

К обоснованию создания кодоимпульсного источника сейсмических волн

■ Шайдуров Г. Я., Кудинов Д. С., Щитников А. А.,

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г.Новосибирск

Воронцов Ю. С., ООО НПФ «Мезон»

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г.Новосибирск

Копылов М. А., Минусинский филиал ООО «Эвенкиягеофизика», г.Минусинск

В статье рассматриваются возможности создания сейсмоисточника на основе модуляции сейсмического сигнала псевдослучайной кодовой последовательностью. Дано обоснование расширения полосы частот при воздействии кодоимпульсного источника на грунт за счет использования двуполярных импульсов.

Актуальность проблемы

Имеющиеся на вооружении сейсморазведки невзрывные источники вибрационного типа (далее «вибраторы») и невзрывные источники импульсного типа (далее «ИНИ») обладают рядом существенных недостатков:

1. «Вибраторы» имеют большую массу и высокую стоимость, превышающие такие же показатели «ИНИ» в 2-3 раза, а поступающие с сейсмоисточников сигналы позволяют оценивать отношение сигнал/шум лишь после корреляционной обработки.

2. Выпускаемые в России ИНИ не обеспечивают энергетический потенциал, необходимый при работе в условиях высокого уровня промышленных помех и собственных вибрационных помех транспортной машины.

По этой причине, для увеличения отношения сигнал/шум используют групповую работу нескольких источников, либо режим длительного накопления путем увеличения числа ударов, что снижает производительность работ.

Экономически оправдано применение метода параллельной независимой работы нескольких источников, что требует для снижения взаимных помех разноса источников по площади на значительные расстояния и вызывает дополнительные экономические потери.

Третий тип источников – кодоимпульсные (КДИ), несмотря на ожидаемые преимущества по массе, цене и помехоустойчивости, промышленного применения не нашел.

Между тем, режим КДИ на базе импульсной технологии заслуживает внимания разработчиков, поскольку дает следующие ощутимые преимущества:

1. Обеспечение повышения отношения сигнал/шум за счет увеличения базы зондирующего сигнала при псевдослучайной, либо частотной модуляции их последовательностей. Под базой сигнала понимается произведение полосы рабочих частот на длительность посылки $B = \Delta f \cdot T$.

2. Обеспечение подавления всех видов помех, сосредоточенных по спектру – промышленных, вибрационных и т.п.

3. Существенное снижение за счет большой базы сигнала мощности излучателя, практически на величину используемой базы сигнала.

По этой причине на порядок уменьшается цена излучателя.

4. Возможность введения адаптивного электронного управления спектром излучаемого сигнала.

5. Повышение безопасности работы за счет снижения в 5 раз напряжения питания выходного блока преобразования электрической энергии в механическую.

6. Обеспечение стабильности амплитуды, длительности и формы излучаемых импульсов, поскольку их можно формировать без использования накопительных конденсаторов, а в качестве источников питания можно использовать аккумуляторы, либо суперконденсаторы.

7. С учетом существенного снижения мощности удара обеспечивается оптимальный режим работы грунта непосредственно под опорной плитой в рамках линейной части модуля Юнга. Одновременно это повышает экологичность работы источника.

8. Существенное повышение производительности работы источника по сравнению с изделиями «Енисей» за счет исключения пассивных пауз между излучаемыми импульсами.

Оценим энергетический выигрыш, получаемый КДИ, по сравнению с источником «Енисей КЭМ-4» с мощностью удара в 100 т при одинаковом времени излучения, например, $T=60\text{с}$, т.е. 12 ударов «Енисея» и одна ПСП-реализация КДИ.

Энергия 12 ударов «Енисея» по 5 мс каждый

$$E_E = I_E^2 \tau n \quad (1)$$

Энергия, излучаемая КДИ

$$E_K = I_K^2 \tau B \quad (2)$$

где I_E и I_K – ток в обмотках возбуждения «Енисея» и КДИ, соответственно; τ – длительность импульса.

База сигнала ПСП КДИ

$$B = \Delta f \cdot T = \frac{T}{2\tau} \quad (3)$$

Если $T=60\text{с}$, $f\Delta=80\text{А}\ddot{\text{o}}$, то $B=4800$.

