

Исследование возможности и целесообразности применения кодоимпульсного метода для инженерной сейсморазведки

- Кострыгин Ю.П., ООО «Новоросморгео», г. Новороссийск,
Удалый М.Н., ООО «Ильинская геофизическая экспедиции»,
Астраханская обл., посёлок Ильинка

В настоящее время возбуждение колебаний при инженерных изысканиях, как правило, осуществляется с использованием ручной кувалды. Применение в качестве источника сигналов ручной кувалды облегчает проведение работ, например, в горных условиях. Вместе с тем сейсмические импульсы, возбуждаемые кувалдой, отличаются динамической нестабильностью, а сама технология сейсмических наблюдений при этом характеризуется относительно низкой помехоустойчивостью. В данной статье рассмотрена возможность реализации для инженерной сейсморазведки кодоимпульсного накопления колебаний с использованием маломощных малогабаритных переносных кодоимпульсных излучателей.

Показано, что для реализации кодоимпульсного метода с целью решения задач инженерной сейсморазведки весьма перспективным является применение однополярных кодовых функций ЛИЧ с максимальной частотой следования импульсов, равной 150-200 Гц, либо двухполярных дополнительных последовательностей с раздельной обработкой импульсов с положительной и отрицательной полярностью. Отмечается также, что однополярные последовательности ЛИП не могут быть использованы для инженерных изысканий, т.к. они характеризуются высоким уровнем корреляционного фона в ближней зоне ФВК.

Сейсмические исследования, выполняемые при изысканиях, связанных с проектированием инженерных сооружений, как правило, предполагают изучение малоразмерных геологических объектов, расположенных на глубинах, не превышающих 30 – 50 м. Очевидно, что эффективное решение таких задач представляется возможным лишь при использовании высокочастотных зондирующих сигналов, позволяющих существенно повысить разрешающую способность метода. При этом многочисленные теоретические и экспериментальные исследования указывают на существование устойчивой тенденции к повышению спектрального состава формируемых колебаний по мере уменьшения энергии воздействия источника на грунт [8]. В частности, поэтому в инженерной сейсморазведке для возбуждения упругих колебаний, в основном, применяются маломощные излучатели типа ручной кувалды массой 4 кг и 8 кг, характеризую-

щиеся энергией воздействия, равной 60 – 140 Дж [7].

Использование в качестве источника сигналов ручной кувалды позволяет существенно расширить спектр колебаний и в значительной степени облегчает проведение работ, например, в горных условиях, где применение транспортных средств становится проблематичным. Вместе с тем сейсмические импульсы, возбуждаемые кувалдой, в принципе не могут иметь стабильную динамику, что в значительной степени снижает эффективность сейсмических наблюдений по технологии многократных перекрытий. Более того, во многих случаях даже при кратностях статистического накопления 12-15 при работе с кувалдой не удаётся обеспечить необходимую помехоустойчивость сейсмического метода.

В этой связи безусловный интерес представляют исследования возможности применения для инженерной сейсморазведки маломощных малогабаритных

переносных кодоимпульсных излучателей. Такие излучатели обеспечили бы формирование более стабильных по динамике мало амплитудных широкополосных сигналов. Вместе с тем помехоустойчивость кодоимпульсного метода, как известно, на порядок превышает помехоустойчивость сейсмического метода в режиме редко следующих импульсов [2]. Указанные, весьма значимые преимущества технологии сейсмических наблюдений с использованием маломощных кодоимпульсных излучателей, позволили бы существенно повысить эффективность инженерной сейсморазведки.

При построении технологии сейсмических наблюдений с использованием кодоимпульсного метода важнейшим является вопрос по выбору кодов импульсных последовательностей, т.е. временных последовательностей моментов вступления импульсов в развёртки. На основании выполненных к настоящему времени исследований показано, что наибольший интерес для сейсморазведки представляют однополярные последовательности с линейным по времени изменением частоты следования импульсов в развёртках (коды ЛИЧ), с линейным изменением периода следования импульсов (коды ЛИП), а также двухполярные дополнительные импульсные последовательности [1, 2, 6]. При этом для нефтегазовой сейсморазведки наиболее перспективными являются однополярные последовательности ЛИЧ с максимальной частотой следования импульсов $F_{\max} \approx 80$ Гц и длительностью, равной $T = 20 - 30$ с [4], однополярные последовательности ЛИП при $F_{\max} \approx 30 - 40$ Гц и $T = 20 - 30$ с [5], а также двухполярные дополнительные последовательности [2].

Для инженерной сейсморазведки параметры эффективных кодовых посылок могут отличаться от соответствующих параметров для нефтегазовой сейсмо-

разведки. Такое утверждение является вполне очевидным в связи с тем, что для инженерной сейсморазведки характеристики волновых полей существенно отличаются от аналогичных характеристик при проведении сейсмических исследований на нефть и газ.

Чтобы сформировать представление об основных особенностях волновых сейсмических полей, регистрируемых в инженерной сейсморазведке, обратимся к рис. 1.

На рисунке приведены сейсмограммы и соответствующие им спектры, полученные в процессе инженерных изысканий в районе Сочи с использованием вертикальных (а) и горизонтальных (б) сейсмоприёмников. Для возбуждения колебаний в данном случае применялась кувалда массой 4 кг. Из рис. 1 следует, что в отличие от нефтегазовой сейсморазведки при инженерных изысканиях в связи с небольшим расстоянием от точек приёма до источника, а также в связи с неглубоким залеганием целевых горизонтов продольные полезные колебания (Р) характеризуются существенно более высокочастотным составом, что, безусловно, следует учитывать при выборе кодовых функций. Так, в конкретном случае, преобладающая частота колебаний равнялась 93 Гц, а правая граничная частота на уровне 0,1 от максимального значения спектра, 175 Гц.

