сделана оценка возможности ослабления корреляционного фона при кодоимпульсном накапливании колебаний путем задания конусности по краям функции кода последовательностей. Закон изменения амплитуды в краевых частях кодоимпульсного сигнала задавался с использованием трапецеидальной (линейной) и косинусоидальной функций. Результаты проведенного моделирования свидетельствуют о том, что косинусоидальное огибание импульсных последовательностей не является более эффективным для подавления корреляционного фона по сравнению с трапецеидальным огибанием. Поэтому приводятся оценки влияния на корреляционную функцию кодоимпульсных сигналов лишь трапецеидальных скосов.

Трапецеидальное огибание краевых частей функции кода можно задать следующим образом:

$$A_{\text{ск}}(t) = \begin{cases} (A_0/t_{\text{ск}})t & \text{при } 0 \leq t \leq t_{\text{ск}}, \\ A_0 - [t - (T - t_{\text{ск}})]A_0/t_{\text{ск}} & \text{при } T - t_{\text{ск}} \leq t \leq T, \end{cases} \quad (3)$$

где A_0 – амплитуда кодоимпульсного сигнала за пределами скосов.

При моделировании длительность разверток T принималась равной 20 с, времена скоса $t_{\text{ск}}$ изменялись от 1 до 6 с, т. е. в процентном выражении от 5 до 30 % длительности T . Кодоимпульсные последовательности были составлены из импульсов с колокольной огибающей; при этом соблюдалось условие $\beta/f_{\text{вид}} = 1$, где β – коэффициент затухания импульса; $f_{\text{вид}}$ – видимая частота импульса. Временное сжатие импульсных последовательностей $X(t)$ осуществлялось путем корреляционной свертки $X(t)K(-t)$, где $K(t)$ – функция кода последовательности.

Анализ корреляционных функций импульсных последовательностей осуществлялся путем вычисления динамического диапазона корреляционного преобразования $D(\tau)$ и амплитудного спектра главного максимума ФВК в окне ≈ 200 мс. Динамический диапазон преобразования рассчитывался по формуле

$$D(\tau) = 20 \lg A_{\max}/\sigma(\tau), \quad (4)$$

где A_{\max} – пиковая амплитуда главного максимума ФВК; $\sigma(\tau)$ – среднеквадратичная амплитуда корреляционного фона во временном окне 0,5 с.

Значения эффективной длительности корреляционных импульсов $\tau_{\text{эф}}$ определялись как отрезки ФВК, в которых сосредоточено 85 % энергии корреляционной функции, рассчитанной в интервале $-2 \text{ с} \leq \tau \leq +2 \text{ с}$. Эффективная ширина спектров $\Delta f_{\text{эф}}$ ФВК вычислялась как среднее арифметическое ширины спектров на уровне 0,7; 0,5 и 0,3.

На основании выполненных исследований показано, что для наиболее эффективных кодов ЛИП ($F_{\max} = 30$ –40 Гц) огибание краевых частей импульсных последовательностей приводит лишь к ухудшению качества коррелограмм. Так, на рис. 1 приведены амплитудный спектр главного максимума ФВК (1) и главный максимум ФВК (2), рассчитанные для функ-