Выигрыш КДИ составит

$$\frac{E_K}{E_E} = \frac{I_K^2 B}{I_E^2 n} \quad (4)$$

При равенстве токов

$$I_K = I_E, \quad \frac{E_K}{E_E} = \frac{B}{n};$$

Это означает, что для обеспечения одинакового отношения сигнал/шум в сейсмоприемнике амплитуда импульса тока в КДИ источника может быть сниже-

на в $\sqrt{\frac{B}{n}} = 20$ раз.

Собственно повышенное отношение сигнал/шум обеспечивается вибрационными источниками за счет большой базы его сигнала.

При длине свипа в 10 с и полосе излучаемых частот $f\Delta=80\text{А}\ddot{\text{o}}$ база сигнала вибратора составляет $B_a=800$, что позволяет в потенциале снизить мощность его сигнала излучения за половину периода на такую же величину.

Таким образом, мы еще раз убеждаемся, что широкополосные сигналы с большой базой являются в энергетическом смысле чрезвычайно перспективными.

Далее рассмотрим некоторые физические причины, из-за которых КДИ не получили должного признания в практике.

В работе [1] рассмотрены проблемы формирования оптимальных сигналов КДИ в пределах ограниченного спектра излучаемых частот 10÷80 Гц, определяемого существующими параметрами электромагнитных импульсных невзрывных источников «Енисей» и «Геосейс», однако без учета частотной зависимости формирующей среды.

Между тем сигналы в виде псевдослучайной последовательности импульсов

ПСП нашли широкое применение в радиоэлектронике по причине частотной независимости среды передачи радиосигнала через атмосферу. В сейсморазведке же канал формирования и передачи акустического сигнала существенно частотно-зависимый.

Известно, что для всех типов невзрывных источников наблюдаемый максимум спектральной плотности сигнала находится в пределах 20÷40 Гц.

Основной вклад в формирование спектра зондирующего сигнала невзрывных источников вносит участок грунта под плитой – антенной на глубину порядка 2D (D – диаметр плиты).

В целом передаточная функция излучатель – георазрез – приемник описывается частотной характеристикой вида:

$$\Phi(j\omega) = \frac{A}{(\alpha_1 + j\omega)(\alpha_2 + j\omega)} \frac{B}{\beta + j\omega} e^{-c\bar{t}}, \quad (5)$$

где коэффициенты A, B, C, α_1 , α_2 , β зависят от упругих и вязких свойств среды и массы излучателя.

При этом, член

$$\frac{A}{(\alpha_1 + j\omega)(\alpha_2 + j\omega)} \quad (6)$$

описывает избирательные свойства источника излучения.

Апериодический множитель

$$\frac{B}{\beta + j\omega} e^{-c\bar{t}}$$

– несет информацию об исследуемом георазрезе, $\bar{t}$ – запаздывание сигнала в георазрезе.

Множитель (6) можно также записать через электрический аналог механической модели передачи усилия излучателя на подстилающий грунт [2]:

$$\frac{A}{(\alpha_1 + j\omega)(\alpha_2 + j\omega)} = \frac{J_p C_k}{1 + j\omega C_k R_k + \omega^2 m_{\text{пр}} C_k} \quad (7)$$

$$J_p = \frac{M_{\text{зп}} m_{\text{пр}} (V_1 - V_2)}{M_{\text{зп}} + m_{\text{пр}}}$$

Здесь:

$M_{\text{зп}}$ – масса рабочей плиты излучателя;

$m_{\text{пр}}$ – масса присоединенного объема грунта;

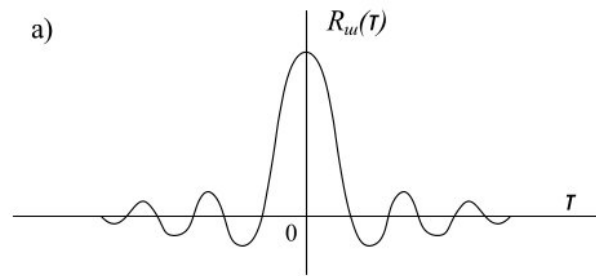
V_1, V_2 – скорости тела до удара и после него;

C_k – параметр упругих свойств грунта.