В непосредственной близости от продольных полезных колебаний на сейсмограмме, представленной на рис. 1,а можно видеть многофазный цуг низкоскоростных поверхностных волн R ($V_k \approx 200$ м/с). Такие волны присутствуют при инженерных изысканиях повсеместно, характеризуются повышенной амплитудой и по этой причине при реализации кодоимпульсного метода могут формировать интенсивный корреляционный фон, снижающий качество выделения более слабых полезных продоль-

ных колебаний. Указанное обстоятельство также следует учитывать при определении технологии кодоимпульсного метода для инженерной сейсморазведки.

И, наконец, важно отметить, что при проведении инженерных изысканий методами сейсмической разведки, как правило, предполагается исследование не только структурных форм геологических объектов, но и динамических модулей упругости пород. Для решения таких задач существует необходимость возбуждения и регистрации не только продольных, но и поперечных колебаний. Это обстоятельство также необходимо учитывать при определении методики инженерных изысканий с использованием кодоимпульсного накопления сейсмических колебаний.

В данной статье по результатам проведённых модельных исследований обсуждается целесообразность решения задач инженерной сейсморазведки путём использования кодоимпульсного метода с применением однополярных импульсных последовательностей ЛИЧ, однополярных последовательностей ЛИП и двухполярных дополнительных последовательностей [1, 2, 4, 5]. При моделировании кодоимпульсные развёртки были составлены из импульсов Берлага (1)

$$F(t) = a \cdot t^n \cdot e^{-\beta t} \sin 2\pi f_{\text{вид}} t \quad t \geq 0 \quad (1)$$

где $f_{\text{вид}}$ – видимая (преобладающая) частота колебаний, β – коэффициент затухания импульса.

При этом для продольных волн $f_{\text{вид}} = 93$ Гц, $\beta = 300$, $n = 2,1$, а для низкоскоростных поверхностных волн $f_{\text{вид}} = 26$ Гц, $\beta = 90$, $n = 1,9$. Выбранные значения указанных параметров обеспечивали наибольшее соответствие спектров наблюдаемых и теоретических импульсов.

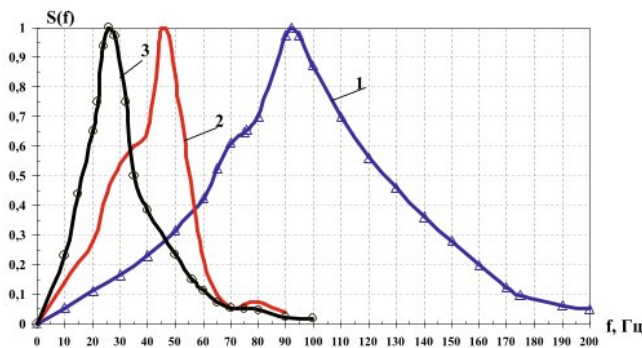
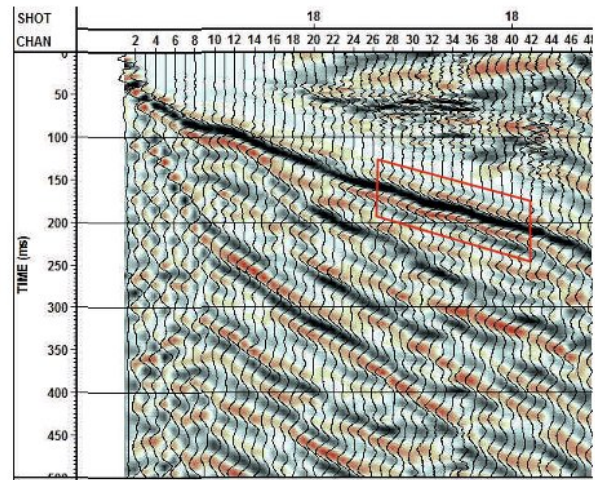
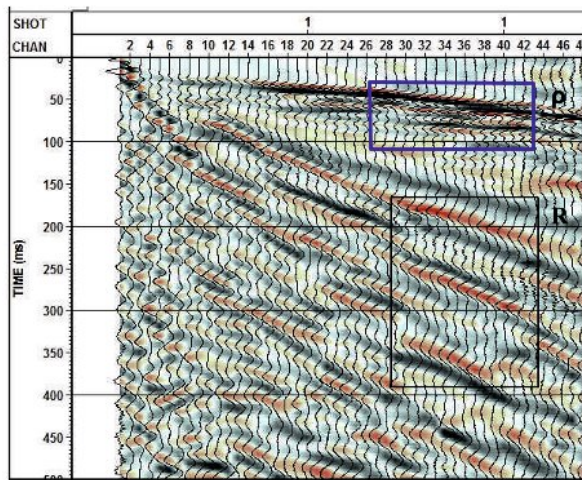
Временное сжатие импульсных последовательностей $X(t)$ осуществлялось путём корреляционной свёртки $X(t) * K(-t)$, где $K(-t)$ – функция кода последовательности. Такой вид корреляционной обработки исключает операции умножения и поэтому называется способом суммирования.

Следует отметить, что кодоимпульсный метод в течение длительного времени весьма успешно использовался в Костромской геофизической экспедиции при разведке нефти и газа. При этом в основном, для решения практических задач применялись однополярные импульсные последовательности с линейным изменением частоты следования импульсов (коды ЛИЧ) [2, 4]. Для кодов ЛИЧ с начальной и конечной частотами следования F_n и F_k при длительности развёртки T , временное положение n -го импульса, т.е. по существу функция кода, определяется исходя из следующего выражения

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

где t_n – временное положение n -го импульса в развёртке (начальному импульсу присвоен номер «0»), F – ширина частотного диапазона развёртки.

