

Выбор кодовой функции при инженерных изысканиях с использованием кодоимпульсного накопления колебаний

- Кострыгин Ю.П., ООО «Новоросморгео», г. Новороссийск
- Хасан Р.Е., ООО «НК «Роснефть»-НТЦ», г. Краснодар

В настоящее время при проведении инженерных изысканий, в основном, для возбуждения колебаний используются ручные кувалды, что в значительной степени облегчает выполнение работ, например, в горных условиях, где применение транспортных средств становится проблематичным. Вместе с тем сигналы, возбуждаемые кувалдой, в принципе не могут вдоль профиля иметь стабильную динамику, что снижает эффективность сейсмических наблюдений, предусматривающих многократные перекрытия. Более того, во многих случаях даже при кратностях статистического накопления 12-15 при работе с кувалдой не удаётся обеспечить необходимую помехоустойчивость сейсмического метода. В связи с этим безусловный интерес представляют исследования возможности применения для инженерной сейсморазведки малогабаритных переносных кодоимпульсных излучателей, развивающих динамические усилия на грунт 3-5 кН. Такие излучатели обеспечили бы возбуждение более стабильных по динамике сигналов и значительно более высокую помехоустойчивость [1, 3].

При построении технологии инженерных изысканий с применением кодоимпульсного метода важнейшим является вопрос по выбору кодовых функций импульсных последовательностей. Так, в ряде работ авторы указывают на принципиальную возможность использования для кодоимпульсного накопления псевдослучайных кодовых функций [6, 7]. В связи с этим оценим некоторые характеристики ФВК псевдослучайных импульсных последовательностей.

В данном случае в качестве единичного импульса развёрток был взят импульс с колокольной огибающей (1).

$$S_0(t) = [\exp(-\beta^2 t^2)] \cdot \cos(2\pi f_{\text{вид}} t) \quad (1)$$

При этом учитывалось, что, в отличие от нефтегазовой сейсморазведки, при инженерных изысканиях в связи с относительно небольшими расстояниями от источника до точек приёма, а также в связи с неглубоким залеганием целевых горизонтов, продольные полезные колебания характеризуются существенно более высокочастотным составом. Поэтому с учётом полевых материалов, приведённых в работе [3], преобладающая (видимая) частота $f_{\text{вид}}$ единичных импульсов в последовательностях задавалась равной 90 Гц, и соблюдалось условие $\beta/f_{\text{вид}} = 1$. Периоды же следования импульсов изменялись линейно по аналогии с развёртками ЛИП (2).

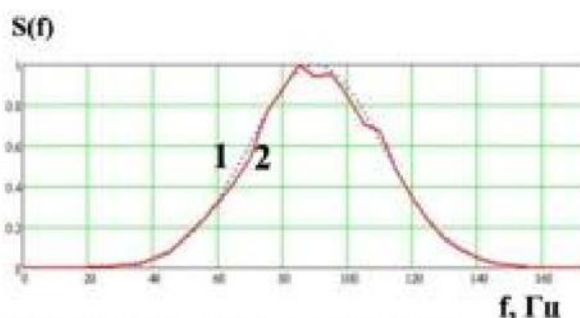
$$T_n = T_0 - \Delta T (n - 1), \quad (2)$$

где T_0 – начальный период следования импульсов;

ΔT – приращение периода следования импульсов;

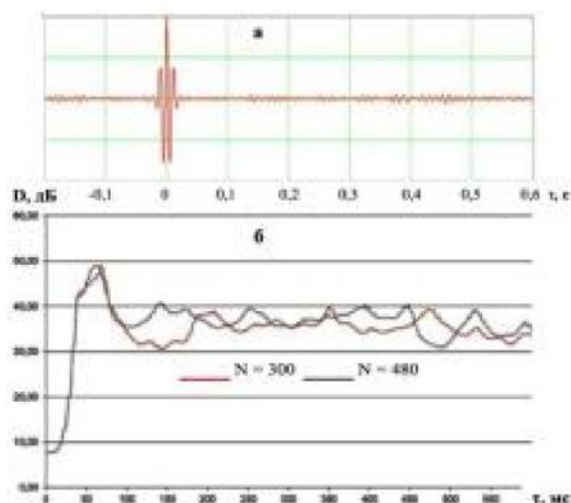
n – номер периода следования.