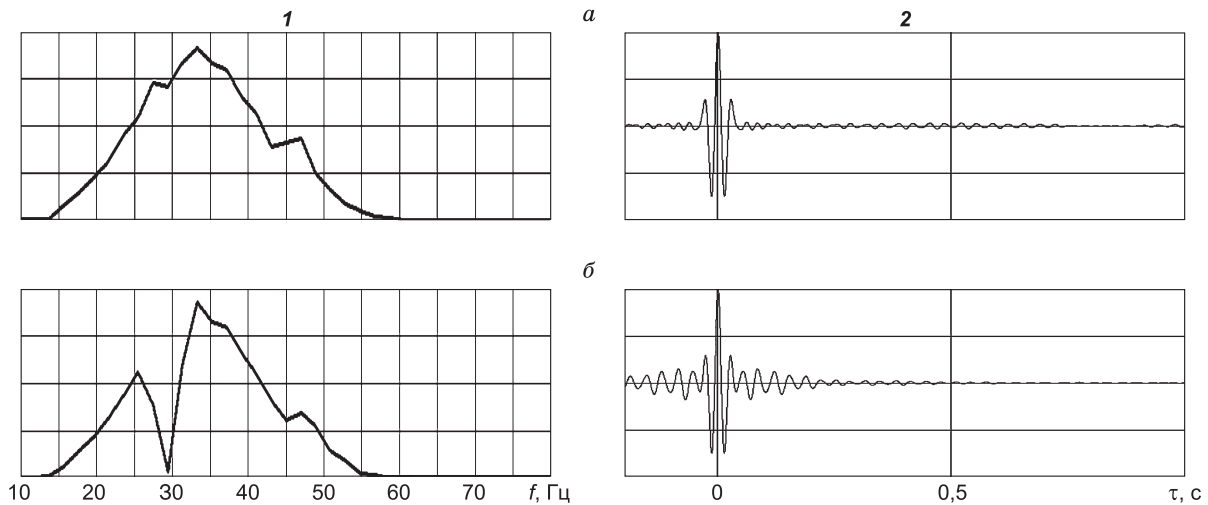


Рис. 1. Амплитудный спектр главного максимума ФВК (1) и главный максимум ФВК (2), рассчитанные для функции кода ЛИП без применения скосов и при конусности $t_{\text{СК}} = 2$ с ($T = 20$ с, $F_{\text{max}} = 30$ Гц, $f_{\text{вид}} = 35$ Гц, $N = 401$):

a – без скосов; *б* – использован скос, $t_{\text{СК}} = 2$ с.

ции кода ЛИП без применения скосов (*a*) и при конусности $t_{\text{СК}} = 2$ с (*б*). Видимая частота импульсов в последовательности $f_{\text{вид}}$ равнялась 35 Гц, $F_{\text{max}} = 30$ Гц, число импульсов в развертке $N = 401$.

Из рис. 1 видно, что вследствие огибания функции кода ЛИП в спектре главного максимума ФВК последовательности возникает достаточно глубокий провал, обуславливающий, в свою очередь, существенное увеличение эффективной длительности корреляционного импульса. Физически указанное обстоятельство связано с тем, что в данном случае часть спектра, расположенная левее 30 Гц, формируется за счет основных гармоник функции кода, в то время как более высокочастотная часть спектра, соответствующая интервалу 30–60 Гц, обязана вторым гармоникам функции кода. Таким образом, диапазон частот, соответствующий правому скосу, расположен внутри полосы частот спектра ФВК, что и обуславливает в данном случае появление провала в области ≈ 30 Гц.

Исследования показали, что в отличие от эффективных кодов ЛИП ($F_{\text{max}} = 30\text{--}40$ Гц) огибание эффективных кодоимпульсных последовательностей ЛИЧ ($F_{\text{max}} = 80$ Гц, $T = 20\text{--}30$ с) позволяет несколько ослабить интенсивность корреляционного фона. Так, в табл. 1 приведены значения динамического диапазона корреляционного преобразования $D(\tau)$, рассчитанные для эффективных последовательностей ЛИЧ без применения скосов и при различных значениях конусности $t_{\text{СК}}$. Минимальная и максимальная

частоты разверток ЛИЧ равнялись соответственно $F_{\text{min}} = 10$ Гц и $F_{\text{max}} = 80$ Гц, длительность разверток $T = 20$ с, видимая частота импульсов $f_{\text{вид}} = 55$ Гц.

Из табл. 1 следует, что для кодоимпульсных разверток ЛИЧ по мере увеличения конусности наблюдается некоторое увеличение динамического диапазона преобразования и, соответственно, снижение уровня корреляционного фона. Так, при $t_{\text{СК}} = 6$ с по сравнению с сигналами без огибания, корреляционный фон для импульсных последовательностей ЛИЧ уменьшается на $\approx 3,5\text{--}5,5$ дБ. Вместе с тем по мере увеличения скоса естественно ожидать некоторое ухудшение динамики корреляционных импульсов.