При этом результаты исследований, приведённые в работе [4], показывают, что спектр корреляционных импульсов кодоимпульсных сигналов ЛИЧ в значительной степени зависит не только от частотного состава единичных импульсов, входящих в последовательность, но и от частотного диапазона развёртки $F_n \div F_k$, т.е. от спектральных характеристик функции кода. Так, сохранить высокочастотные гармонические составляющие, участвующие в формировании единичных импульсов, входящих в развёртку ЛИЧ, представляется возможным лишь при условии, если максимальная частота



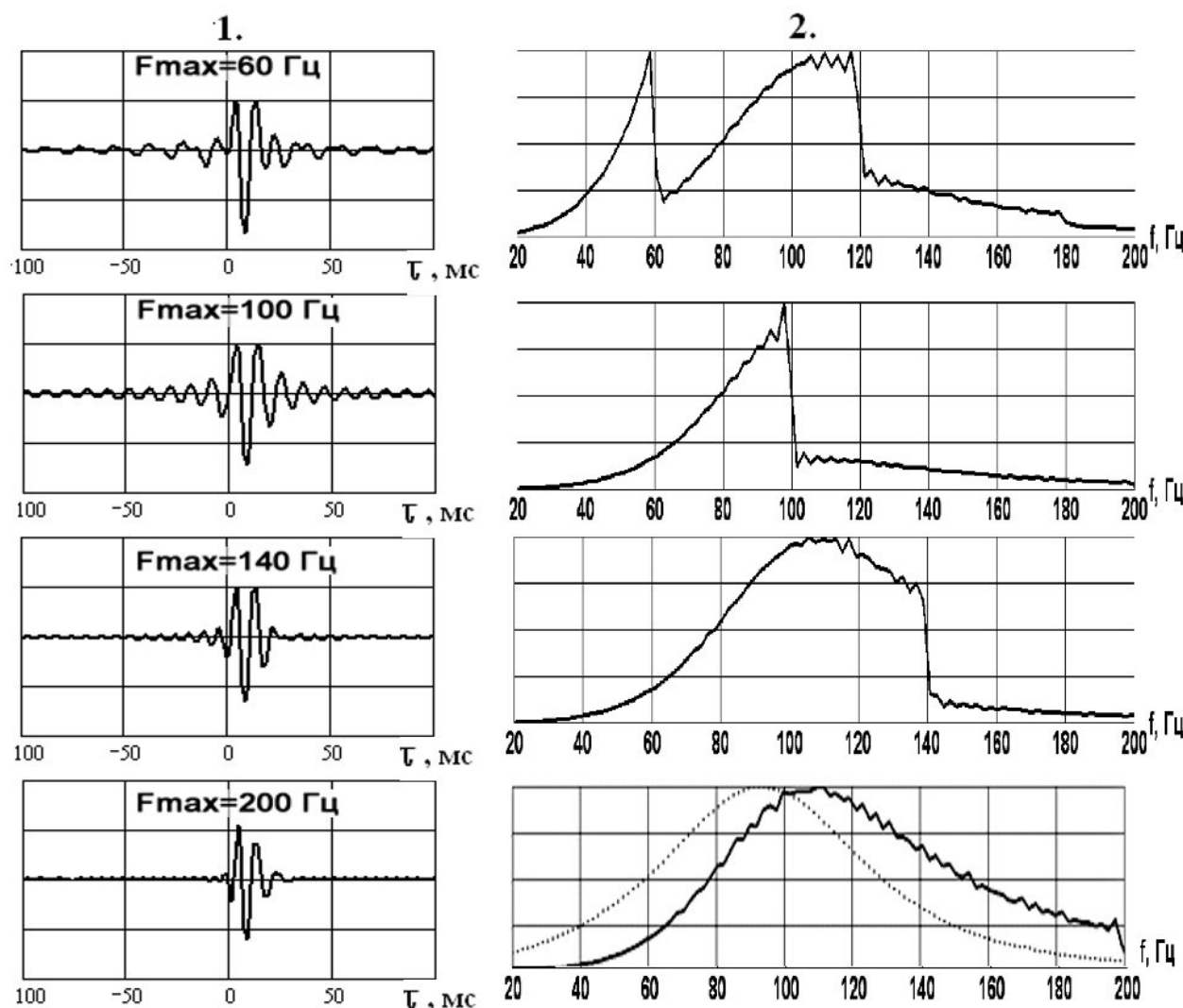
▲ Рис. 1. Сейсмические записи, зарегистрированные в районе Сочи с использованием вертикальных (а) и горизонтальных сейсмоприёмников (б), а также спектры, соответствующие представленным записям (в) 1 – спектр продольных полезных колебаний (окно расчёта Р); 2 – поперечных полезных колебаний (S); 3 – волн Рэлеевского типа (R)

развёртки $F_{\max}$ располагается в области правой граничной частоты $f_{\text{гр}}$ спектра единичных импульсов последовательности [4]. Принимая же во внимание относительно высокочастотный состав продольных колебаний при проведении инженерных изысканий можно предположить, что максимальная частота развёртки ЛИЧ для инженерной сейсморазведки с использованием продольных волн должна быть не менее 150-200 Гц

Так, на рис. 2 приведены главные максимумы ФВК импульсных последовательностей ЛИЧ и соответствующие им спектры, рассчитанные при различных значениях $F_{\max}$. Расчёты в данном случае были выполнены с учётом динамических характеристик полезных продольных колебаний, регистрируемых при инженерных изысканиях. Максимальная частота развёртки $F_{\max}$ изменялась от 60 Гц до 200 Гц, а в качестве единичного импульса последовательности использовался импульс Берлага с пара-

метрами: $f_{\text{вид}} = 93$ Гц, $\beta = 300$, $n = 2, 1$.