Однако вдоль псевдослучайной последовательности расчётные периоды T_n распределялись в соответствии с законом случайных чисел. Максимальное же значение периода следования T_{max} равнялось 0,1 с, а максимальная частота следования $F_{\text{max}} = 40$ Гц. Выполненные расчёты показали, что спектр ФВК сформированных последовательностей практически не отличается от спектра единичных импульсов, входящих в развёртку (см. рис. 1).



▲ Рис. 1. Сопоставление спектра единичных импульсов (1), входящих в псевдослучайную последовательность, со спектром главного максимума ФВК этой последовательности (2), $N = 300$.

Указанное обстоятельство свидетельствует о принципиальной возможности применения псевдослучайных последовательностей для решения задач, стоящих перед 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.



▲ Рис. 2. Динамические характеристики псевдослучайных импульсных последовательностей ($F_{min} = 10$ Гц, $F_{max} = 40$ Гц, $f_0 = 90$ Гц): а – ФВК последовательности, $N = 300$; б – графики динамического диапазона корреляционного преобразования $D(\tau)$.

Вместе с тем при проведении сейсморазведочных работ с применением сложных сигналов качество получаемых материалов в значительной степени, как известно, зависит не только от динамики корреляционных импульсов, но и от относительного уровня корреляционного фона. Об интенсивности корреляционного фона при использовании псевдослучайных развёрток можно судить из рисунка 2, на котором показаны ФВК последовательности (а) и графики динамического диапазона корреляционного преобразования $D(\tau)$ (б). Расчёт значений $D(\tau)$ осуществлялся с использованием общепринятой в сейсморазведке формулы (3):

$$D(\tau) = 20 \lg A_{max}/\sigma(\tau), \quad (3)$$

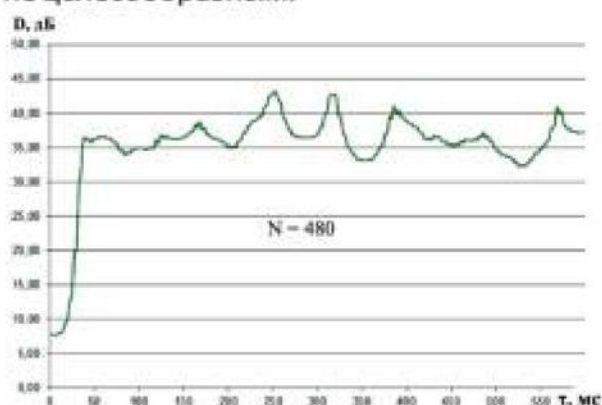
где A_{max} – пиковая амплитуда главного максимума ФВК, а $\sigma(\tau)$ – среднеквадратичная амплитуда корреляционного фона в скользящем окне, протяжённостью 40 мс.

Из рисунка видно, что псевдослучайные последовательности характеризуются относительно высокоамплитудными помехами преобразования. При этом для развёрток с числом импульсов 300–480 динамический диапазон преобразования в основном не превышает 31–40 дБ.

Очевидно, что рассмотренные выше последовательности не строго соответствуют случайным последовательностям, т.к. в данном случае были заданы вполне конкретные значения T_n . Наряду с развёртками, для которых периоды следования импульсов T_n определялись выражением (2) и располагались в соответствии со случайным законом, дополнительно были исследованы и псевдослучайные последовательности, для которых периоды следования также изменялись от 0,1 с до (1/40) с, однако

значения периодов не были детерминированы, а повторные значения T_n в развёртках были исключены. График динамического диапазона корреляционного преобразования таких последовательностей приведён на рисунке 3. Из рисунка следует, что для большей части временного интервала ФВК динамический диапазон преобразования при использовании псевдослучайной последовательности, с недетерминированными значениями периода следования также в основном не превышает 40 дБ.