Для оценки искажений корреляционных функций, возникающих вследствие огибания последовательностей ЛИЧ, на рис. 2 приведены амплитудные спектры главного максимума ФВК (1) и главные максимумы ФВК (2), рассчитанные при значениях скоса $t_{\text{СК}}$, равных 0, 1, 2, 3, 4, 5 и 6 с. Здесь же приведены соответствующие им значения эффективной ширины спектра $\Delta f_{\text{эф}}$ и эффективной длительности корреляционных импульсов $\tau_{\text{эф}}$.

Из рис. 2 следует, что при изменении $t_{\text{СК}}$ от 0 до 6 с эффективная ширина спектра главного максимума ФВК достаточно плавно уменьшается от 28,5 до 19,5 Гц, а эффективная длительность главного максимума ФВК увеличивается от 31,5 до 36,5 мс. В общем случае допустимые значения $t_{\text{СК}}$ следует, по-видимому, определять исходя из конкретных решаемых геологических задач. При реализации стандартных моди-

Таблица 1

Значения динамического диапазона корреляционного преобразования импульсных последовательностей в децибеллах на временах, кратных 0,5 с

$t_{\text{СК}}, \text{с}$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
0	51,4	50,8	49,0	50,1	44,7	44,7	47,6	47,3	48,6	46,4
1	54,3	52,2	48,8	50,8	44,5	43,7	47,7	47,2	49,0	47,3
2	54,5	53,3	50,1	52,3	44,5	43,4	47,6	49,6	50,1	47,5
3	54,7	54,1	51,8	53,2	46,1	43,2	47,2	50,9	52,3	49,3
4	55,4	54,7	53,1	53,6	47,6	44,4	46,9	51,4	53,4	50,6
5	55,3	55,1	53,7	53,7	48,7	45,5	47,6	51,6	54,0	51,5
6	55,8	55,2	53,7	53,6	49,9	46,2	48,0	52,1	54,2	51,9