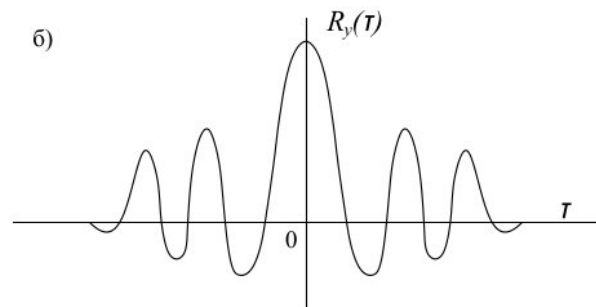
Резонансная частота:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{m_{\text{пр}} C_k}}$$

Прохождение ПСП через такой канал кардинально изменяет вид свертки ПСП, снижает разрешающую способность по дальности и вносит существенную зависимость от параметров грунта (рис. 1).



а) широкополосный канал



б) узкополосный канал

▲ Рис. 1. Вид автокорреляционной функции ПСП

Таким образом, неучет фактора (5) приводил, на наш взгляд, к неудачам создания конкурентоспособного кодоимпульсного источника.

В вибраторах фактор частотной зависимости сейсмического канала учитывается подбором формы свипа (адаптивный источник).

Создание адаптивного кодоимпульсного ПСП источника возможно лишь за

▼ Табл. 1.

Параметр	Тип грунта			
	лед	мел	песок	грязь, мелкая глина
$C_H, \text{м/н}$	$2,3 \times 10^{-10}$	$0,79 \times 10^{-10}$	$1,3 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-8}$
$R_H(\text{нс})/\text{м}$	$3,25 \times 10^6$	7×10^6	$2,15 \times 10^6$	$10^5 / 10^6$
$m_{\text{пр}}, \text{кг}$	520	770	1240	150
$f_p, \text{Гц}$	460	640	130	38

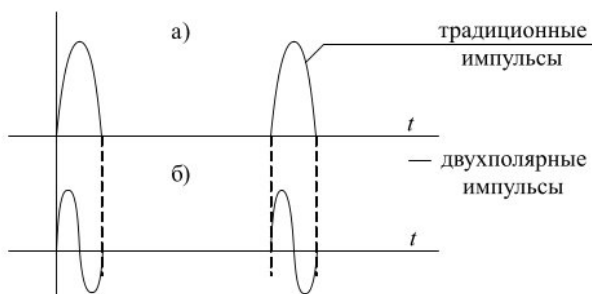
счет введения операции «выбеливания» сейсмического канала. Здесь «выбеливание» является производной от термина «белый шум» (широкополосный шум).

Это означает, что (5) нужно умножить на обратную функцию частоты:

$$\Phi_{\text{сб}}(j\omega) = (\alpha_1 + j\omega)(\alpha_2 + j\omega) \quad (8)$$

Реализовать подобную операцию можно путем двойного дифференцирования сигнала в приемнике, но лучше учесть в конструкции излучателя, например введением режима двух- полярного возбуждения, т.е. излучения импульса вида (Рис. 2 б).

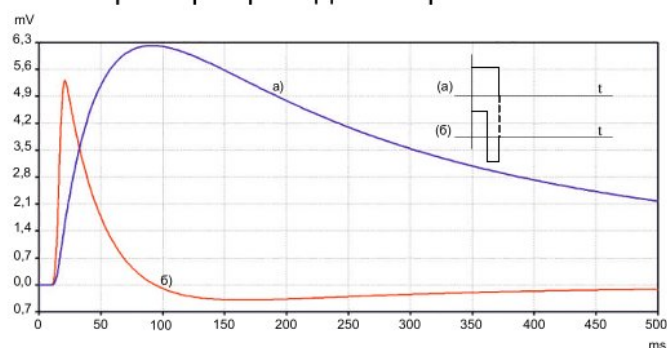
Целесообразным вариантом получения равномерной спектральной функции излучаемого сигнала является подбор формы спектра тока возбуждения импульсного источника, обратной (5), путем нелинейно изменяемой частоты в свипе, либо периода повторения импульсной последовательности [1, 3].