Таким образом, псевдослучайные кодовые функции характеризуются повышенным корреляционным фоном вследствие чего их применение для инженерной сейсморазведки становится не целесообразным.



▲ Рис. 3. График динамического диапазона корреляционного преобразования $D(\tau)$ псевдослучайной импульсной последовательности с недетерминированными значениями периода следования T_n . ($F_{min} = 10$ Гц, $F_{max} = 40$ Гц, $f_0 = 90$ Гц)

Значительный интерес у специалистов в области сейсморазведки, занимающихся сложными сигналами, всегда был и к двух-полярным дополнительным последовательностям, при использовании которых корреляционный фон в идеальных ситуациях полностью обнуляется [1]. Импульсные последовательности $F_n(t)$ и $'F_n(t)$ называются, как известно, дополнительными, если им соответствуют

функции кода $K(t)$ и $'K(t)$, для которых выполняется условие:

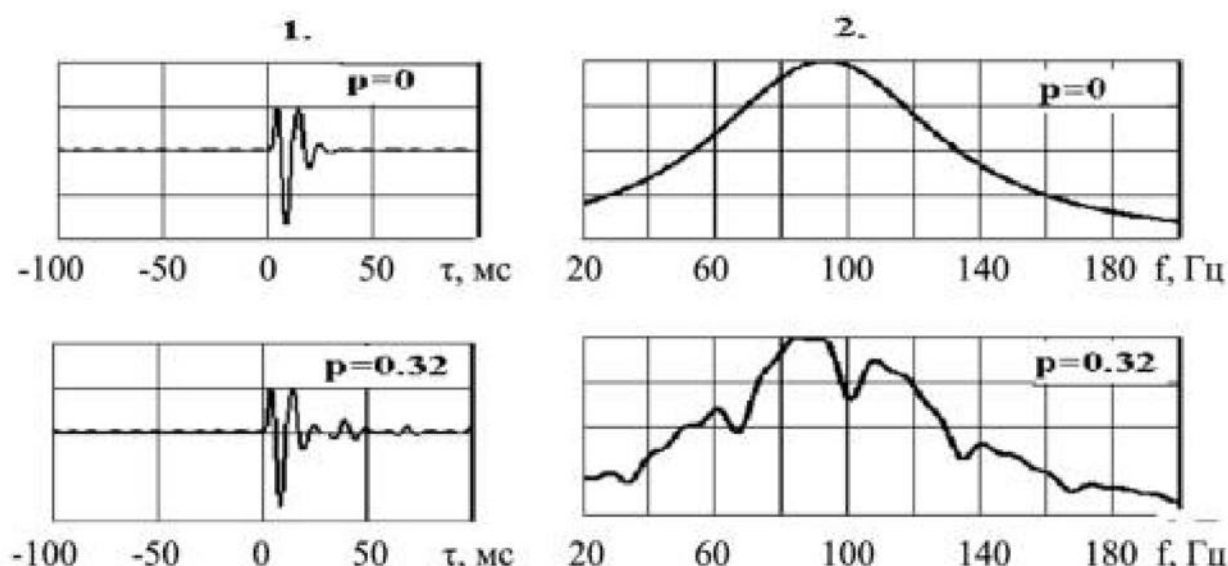
$$U_0(\tau) + 'U_0(\tau) = \begin{cases} 2 & \text{при } \tau = 0, \\ 0 & \text{при } \tau = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm(N-1), \end{cases} \quad (4)$$

где $U_0(t)$ и $'U_0(\tau)$ – нормированные ФАК функций $K(t)$ и $'K(t)$.