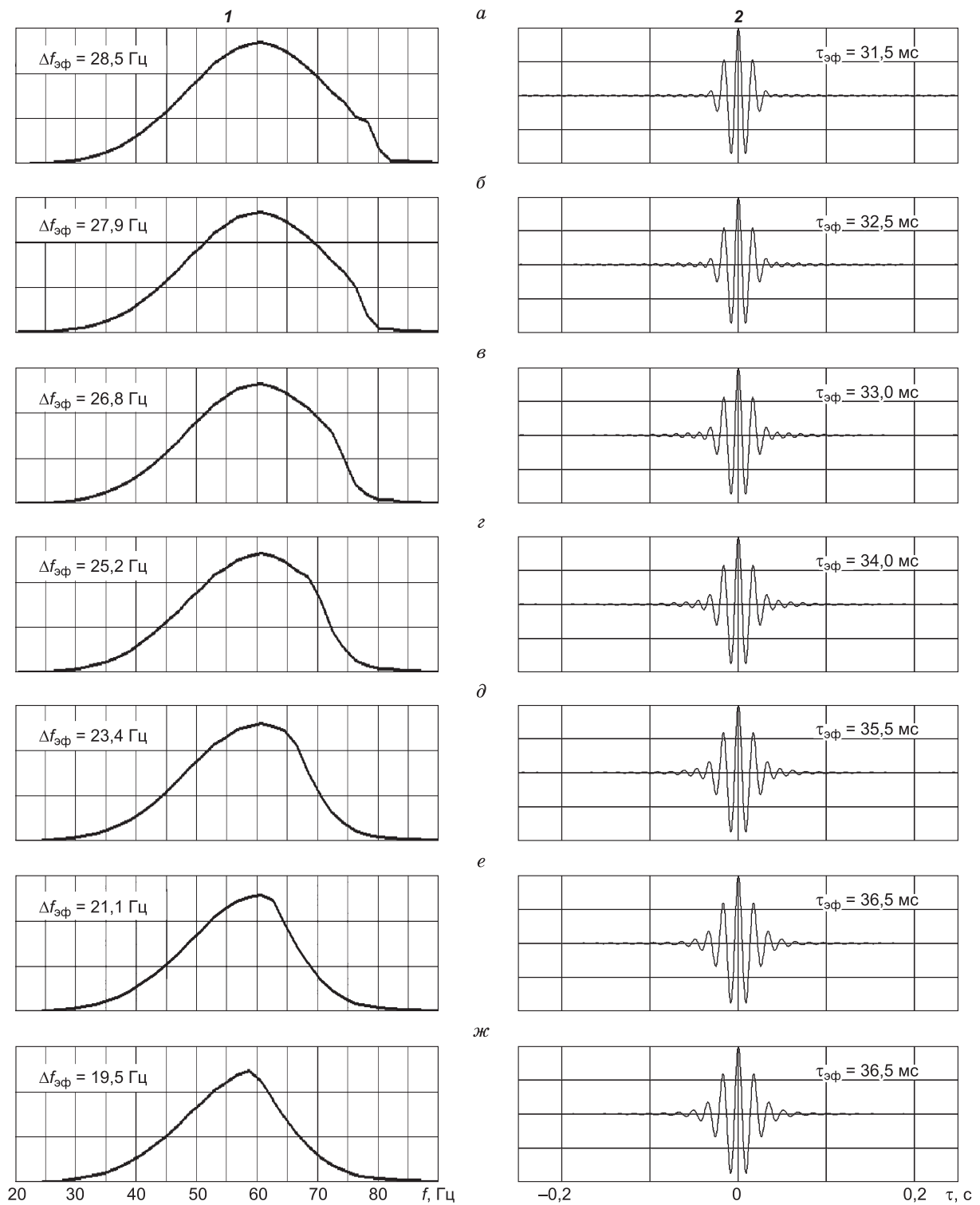


Рис. 2. Амплитудные спектры главных максимумов ФВК (1) и главные максимумы ФВК (2), рассчитанные для импульсных последовательностей ЛИЧ при различных значениях скоса $t_{ск}$ ($F_{min} = 10$ Гц, $F_{max} = 80$ Гц, $T = 20$ с, $f_{вид} = 55$ Гц):
 а – $t_{ск} = 0$ с; б – 1 с; в – 2 с; г – 3 с; д – 4 с; е – 5 с; ж – 6 с.

фикаций сейсмических исследований наиболее сложно и принципиально важно обеспечить достаточно высокие значения спектральной плотности колебаний в области верхних частот. В частотном диапазоне 70–75 Гц значения спектральной плотности остаются практически без изменения при увеличении $t_{ск}$ от 0 до 2 с, т. е. до 10 % от T , и заметно уменьшаются при дальнейшем росте $t_{ск}$ (см. рис. 2). Поэтому время скаса для импульсных последовательностей ЛИЧ в основном, по-видимому, не должно превышать 10 % от длительности кодоимпульсной развертки.

При таких параметрах скаса помехи преобразования кодоимпульсных сигналов ЛИЧ так же, как и при огибании вибросейсмических сигналов, в большей степени ослабляются в ближней зоне ФВК, на временах $\tau \leq 1$ с. Величина ослабления помех в этой области ФВК достигает 2,56–3,11 дБ при $t_{ск} = 0,1T$ (см. табл. 1). Иными словами, эффективность применения скасов для кодоимпульсных последовательностей ЛИЧ существенно уступает эффективности применения скасов для вибросейсмических разверток. Поэтому огибание кодоимпульсных сигналов ЛИЧ целесообразно осуществлять исключительно в комплексе с другими методическими приемами, позволяющими дополнительно уменьшить уровень корреляционного фона.

К таким методическим приемам, в первую очередь, относится способ комбинированных сигналов, предполагающий возбуждение на каждом пикете нескольких кодоимпульсных разверток ЛИЧ с различными параметрами, и суммирование коррелограмм, соответствующих одноименным пунктам возбуждения [3]. Такой способ является аналогом способа комбинированных вибросейсмических сигналов, легко реализуется при проведении полевых сейсморазведочных работ и позволяет дополнительно уменьшить влияние корреляционного фона.