▲ Рис. 2. Форма импульсов излучения «Енисей КЭМ-4» (а) и двухполярного КДИ (б)

На рис. 3 показаны расчетные эпюры прохождения однополярного и двухполярного прямоугольного сигнала длительностью 5 мс через фильтр нижних частот с ограниченной сверху полосой в 100 Гц.

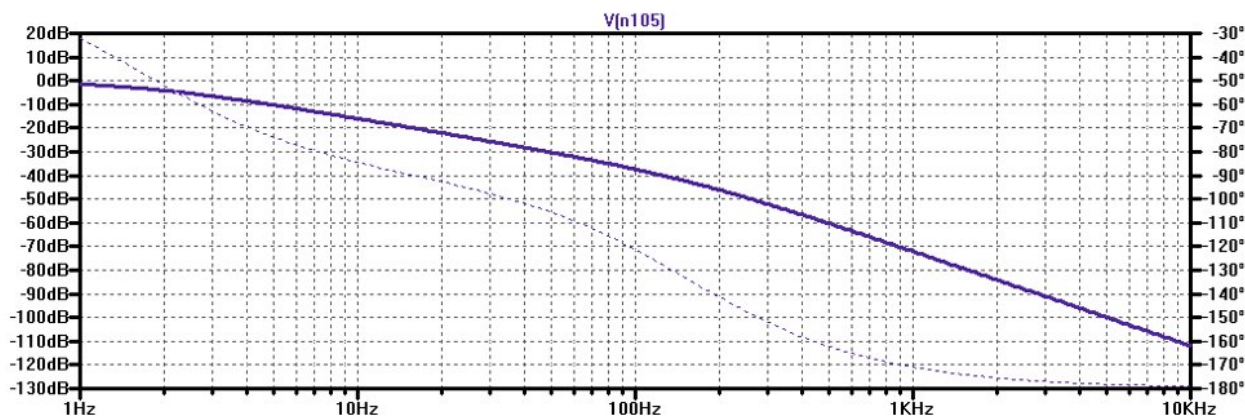
АЧХ фильтра приведена на рис. 4.



▲ Рис. 3. Прохождение однополярного (а) и двухполярного сигнала (б) прямоугольных импульсов через фильтр нижних частот (а) однополярный импульс; (б) двухполярный

Как видно из этого рисунка, двухполярный режим дифференцирует передаточную характеристику среды, т.е. в выражении (5) убирает один частотный полюс, уменьшает эффективную длительность сигнала излучения и тем самым расширяет спектр излучаемых сигналов в сторону высоких частот.

Второй полюс в (5) может быть убран за счет модуляции амплитуды импульсов в ПСП в зависимости от измеряемых специальными датчиками свойств подстилающего грунта, т.е. введением адаптивного режима управления импульсного излучения.



▲ Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтра

Физически это означает, что двухполярный режим, убирая постоянную составляющую зондирующего сигнала, существенно снижает начальный запас энергии в колебательной системе источника плита – активная зона грунта. Одним из вариантов компенсации второго полюса в (5) может быть дифференцирование сигнала на приемной стороне.

В адаптивном варианте [3], безусловно, необходимо включить в состав источника управляющие датчики параметров грунта – упругости и вязкости.

Таким образом, режим КДИ на базе импульсной технологии заслуживает внимания разработчиков, поскольку обеспечивает ощутимые преимущества. Вместе с тем, для создания конкурентоспособного источника КДИ требуется проведение дополнительных исследований.

Литература

1. Ю. П. Кострыгин, Д. А. Колесников. Исследование возможностей кодоимпульсного метода сейсмической разведки. Приборы и системы разведочной геофизики. Саратов, ЕАГО, 2012, №3, с. 73-79.
2. М. Б. Шнеерсон, В. В. Майоров. Наземная невзрывная сейсморазведка. М.: Недра, 1988, 235 с.
3. А. П. Жуков, И. В. Тищенко, Р. М. Калимулин и др. Адаптивная вибросейсморазведка в условиях неоднородного строения вер-

хней части геологического разреза. Технология сейсморазведки. 2011, №2, с.5-22.

4. В. А. Детков, В. В. Ивашин, И. Г. Федотов, Г. Я. Шайдуров. Способ невзрывного воздействия на грунт при сейсмической разведке.

5. Патент РФ 2372629 от 2.06.2008.