Т.е. для таких последовательностей сумма ФАК функций кода при одинаковой амплитуде импульсов, входящих в развёртки, равна нулю везде, кроме $\tau = 0$, вследствие чего происходит обнуление корреляционного фона.

Вместе с тем используемые в сейсморазведке импульсные излучатели являются излучателями одностороннего действия. Поэтому реализацию двух-полярных последовательностей можно обеспечить лишь путём возбуждения односторонних воздействий за два сеанса [4]. Сначала возбуждается развёртка, соответствующая временному закону следования импульсов с положительной полярностью, затем развёртка, соответствующая закону следования импульсов с отрицательной полярностью. Вычитая вторую запись из первой, получают аналог виброграммы, которая бы регистрировалась при использовании кодоимпульсных излучателей двухстороннего действия силы. Однако при отдельной отработке импульсов с положительной и отрицательной полярностью частота следования импульсов F не остаётся постоянной, что приводит к амплитудной неидентичности, которая для кодоимпульсных излучателей индукционно-динамического типа удовлетворительно аппроксимируется при $F \geq 5$ Гц степенной функцией [2]:

$$A_{имп} = k \cdot F^p \quad (5)$$



▲ Рис. 4. ФВК (1) и амплитудные спектры главных максимумов ФВК (2) двух-полярных дополнительных последовательностей при раздельной обработке импульсов с положительной и отрицательной полярностью в зависимости от значения параметра p .

Для серийного кодоимпульсного излучателя ИКИ-10/40 параметр p , определяющий неидентичность импульсов в развёртках, равнялся $\approx 0,65$. Но если бы даже удалось создать источник, для которого $p = 0,32$, то есть при увеличении F от 10 до 30 Гц амплитуда уменьшалась бы не более, чем в 1,4 раза, искажения динамики корреляционных импульсов при использовании дополнительных последовательностей оставались бы весьма значительными (см. рис. 4), а динамический диапазон корреляционного преобразования в интервале 0,4 - 0,6 с от главного максимума уменьшился до 55 дБ. В данном случае каждая из дополнительных развёрток включала по 256 импульсов, тактовая частота $t_0 = 30$ мс, $f_{\text{вид}} = 90$ Гц, $\beta = 300$, $n = 2,1$.

Таким образом, даже при относительно малых значениях параметра p , равных 0,32, искажения динамики ФВК для дополнительных последовательностей, сформированных путём раздельной обработки импульсов с положительной и отрицательной полярностью, остаются весьма значительными, а динамический диапазон преобразования уменьшается

до 55 дБ. Поэтому использование таких последовательностей для инженерной сейсморазведки представляется в ближайшее время также не целесообразным.

В течение 25-30 лет в Российской Федерации и на Украине при проведении сейсмических исследований достаточно успешно использовали кодоимпульсный метод с применением однополярных развёрток ЛИЧ и ЛИП. Для последовательностей ЛИЧ частота следования импульсов $F(t)$ изменяется по линейному закону во времени, то есть:

$$F(t) = F_n \pm (\Delta F/T) \cdot t, \quad (6)$$

где F_n – начальная частота следования импульсов; ΔF и T – ширина частотного диапазона и длительность развёртки.

Для развёрток же ЛИП – линейно во времени изменяется период следования (2).

В работе [1] показано, что эффективное применение кодоимпульсного накопления колебаний с использованием развёрток ЛИЧ представляется возможным при условии, если максимальная частота следования F_{max} равна или превышает правую граничную