По результатам модельных исследований выполнена оценка возможности повышения динамического диапазона корреляционного преобразования однополярных кодоимпульсных сигналов ЛИЧ путем использования комбинированных разверток. Комбини-

рованные развертки состояли из четырех и восьми сегментов с различными значениями F_{min} . Остальные параметры последовательностей, входящих в комбинированные развертки, оставались без изменения: $T = 20$ с; $F_{max} = 80$ Гц; $t_{ск} = 0,1T$. При моделировании значения видимой частоты импульсов $f_{вид}$ принимались равными 35 и 55 Гц. Опробованы следующие варианты разверток ЛИЧ, используемых для формирования комбинированных сигналов:

- 1 – $F_{min 1} = 10$ Гц, $F_{min 2} = 11$ Гц, $F_{min 3} = 12$ Гц, $F_{min 4} = 13$ Гц;
- 2 – $F_{min 1} = 10$ Гц, $F_{min 2} = 12$ Гц, $F_{min 3} = 14$ Гц, $F_{min 4} = 16$ Гц;
- 3 – $F_{min 1} = 10$ Гц, $F_{min 2} = 11$ Гц, $F_{min 3} = 12$ Гц, $F_{min 4} = 13$ Гц, $F_{min 5} = 14$ Гц, $F_{min 6} = 15$ Гц, $F_{min 7} = 16$ Гц, $F_{min 8} = 17$ Гц;
- 4 – $F_{min 1} = 10$ Гц, $F_{min 2} = 12$ Гц, $F_{min 3} = 14$ Гц, $F_{min 4} = 16$ Гц, $F_{min 5} = 18$ Гц, $F_{min 6} = 20$ Гц, $F_{min 7} = 22$ Гц, $F_{min 8} = 24$ Гц.

Расчетные значения динамического диапазона корреляционного преобразования для одиночных последовательностей ЛИЧ и соответствующих комбинированных разверток приведены в табл. 2. При этом очевидно, что более значительное увеличение динамического диапазона корреляционного преобразования наблюдается для последовательностей, составленных из более высокочастотных единичных импульсов. Так, по сравнению с одиночными последовательностями ЛИЧ при $f_{вид} = 55$ Гц применение комбинированных разверток, состоящих из четырех сегментов, при дискретности изменения F_{min} , равной 2 Гц, позволяет ослабить корреляционный фон на 7,1 дБ при $\tau = 1,5$ с, на 4,6 дБ при $\tau = 2,0$ с и на ≈ 10 дБ при $\tau = 2,5–5,0$ с. Дальнейшее увеличение числа сегментов в комбинированном сигнале до восьми не способствует снижению уровня помех преобразования.

Для разверток ЛИЧ, состоящих из более низкочастотных импульсов с видимой частотой $f_{вид} = 35$ Гц, эффект от применения комбинированных сигналов в

Таблица 2

Значения динамического диапазона корреляционного преобразования в децибеллах на временах, кратных 0,5 с для одиночных и комбинированных кодоимпульсных сигналов ЛИЧ ($T = 20$ с, $F_{max} = 80$ Гц; $t_{ск} = 0,1T$)

$f_{вид}$, Гц	Параметры разверток	0,5 с	1,0 с	1,5 с	2,0 с	2,5 с	3,0 с	3,5 с	4,0 с	4,5 с	5,0 с
35	Одиночная развертка, $F_{min} = 10$ Гц	47,3	47,8	47,7	44,4	46,7	49,2	47,9	41,6	35,2	30,8
	Комбинированная развертка: $F_{min} = 10, 11, 12$ и 13 Гц	47,5	47,8	48,1	47,2	48,2	49,1	49,1	46,4	40,4	36,0
	То же, $F_{min} = 10, 12, 14$ и 16 Гц	47,0	47,1	47,3	47,6	47,9	48,4	48,7	48,1	45,6	43,1
	То же, $F_{min} = 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16$ и 17 Гц	46,8	47,0	47,3	47,3	47,8	48,3	48,7	48,2	45,0	40,7
	То же, $F_{min} = 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22$ и 24 Гц	45,3	45,4	45,8	46,0	46,3	46,8	47,1	47,3	46,8	45,9
55	Одиночная развертка, $F_{min} = 10$ Гц	54,5	53,3	50,1	52,3	44,5	43,4	47,6	49,6	50,1	47,5
	Комбинированная развертка: $F_{min} = 10, 11, 12$ и 13 Гц	57,0	58,0	55,0	56,7	49,2	47,2	52,5	57,0	57,5	55,2
	То же, $F_{min} = 10, 12, 14$ и 16 Гц	56,4	57,0	57,2	56,8	55,0	54,2	56,5	58,7	59,0	59,0
	То же, $F_{min} = 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16$ и 17 Гц	58,0	57,9	57,4	57,7	53,2	50,7	54,1	58,4	59,2	58,5
	То же, $F_{min} = 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22$ и 24 Гц	56,9	57,1	57,3	57,3	56,7	55,6	57,0	58,2	58,9	59,3