Из рисунка 2 следует, что для высокочастотных продольных колебаний с верхней граничной частотой $f_{\text{гр}} \approx 175$ Гц спектр ФВК кодоимпульсных последовательностей ЛИЧ при $F_{\max} = 60$ Гц, т.е. при значительном несоответствии спектральных характеристик функции кода и единичного импульса, имеет весьма сложную форму и два экстремума, сформированные соответственно на частотах ≈ 60 Гц и ≈ 110 Гц. С увеличением $F_{\max}$ форма спектра ФВК становится более простой, однако из записи практически исключаются гармонические составляющие, расположенные правее $F_{\max}$. Таким образом, очевидно, 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 $f_{\text{гр}}$ спектра единичных импуль-



▲ Рис. 2. Главные максимумы ФВК (1) импульсных последовательностей ЛИЧ и соответствующие им спектры (2), рассчитанные при различных значениях $F_{\max}$ ($F_{\min} = 10$ Гц, $T = 20$ с, $f_{\text{вид}} = 93$ Гц, $\nu = 300$, $n = 2,1$), точками показан спектр единичных импульсов последовательности)

сов. Соблюдение указанного условия позволяет сохранить высокочастотную часть спектра продольных колебаний при инженерных изысканиях и сформировать предельно компактные корреляционные импульсы (см. рис. 2).

Более того, в связи с тем, что спектры функций кода ЛИЧ характеризуются равномерным увеличением спектральной плотности с ростом частоты [3], корреляционные импульсы для последовательностей ЛИЧ при достаточно больших значениях $F_{\max} \geq f_{\text{гр}}$ отличаются

несколько более высокочастотным составом по сравнению с единичными импульсами, формирующими эти последовательности. Так, из рис. 2 можно видеть, что при $F_{\max} = 200$ Гц спектры ФВК и спектры единичных импульсов имеют практически одинаковую форму, однако для корреляционных импульсов спектр смещён вправо, приблизительно на 20 Гц. Т.е. с точки зрения спектральных характеристик сигнала переход от одиночных импульсов к режиму кодоимпульсного накопления с использованием

развёрток ЛИЧ очень напоминает переход от вибросейсмических ЛЧМ-сигналов к вибросейсмическим нелинейным, например, степенным или логарифмическим развёрткам.

Итак, высокую эффективность инженерных изысканий с использованием кодоимпульсных последовательностей ЛИЧ, можно обеспечить при условии, если применяемые сейсмические излучатели позволяют формировать импульсные последовательности с максимальной частотой следования 150-200 Гц. Очевидно, что разработка и создание таких излучателей является достаточно сложной технической задачей. Однако, как уже отмечалось, кодоимпульсный метод по сравнению с методом статистического накопления в режиме редко следующих импульсов, отличается значительно более высокой помехоустойчивостью, что в принципе позволяет без ущерба для качества сейсмических записей существенно снизить динамические нагрузки на грунт и тем самым существенно упростить задачу по разработке высокочастотного излучателя.

Так, если предположить, что кодоимпульсный излучатель развивает такое же динамическое усилие на грунт, как и в случае удара кувалды, то при кодоимпульсном накоплении с использованием последовательности ЛИЧ с частотным диапазоном 10-180 Гц и длительностью 15 с помехоустойчивость сейсмического метода будет в ≈ 10 раз превышать помехоустойчивость метода при 15-кратном возбуждении колебаний кувалдой. Т.е. динамическое усилие, развиваемое кодоимпульсным излучателем, можно без ущерба для качества, как минимум, уменьшить в 5 раз по сравнению с силовым воздействием кувалдой на грунт. Учитывая, что силовое воздействие на грунт при ударе кувалдой соответствует диапазону 15-25 кН [7], усилие, развиваемое кодоимпульсным излучателем

можно ограничить значениями 3-5 кН.

Таким образом, кодоимпульсный излучатель, используемый для решения задач, стоящих перед инженерной сейсморазведкой, при возбуждении импульсных последовательностей ЛИЧ должен обеспечивать максимальную частоту следования воздействий, равную 150-200 Гц при динамическом усилии на грунт 3-5 кН.

Существенно уменьшить максимальную частоту следования сейсмических импульсов в однополярных кодоимпульсных развёртках при проведении инженерных изысканий можно путём использования сигналов с линейным изменением периода следования воздействий (коды ЛИП). Величина периода следования импульсов T_n в развёртке ЛИП определяется условием.

$$T_n = T_0 - \Delta T(n-1), \quad (3)$$

где T_0 – начальный период следования импульсов;

ΔT – приращение периода следования импульсов;

n – номер импульса в развёртке.

Используя формулу суммы членов арифметической прогрессии и полагая, что начальному импульсу присвоен номер «0» можно определить относительное запаздывание t_n для n -го импульса в развёртке ЛИП, т.е. функцию кода последовательности

$$t_n = n T_0 - n(n-1) \Delta T / 2 \quad (4)$$

Очевидно, что по аналогии с вибросейсмическим методом, режимы работы кодоимпульсного излучателя следует задавать с использованием физически наиболее значимых параметров, реально определяющих эффективность метода и технические возможности излучателя. К таким параметрам можно отнести

конечную (максимальную) частоту следования импульсов в развёртке $F_{\max}$, длительность развёртки T и число импульсов N в развёртке.

Указывая на практическую целесообразность задания последовательности ЛИП с использованием параметров $F_{\max}$, T и N , следует вместе с тем отметить, что в формуле (4), определяющей функцию кода развёртки ЛИП параметры $F_{\max}$, T и N отсутствуют. Поэтому существует необходимость задания значений $F_{\max}$, T и N через соответствующие им значения параметров T_0 и ΔT .