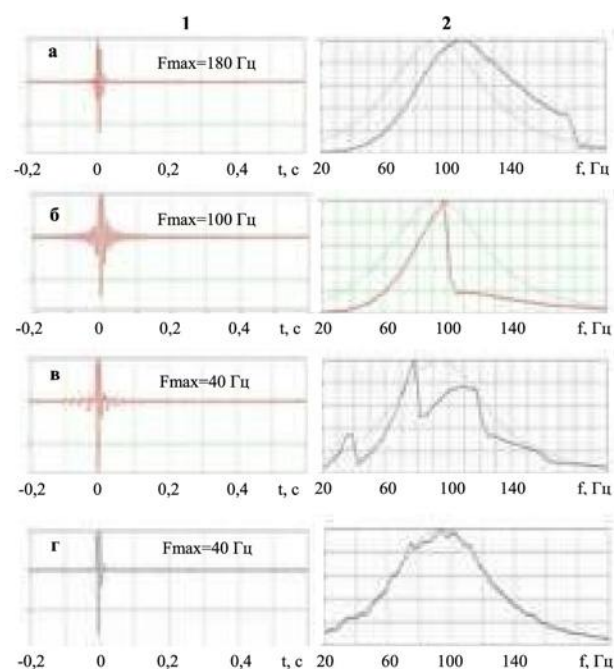
частоту спектра единичных импульсов $f_{гр}$. Соблюдение указанного условия позволяет сохранить высокочастотную часть спектра и сформировать предельно компактные корреляционные импульсы.

Так, на рисунках 5, а и 5, б – приведены спектры ФВК импульсных последовательностей ЛИЧ с максимальной частотой следования 180 Гц и 100 Гц. В данном случае преобладающая частота единичных импульсов равнялась 90 Гц, а правая граничная частота спектра около 200 Гц. Из рисунка 5, а можно видеть, что при $F_{max} = 180$ Гц, то есть при условии, когда F_{max} развёртки приближается к значению граничной частоты спектра единичного импульса $f_{гр}$, удаётся сохранить высокочастотную часть спектра колебаний и сформировать компактный корреляционный импульс. При уменьшении же F_{max} до 100 Гц гармонические составляющие, расположенные правее 100 Гц попадают в полосу гашения, а корреляционный импульс становится чрезвычайно многофазным (см. рис. 5, б).

То есть при инженерных изысканиях с использованием последовательностей ЛИЧ, в связи с высокочастотным, как уже отмечалось выше, составом регистрируемых колебаний, применяемые кодоимпульсные излучатели должны обеспечивать максимальную частоту следования импульсов F_{max} не менее 150-180 Гц.

Однако 10 ноября 2015 года на заседании секции «Углеводородное сырьё» Научно-технического совета ОАО «Росгеология» профессор Тольяттинского государственного университета Ивашин Виктор Васильевич, являющийся наиболее квалифицированным специалистом по разработке электро-механических излучателей, в своём докладе отметил, что в настоящее время можно создать кодоимпульсный излучатель, развивающий динамическое усилие на грунт 3-5 кН с максимальной частотой следования импульсов не более 40 Гц.

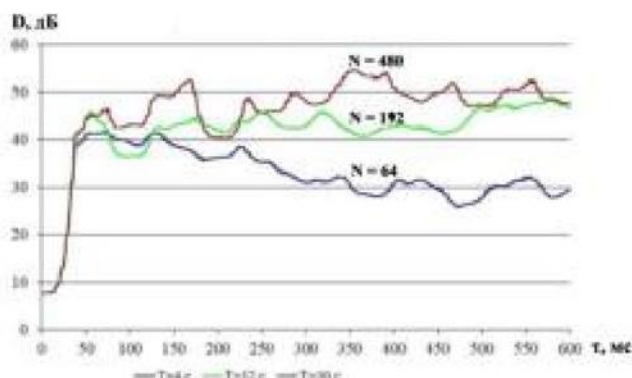
Учитывая это обстоятельство, интерес-



▲ Рис. 5. Главные максимумы ФВК (1) импульсных последовательностей ЛИЧ и ЛИП, а также соответствующие им спектры (2), рассчитанные при различных значениях F_{max} ($F_{min} = 10$ Гц, $T = 20$ с, $f_{вид} = 90$ Гц, $\beta = 300$, $n = 2,1$); точками показан спектр единичных импульсов последовательности; а, б, в – развёртки ЛИЧ, г – развёртка ЛИП.