Значения динамического диапазона преобразования в децибеллах на временах, кратных 0,5 с для одиночных и комбинированных кодоимпульсных сигналов ЛИП ($F_{\max} = 30$ Гц; $t_{\text{СК}} = 0$)

$f_{\text{вид}}$	Параметры разверток	0,5 с	1,0 с	1,5 с	2,0 с	2,5 с	3,0 с	3,5 с	4,0 с	4,5 с	5,0 с
35 Гц	Одиночная развертка, $T = 20$ с	35,8	45,1	46,0	49,1	50,5	51,5	52,0	51,9	53,8	54,4
	Комбинированная развертка: $T_{1-4} = 20$ с, 21 с, 22 с, 23 с	39,1	48,6	55,5	56,0	57,2	56,2	58,1	59,7	59,0	60,7
	То же, $T_{1-8} = 20$ с, 21 с, 22 с, 23 с, 24 с, 25 с, 26 с, 27 с	42,3	54,0	58,8	58,4	59,8	59,5	61,3	61,6	060,8	63,0
55 Гц	Одиночная развертка, $T = 20$ с	42,0	50,0	53,0	53,6	52,5	55,8	53,8	54,3	55,3	56,6
	Комбинированная развертка: $T_{1-4} = 20$ с, 21 с, 22 с, 23 с	47,7	55,7	59,2	60,3	59,9	58,6	060,5	060,2	60,1	056,8
	То же, $T_{1-8} = 20$ с, 21 с, 22 с, 23 с, 24 с, 25 с, 26 с, 27 с	51,2	59,8	61,3	62,3	62,3	62,6	61,5	56,6	51,4	47,8

основном наблюдается в дальней зоне корреляционной функции, на временах $\tau \geq 4$ с. Так, по сравнению с одиночными последовательностями ЛИЧ при $f_{\text{вид}} = 35$ Гц применение комбинированных разверток, состоящих из четырех сегментов, при дискретности изменения F_{\min} , равной 2 Гц, позволяет ослабить корреляционный фон на 6,5 дБ при $\tau = 4,0$ с, на 10,4 дБ при $\tau = 4,5$ с и на 12,3 дБ при $\tau = 5,0$ с.

При проведении исследований оценивалась также эффективность комбинированных кодоимпульсных сигналов ЛИЧ, состоящих из четырех и восьми сегментов, отличающихся длительностями разверток T . Остальные параметры разверток, входящих в комбинированные сигналы, оставались без изменения: $F_{\min} = 10$ Гц, $F_{\max} = 80$ Гц; $t_{\text{СК}} = 0,1 T$.

Опробованы следующие варианты разверток ЛИЧ, используемых для формирования комбинированных сигналов:

- 1 – $T_1 = 20$ с; $T_2 = 21$ с; $T_3 = 22$ с; $T_4 = 23$ с;
- 2 – $T_1 = 20$ с; $T_2 = 21$ с; $T_3 = 22$ с; $T_4 = 23$ с;
 $T_5 = 24$ с; $T_6 = 25$ с; $T_7 = 26$ с; $T_8 = 27$ с.

По результатам выполненного моделирования показано, что комбинированные кодоимпульсные сигналы ЛИЧ, состоящие из четырех–восми сегментов с различными значениями T , не обеспечивают повышение качества коррелограмм по сравнению с комбинированными развертками, состоящими из четырех сегментов с различными значениями параметров F_{\min} . Более того, при использовании таких разверток наблюдается заметное уменьшение динамического диапазона корреляционного преобразования в интервале $\tau = 2,5$ – $5,0$ с, что не позволяет рекомендовать их к практическому применению.