Запишем систему уравнений

$$T_0 - (N-1)\Delta T = 1/F_{\max} \quad (5)$$

$$NT_0 - [N(N-1)\Delta T]/2 = T \quad (6)$$

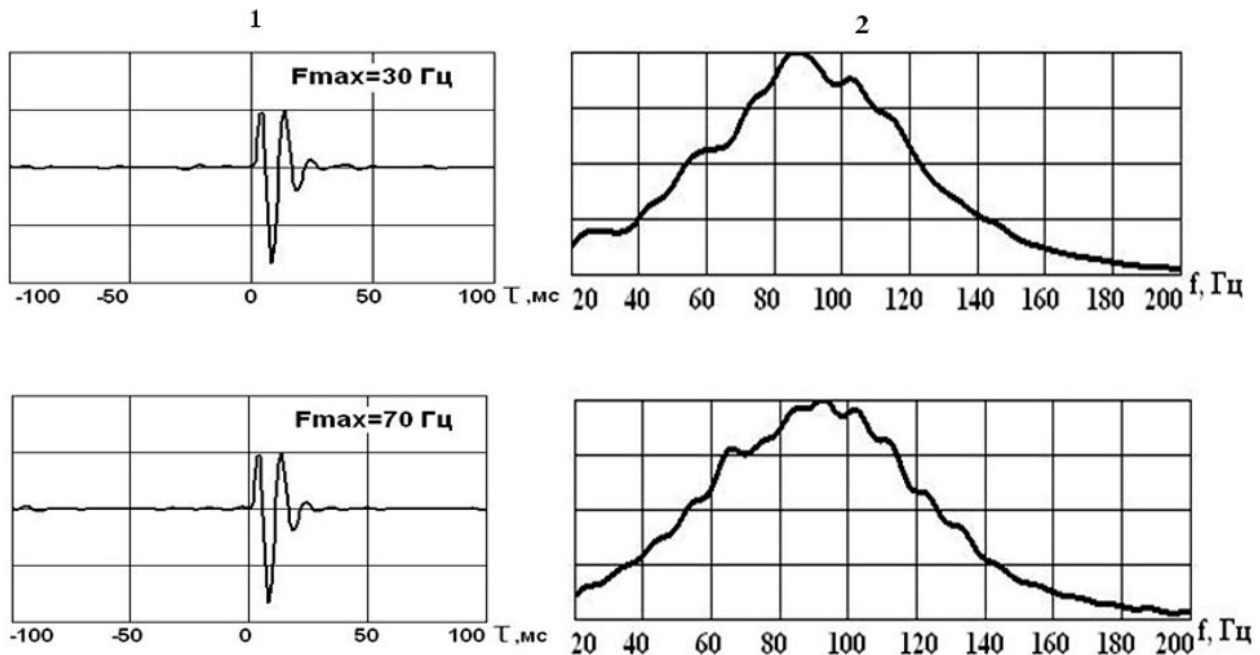
Данная система уравнений позволяет по известным параметрам $F_{\max}$, T и N определить параметры T_0 и ΔT .

Как было показано в работе [5] в отличие от импульсных последовательностей ЛИЧ, последовательности ЛИП могут обеспечивать формирование компактных корреляционных импульсов, характеризующихся широкополосными спектральными характеристиками, при использовании кодовых функций с существенно меньшими значениями максимальной частоты развёртки $F_{\max}$. Так, на рис. 3 приведены главные максимумы ФВК импульсных последовательностей ЛИП и соответствующие им спектры, рассчитанные при различных значениях $F_{\max}$. Материалы, представленные на рис. 3, подтверждают возможность весьма значительного уменьшения параметра $F_{\max}$ при проведении инженерных изысканий с применением кодоимпульсного метода, основанного на использовании последовательностей ЛИП. Действительно, как можно видеть из рис. 3, даже при условии $F_{\max} = 30$ Гц

главный максимум и амплитудный спектр ФВК импульсной последовательности ЛИП практически не отличаются от аналогичных характеристик единичных импульсов последовательности. Некоторые, весьма не существенные различия, заключаются в незначительном увеличении веса низкочастотных составляющих для корреляционных импульсов последовательностей ЛИП. Физически это связано с тем, что значения спектральной плотности функции кода ЛИП при увеличении частоты несколько уменьшаются [3].

Очевидно, что обсуждаемая возможность уменьшения параметра $F_{\max}$ вследствие применения при инженерных изысканиях последовательностей ЛИП, позволяет весьма существенно упростить разработку кодоимпульсных излучателей. Однако уменьшение $F_{\max}$ неизбежно приведёт и к снижению помехоустойчивости метода и потребует в свою очередь увеличения динамических нагрузок на грунт с целью компенсации ожидаемого снижения помехоустойчивости. Так, если при использовании развёрток ЛИЧ с частотным диапазоном 10-150 Гц и длительностью 15 с число воздействий равно 1200, то для развёрток ЛИП с частотным диапазоном 10-30 Гц и длительностью 15 с количество воздействий равно соответственно 224. Скомпенсировать потерю энергии в данном случае можно путём увеличения динамических нагрузок на грунт в 2,3 раза, т.е. до 7-12 кН. При окончательном же выборе оптимальных соотношений между $F_{\max}$ и величиной динамических нагрузок на грунт, безусловно, следует учитывать реальные возможности разработчиков кодоимпульсных излучателей.

Как уже отмечалось выше, на сейсмических записях, регистрируемых при инженерных изысканиях, в непосредственной близости от продольных полезных колебаний присутствуют многофазные цуги высокоамплитудных



▲ Рис. 3. Главные максимумы ФВК (1) импульсных последовательностей ЛИП и соответствующие им спектры (2), рассчитанные при различных значениях $F_{\max}$ ($F_{\min} = 10$ Гц, $T = 20$ с, $f_{\text{вид}} = 93$ Гц, $\beta = 300$, $n = 2,1$)

низкоскоростных поверхностных волн. Такие помехи могут формировать интенсивный корреляционный фон, снижающий качество выделения более слабых продольных колебаний. В этой связи при выборе наиболее приемлемых для инженерных изысканий кодовых функций последовательностей следует учитывать не только динамику корреляционных импульсов полезных сигналов, но и степень мешающего влияния помех корреляционного преобразования, соответствующих наиболее интенсивным помехам.