ным представляется сопоставление эффективности применения для инженерной сейсморазведки импульсных последовательностей ЛИЧ и ЛИП с максимальной частотой следования F_{max} не более 40 Гц. Результаты такого сопоставления приведены на рисунках 5, в, г. Из рисунка 5, в можно видеть, что при регистрации высокочастотных импульсов, главные максимумы ФВК и соответствующие им спектры для последовательностей ЛИЧ, ограниченных максимальной частотой следования 40 Гц, претерпевают весьма значительные искажения. Поэтому развёртки ЛИЧ в настоящее время в принципе не могут быть использованы для решения задач инженерной сейсморазведки.

Вместе с тем, как это видно из рисунка 5, г, для последовательностей ЛИП с максимальной частотой следования F_{max} ,



▲ Рис. 6. Графики динамического диапазона корреляционного преобразования для последовательностей ЛИП ($F_{\min} = 10$ Гц, $F_{\max} = 40$ Гц, $f_{\text{вид}} = 90$ Гц).

равной 40 Гц, при регистрации высокочастотных импульсов ($f_{\text{вид}} = 90$ Гц) главный максимум ФВК остаётся предельно компактным, а соответствующий ему спектр практически не отличается от спектра единичного импульса развёртки. Мешающее же влияние корреляционного фона при работе с развёртками ЛИП можно существенно уменьшить путём увеличения их длительности T , то есть фактически числа импульсов в последовательности (см. рис. 6). Так, из рисунка 6 можно видеть, что при $T = 30$ с и $N = 480$ динамический диапазон корреляционного преобразования соответствовал интервалу значений 40-54 дБ, что на 10-15 дБ превышает аналогичный параметр при работе с псевдослучайными кодами.

Таким образом, выполненные исследования показали, что в настоящее время при проведении инженерных изысканий с применением кодоимпульсного накопления колебаний наиболее качественные результаты могут быть получены путём использования кодовой функции ЛИП.

Литература

1. Кострыгин Ю.П., 2014, Вибросейсмический и кодоимпульсный методы сейсмической разведки. Краснодар: Издательство «Просвещение – Юг». 494 с.
2. Кострыгин Ю.П., Колесников Д.А., 2011, Оценка влияния амплитудной неидентичнос-

ти импульсов в развёртках на эффективность кодоимпульсного накопления сейсмических колебаний // Технология сейсморазведки, 2, 97-108.

3. Кострыгин Ю.П., Удалый М.Н., 2013, Исследование возможности и целесообразности применения кодоимпульсного метода для инженерной сейсморазведки. Приборы и системы разведочной геофизики, 3, 84-96.

4. Роман В.И., Шпортюк Г.А., Михайличенко О.Г., Королук П.А., 1986, Перспективы применения дополнительных последовательностей импульсов в невзрывных методах сейсморазведки, ГСЗ и сейсмологии // Современные геодинамические процессы и их изучение в связи с проблемой прогноза землетрясений: Киев, Наукова думка, 22-26.

5. Хасан Р.Е., Кострыгин Ю.П., 2018, Исследование возможности и целесообразности применения псевдослучайных кодовых функций при кодоимпульсном накоплении колебаний для решения задач нефтегазовой сейсморазведки. – Журнал «Геофизические технологии», №1, с. 39-50.

6. Шайдуров Г.Я., Воронцов Ю.С., Кудинов Д.С., Щитников А.А., Копылов М.А., 2013. К обоснованию создания кодоимпульсного источника сейсмических волн. Приборы и системы разведочной геофизики, 3, 97-101.

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

Подробнее об авторах



Кострыгин
Юрий Петрович

доктор технических наук,
директор
ООО «Новоросморгео»



Хасан
Ресуль Енес

Геофизик ООО
«НК «Роснефть»-НТЦ»