Выполнена также оценка целесообразности применения комбинированных кодоимпульсных сигналов ЛИЧ, в которых одновременно изменялись бы значения F_{\min} и T . Для этого проведен анализ комбинированного сигнала, состоящего из восьми сегментов со следующими параметрами:

$$\begin{aligned} T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = 20 \text{ с}; T_5 = T_6 = T_7 = T_8 = 30 \text{ с}; \\ \Delta F_1 = \Delta F_5 = 10\text{--}80 \text{ Гц}; \Delta F_2 = \Delta F_6 = 12\text{--}80 \text{ Гц}; \\ \Delta F_3 = \Delta F_7 = 14\text{--}80 \text{ Гц}; \Delta F_4 = \Delta F_8 = 16\text{--}80 \text{ Гц}. \end{aligned}$$

Выше показано, что использование комбинированных кодоимпульсных сигналов ЛИЧ, в которых одновременно изменялись бы параметры F_{\min} и T , в основном не обеспечивает дополнительное увеличение динамического диапазона корреляционного пре-

образования по сравнению с комбинированными сигналами, состоящими из сегментов, в которых изменяются лишь значения параметра F_{\min} . Вместе с тем применение таких комбинированных сигналов требует некоторого усложнения технологии регистрации колебаний и поэтому является не целесообразным.

Существенное повышение динамического диапазона корреляционного преобразования наблюдается для комбинированных разверток, формируемых с использованием последовательностей ЛИП различной длительности (табл. 3). По сравнению с наиболее эффективными одиночными последовательностями ЛИП ($F_{\max} = 30$ Гц) комбинированные развертки, состоящие из четырех сегментов, обеспечивают во вре-

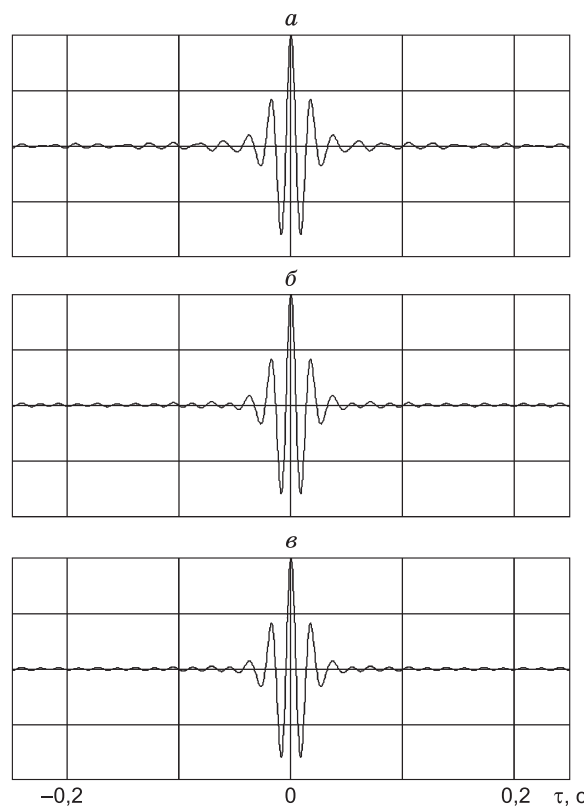


Рис. 3. Сопоставление главных максимумов ФВК одиночной и комбинированных разверток ЛИП ($F_{\max} = 30$ Гц, $f_{\text{вид}} = 55$ Гц, $t_{\text{СК}} = 0$):

a – одиночная развертка ($T = 20$ с); b – комбинированная развертка ($T_1 = 20$ с; $T_2 = 21$ с; $T_3 = 22$ с; $T_4 = 23$ с); v – комбинированная развертка ($T_1 = 20$ с; $T_2 = 21$ с; $T_3 = 22$ с; $T_4 = 23$ с; $T_5 = 24$ с; $T_6 = 25$ с; $T_7 = 26$ с; $T_8 = 27$ с).