С целью оценки мешающего влияния на полезную запись корреляционного фона, связанного с доминирующими поверхностными волнами, были рассчитаны графики динамического диапазона корреляционного преобразования $D(\tau)$ для последовательностей ЛИЧ и ЛИП (см. рис. 4). Единичные импульсы в развёртках задавались в данном случае импульсами Берлаге с параметрами $f_{\text{вид}} = 26$ Гц, $\beta = 90$, $n = 1,9$. Динамический диапазон преобразования рассчитывался по формуле

$$D(\tau) = 20 \lg A_{\max}/\sigma(\tau), \quad (7)$$

где $A_{\max}$ – пиковая амплитуда главного максимума ФВК кодоимпульсного сигнала; $\sigma(\tau)$ – среднеквадратичная амплитуда корреляционного фона во временном окне 50 мс. Значения $D(\tau)$ определялись вдоль корреляционной функции с дискретностью 1 мс.

Из рис. 4, а можно видеть, что для наиболее оптимальных для инженерных изысканий импульсных последовательностей ЛИЧ значения динамического диапазона помех корреляционного преобразования, формируемых низкоскоростными помехами, соответствуют 40 – 53 дБ при $\tau = 0,11 - 0,6$ с, что в принципе позволяет использовать такие последовательности при условии, если амплитуда помех не более, чем на ≈ 30 дБ превышает уровень полезных сигналов.

Для кодоимпульсных же сигналов ЛИП в аналогичном временном интервале значения динамического диапазона преобразования помех соответствуют 25 – 50 дБ (см. рис. 4, б), что не позволяет

рассчитывать на эффективное использование кодоимпульсного метода для решения задач инженерной сейсморазведки. Так, например, для сейсмической записи, приведённой на рис. 1, соотношения между амплитудами продольных полезных колебаний, регистрируемых на временах 50 – 150 мс, и амплитудами доминирующих поверхностных волн приближались к 30 дБ. Т.е. в случае использования в таких, совершенно типичных условиях, импульсных последовательностей ЛИП относительно слабые полезные сигналы были бы соизмеримы по интенсивности с корреляционным фоном, формируемым поверхностными волнами.

Уменьшить интенсивность корреляционного фона при кодоимпульсном накоплении можно, как известно, путём применения двухполярных дополнительные последовательностей [1].

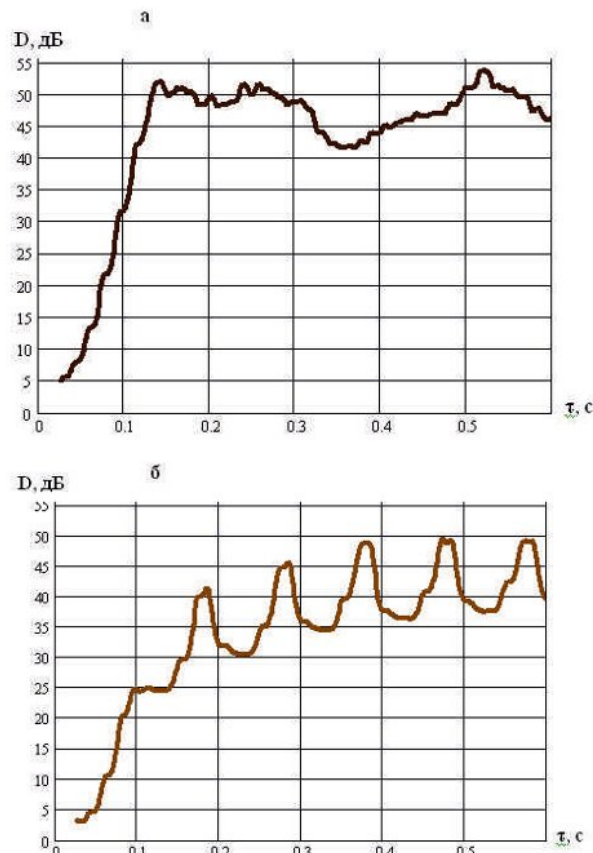
Импульсные последовательности $F_n(t)$ и $'F_n(t)$ называются дополнительными, если им соответствуют функции кода $K(t)$ и $'K(t)$, для которых выполняется условие

$$U_0(\tau) + 'U_0(\tau) = \begin{cases} 2 & \text{при } \tau=0, \\ 0 & \text{при } \tau=1, 2, \dots, (N-1), \end{cases} \quad (8)$$

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

Т.е. для таких последовательностей сумма ФАК функций кода равна нулю везде, кроме $\tau=0$.

Как уже отмечалось, дополнительные последовательности относятся к классу так называемых двухполярных последовательностей. Вместе с тем используемые в сейсморазведке импульсные излучатели являются излучателями одностороннего действия. В работе [6] был предложен весьма простой способ, позволяющий формировать двухполярные последовательности излучателями одностороннего действия. В предложен-



▲ Рис.4. Графики динамического диапазона корреляционного преобразования $D(\tau)$ для функций взаимной корреляции однополярных импульсных последовательностей, соответствующих низкоскоростной поверхностной волне:

а – ЛИЧ при $F_{max} = 200$ Гц;

б – ЛИП при $F_{max} = 70$ Гц

ном способе разнополярную последовательность импульсов реализуют односторонними воздействиями за два сеанса. 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.

Оценивая эффективность применения дополнительных последовательностей для решения задач инженерной сейсмо-

разведки необходимо учитывать, что в отличие от «идеальных» кодоимпульсных сигналов, характеризующихся постоянной амплитудой единичных импульсов, последовательности, формируемые реальными сейсмическими источниками, обладают некоторой амплитудной неидентичностью импульсов в развёртке, зависящей от частоты следования F . Так, например, экспериментальная зависимость $A_{\text{имп}}(F)$, полученная для серийного кодоимпульсного источника ИКИ-10/40, удовлетворительно аппроксимируется при $F \geq 5$ Гц степенной функцией [2]

$$A_{\text{имп}} = k \cdot F^{-p}. \quad (9)$$

Вместе с тем, при раздельной обработке импульсов с положительной и отрицательной полярностью, входящих в дополнительные развёртки, частота следования не остаётся постоянной, что приводит к амплитудной неидентичности, ориентировочно определяемой зависимостью (9). При такой технологии формирования дополнительных последовательностей амплитуду импульсов можно рассчитать исходя из выражения (10)

$$A_n \sim [1/(t_n - t_{n-1})]^{-p}, \quad (10)$$

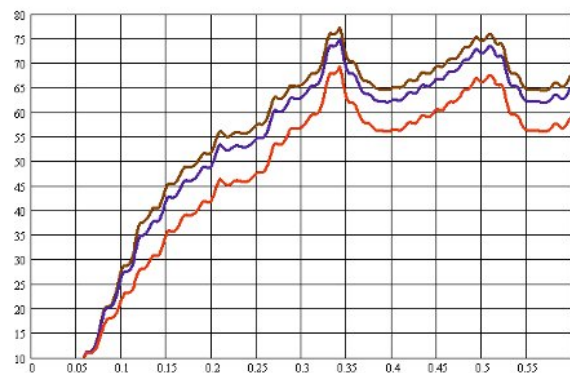
где n – номер импульсов для однополярных развёрток, получаемых вследствие раздельной отработки импульсов дополнительных последовательностей с положительной и отрицательной полярностью.

Очевидно, что в случае повышенных значений параметра p амплитудная неидентичность в двухполярных последовательностях, формируемых путём раздельной отработки импульсов с положительной и отрицательной полярностью, может приводить к уменьшению динамического диапазона корреляцион-

ного преобразования и к искажениям динамики главного максимума ФВК. Анализ взаимосвязи между амплитудной неидентичностью импульсов в развёртках, значениями динамического диапазона преобразования и динамикой главного максимума ФВК был выполнен с использованием дополнительных последовательностей $K(t)$ и $K'(t)$, каждая из которых включала в себя по 256 импульсов. Функции кода дополнительных последовательностей, выбранных для анализа, приведены ниже:

[illegible][illegible]

На рис. 5 представлены графики динамического диапазона корреляцион-



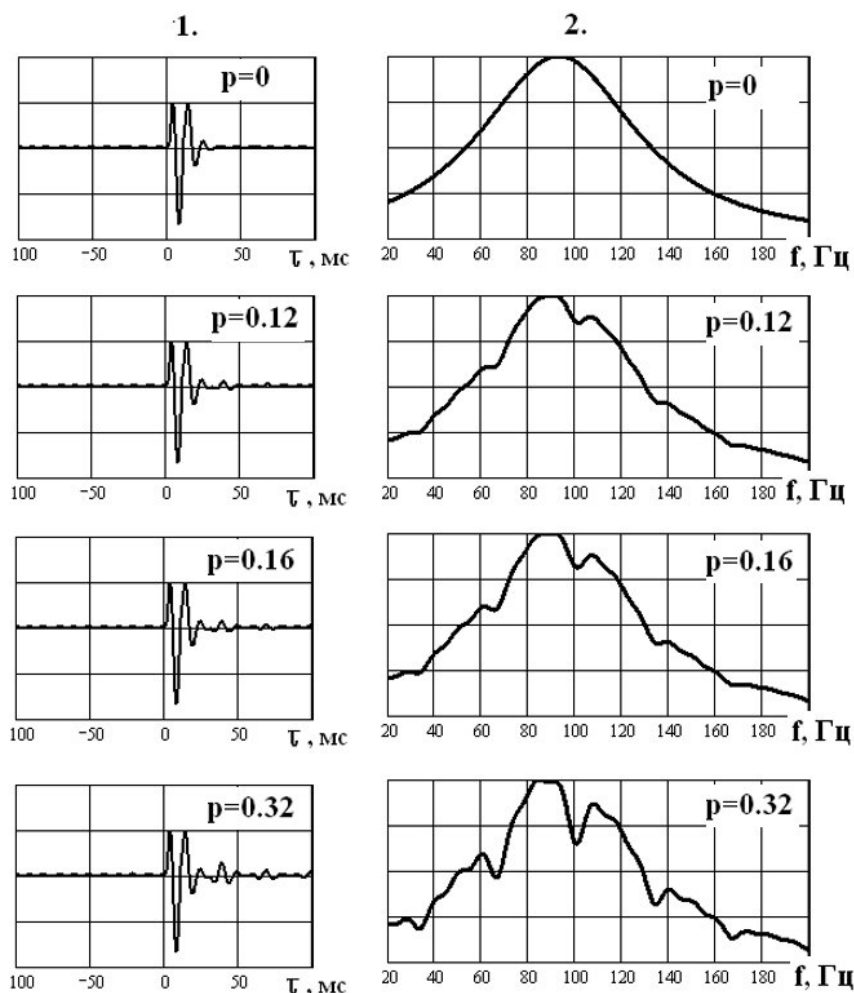
▲ Рис. 5. Графики динамического диапазона корреляционного преобразования $D(\tau)$ для функций взаимной корреляции дополнительных последовательностей, соответствующих низкоскоростной поверхностной волне, при различных значениях параметра (p).

ного преобразования дополнительных последовательностей, формируемых путём раздельной обработки импульсов с положительной и отрицательной полярностью, рассчитанные для доминирующей поверхностной волны ($f_{\text{вид}} = 26$ Гц, $\beta = 90$, $n = 1,9$) при различных значениях параметра p . Из приведённого рисунка можно видеть, что для $p \leq 0,12-0,16$, т.е. при условии если в частотном диапазоне развёртки 10 – 80 Гц амплитуда импульсов изменяется не более чем в 1,3 – 1,4 раза, или же в частотном диапазоне развёртки 10-30 Гц не более чем в 1,15 – 1,2 раза, динамический диапазон корреляционного преобразования доминирующих поверхностных волн в интервале $\tau = 0,3 - 1,0$ с составляет не менее 65-62 дБ. Такие значения динамического диапазона преобразования в ближней зоне корреляционных импульсов повер-

хностных помех позволяют практически исключить мешающее влияние корреляционного фона на целевые отражённые волны при инженерных изысканиях.