менном интервале корреляционной функции $\tau = 0,5-4,0$ с ослабление корреляционного фона в среднем на 6 дБ, а комбинированные развертки, состоящие из восьми сегментов в среднем на 8,0–9,2 дБ в зависимости от значения $f_{\text{вид}}$. При этом среднее значение динамического диапазона преобразования наиболее эффективных последовательностей ЛИП в интервале $\tau = 0,5-4,0$ с достигает в случае использования комбинированных сигналов, состоящих из четырех сегментов, 53,8 дБ для значений $f_{\text{вид}} = 35$ и 57,8 дБ для $f_{\text{вид}} = 55$ Гц. При использовании же комбинированных сигналов, состоящих из восьми разверток ЛИП различной длительности, аналогичные средние значения динамического диапазона преобразования увеличиваются до 57,0 и 59,7 дБ соответственно.

Наряду с ослаблением помех преобразования в дальней зоне корреляционной функции, применение комбинированных сигналов позволяет несколько ослабить помехи преобразования и в ближней зоне корреляционной функции. Так, на рис. 3 сопоставлены главные максимумы ФВК для одиночной и комбинированных разверток, сформированных с использованием последовательностей ЛИП различной длительности. Видно, что использование технологии комбинированных сигналов при кодоимпульсном накоплении позволяет несколько уменьшить амплитуду боковых лепестков главного максимума ФВК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании исследования возможностей ослабления корреляционного фона при кодоимпульсном накоплении колебаний с использованием однополярных кодов путем огибания импульсных последовательностей и реализации технологии комбинированных сигналов можно сделать следующие выводы:

1. При использовании трапецеидальных скосов помехи преобразования кодоимпульсных сигналов ЛИЧ так же, как и при огибании вибросейсмических сигналов, в большей степени ослабляются в ближней зоне ФВК, на временах $\tau \leq 1$ с. Величина ослабления помех в этой области ФВК достигает 2,6–3,1 дБ при

$t_{\text{ск}} = 0,1T$. Косинусоидальное огибание импульсных последовательностей не является более эффективным для подавления корреляционного фона по сравнению с трапецеидальным огибанием.

2. Для наиболее эффективных кодов ЛИП ($F_{\text{max}} = 30-40$ Гц) огибание краевых частей импульсных последовательностей приводит к существенному увеличению эффективной длительности корреляционных импульсов и делает нецелесообразным использование скосов для кодоимпульсных сигналов ЛИП.

3. В результате совместного применения для наиболее эффективных кодоимпульсных сигналов ЛИЧ ($F_{\text{max}} = 80$ Гц) скосов и комбинированных разверток ЛИЧ, состоящих из четырех сегментов, отличающихся друг от друга значениями F_{min} , динамический диапазон корреляционного преобразования при кодоимпульсном накоплении во временном окне $\tau = 0,5-5,0$ с достигает в среднем 57 дБ при $f_{\text{вид}} = 55$ Гц и 47,1 дБ при $f_{\text{вид}} = 35$ Гц.

4. Среднее значение динамического диапазона преобразования наиболее эффективных последовательностей ЛИП в интервале $\tau = 0,5-4,0$ с достигает в случае использования комбинированных сигналов, состоящих из четырех сегментов различной длительности, 53,8 дБ для значений $f_{\text{вид}} = 35$ Гц и 57,8 дБ для $f_{\text{вид}} = 55$ Гц. При использовании же комбинированных сигналов, состоящих из восьми разверток ЛИП различной длительности, аналогичные средние значения динамического диапазона преобразования увеличиваются соответственно до 57,0 и 59,7 дБ.

Литература

1. Кострыгин Ю.П. Сейсморазведка на сложных сигналах. Тверь: Изд-во ГЕРС, 2002. 416 с.
2. Кострыгин Ю.П., Колесников Д.А. Сравнительный анализ эффективности кодоимпульсного накопления сейсмических колебаний при использовании однополярных кодов ЛИЧ и ЛИП // Технологии сейсморазведки. 2010. № 4. С. 46–52.
3. Кострыгин Ю.П., Кириллов В.М. Способ кодоимпульсного накопления сейсмических колебаний // Геофизическая аппаратура. Л.: Недра, 1990. Вып. 93. С. 34–39.