При значениях же параметра $p = 0,32$, т.е. при двух - кратном изменении амплитуды импульсов в пределах частотного интервала развёрток 10-80 Гц, динамический диапазон преобразования дополнительных последовательностей для поверхностных помех в указанном временном отрезке составляет не менее 56 дБ, что также превышает динамический диапазон преобразования при работе с однополярными кодовыми функциями. Однако очевидно, что эффективность кодоимпульсного метода определяется не только уровнем корреляционного фона, но и динамикой главных максимумов ФВК полезных сигналов.

► Рис. 6. ФВК (1) и амплитудные спектры главных максимумов ФВК (2) двухполярных дополнительных последовательностей, рассчитанные для целевых отражений, при различных значениях параметра p ($\tau_0 = 30$ мс)



На рис. 6 представлены главные максимумы ФВК дополнительных последовательностей, и соответствующие им амплитудные спектры, рассчитанные для целевых отражений, регистрируемых при инженерных изысканиях ($f_{\text{вид}} = 93$ Гц, $\beta = 300$, $n = 2,1$). При моделировании значения параметра p изменялись в данном случае от нуля до 0,32, тактовый период следования импульсов t_0 равнялся 30 м. Анализ графиков, представленных на рис. 6, свидетельствует о том, что при использовании дополнительных последовательностей главные максимумы ФВК целевых отражений и соответствующие им спектры практически не искажаются если $p \leq 0,12-0,16$. При более высоких же значениях параметра p наблюдается заметное усиление боковых пульсаций главных максимумов ФВК, что в свою очередь обуславливает заметные искажения формы амплитудных спектров корреляционных импульсов.

Заключение

1. Безусловный интерес представляют исследования возможности и целесообразности применения для инженерной сейсморазведки кодоимпульсного метода с использованием малогабаритного переносного излучателя, возбуждающего не только продольные, но и поперечные колебания. Технология кодоимпульсного накопления колебаний, отличающаяся высокой помехоустойчивостью, позволила бы повысить эффективность инженерных изысканий путём формирования стабильные по динамике мало амплитудных широкополосных сигналов.

2. Для реализации кодоимпульсного метода с целью решения задач инженерной сейсморазведки весьма перспективным при возбуждении поля продольных колебаний является применение однополярных кодовых функций ЛИЧ с максимальной частотой следования импульсов, равной 150-200 Гц. При таких пара-

метрах кодоимпульсного сигнала спектр корреляционных импульсов целевых отражений для продольных колебаний при инженерных изысканиях сохраняет высокочастотные гармонические составляющие, а динамический диапазон корреляционного преобразования для доминирующих поверхностных помех соответствуют 40 – 53 дБ при $\tau = 0,11 - 0,6$ с, что позволяет использовать такие последовательности при условии, если амплитуда помех не более, чем на ≈ 30 дБ превышает уровень полезных сигналов.

3. Однополярные последовательности ЛИП отличаются от последовательностей ЛИЧ значительно более высоким уровнем корреляционного фона в ближней зоне ФВК. Так, в интервале времени $\tau = 0,11 - 0,6$ с динамический диапазон преобразования низкоскоростных помех соответствуют 25 – 50 дБ, что не позволяет применять такие развёртки для решения задач инженерной сейсморазведки.

4. Уменьшить интенсивность корреляционного фона при кодоимпульсном накоплении можно, как известно, путём применения двухполярных дополнительные последовательности с раздельной отработкой импульсов с положительной и отрицательной полярностью. Для формирования дополнительных последовательностей могут быть использованы излучатели, для которых амплитуда импульсов уменьшается не более чем в 1,3-1,4 раза с увеличением частоты следования от 10 Гц до 80 Гц, или не более чем в 1,15-1,2 раза с увеличением частоты следования от 10 Гц до 30 Гц. При таких параметрах излучателя динамика корреляционных импульсов дополнительных последовательностей, соответствующих целевым отраженным продольным волнам, регистрируемым при инженерных изысканиях, практически не искажается, а корреляционный фон, формируемый доминирующими повер-

хностными помехами, практически не оказывает мешающего влияния на полезную запись.

5. При использовании двухполярных дополнительных развёрток технический руководитель работ может задавать относительно низкие значения тактовой частоты, что существенно облегчает технические требования при разработке кодоимпульсных излучателей.

6. При формировании поля поперечных колебаний при инженерных изысканиях с применением кодоимпульсного метода перспективными также являются двухполярные дополнительные последовательности наряду с однополярными развёртками ЛИЧ с максимальной частотой следования импульсов $F_{\max} = 60 - 70$ Гц.

Литература

1. Варакин Л.Е., 1970, Теория сложных сигналов. М.: Сов. радио, 376 с.
2. Кострыгин Ю.П., 2002, Сейсморазведка на сложных сигналах. Тверь: Изд-во ГЕРС, 416 с.
3. Кострыгин Ю.П., Колесников Д.А., 2011, Оценка влияния амплитудной неидентичности импульсов в развёртках на эффективность кодоимпульсного накопления сейсмических колебаний//Технологии сейсморазведки. №2. С. 97-108.
4. Кострыгин Ю.П., Колесников Д.А., 2010, Оценка возможности повышения эффективности кодоимпульсного накопления сейсмических колебаний с использованием однополярных кодов ЛИЧ// Технологии сейсморазведки. №3. С. 110-114.

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

6. 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: Наук. думка, 22-26 Рудомеха Н.Н., Горшков.

7. Рудомеха Н.Н., 2012, Оценка эффективности сейсмоисточника "КВАНТ" при инженерной сейсморазведке // Материалы 2-й Международной научно-практической конференции "Сочи-2012", С. 4.

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

Подробнее об авторах



Кострыгин
Юрий Петрович

директор
ООО «Новоросморгео»,
доктор технических
наук



Удалый
Михаил Николаевич

ООО «Ильинская
геофизическая
экспедиция»,
ведущий геофизик