

Кажущаяся или фиктивная нелинейность. Практика применения при широкополосном воздействии на среду

■ Архипов А.А., ООО «Геошельф-Сервис», г. Геленджик

Аннотация. Исследования проявляемых геологической средой нелинейных свойств, с целью их практического применения, проводятся уже более тридцати лет. Однако ранее автору не встречались результаты анализа «нелинейных» эффектов при широкополосном воздействии на среду, сопоставимых по выраженности с линейными составляющими волнового поля. В статье предлагается ввести новый термин - «кажущаяся или фиктивная нелинейность», а также приводится пример практического применения наблюдаемых явлений.

Введение

Вопрос практического применения результатов исследований нелинейных свойств среды многократно поднимался многими специалистами [2-12, 14], однако до сих пор существовал ряд проблем, существенно ограничивающих внедрение нелинейных теорий в обязательный граф обработки материалов сейсморазведки.

Подавляющее большинство проявлений нелинейности в сейсмическом диапазоне частот рассматривается в рамках нелинейного закона Гука и нелинейности связи напряжений и деформации (геометрическая и физическая нелинейности). Несмотря на доказанную нелинейность геологической среды, обратные задачи принято решать традиционным линеаризованным способом, что обусловлено вполне оправданным скептическим отношением специалистов к нелинейной теории распространения сейсмических волн, учитывая, что:

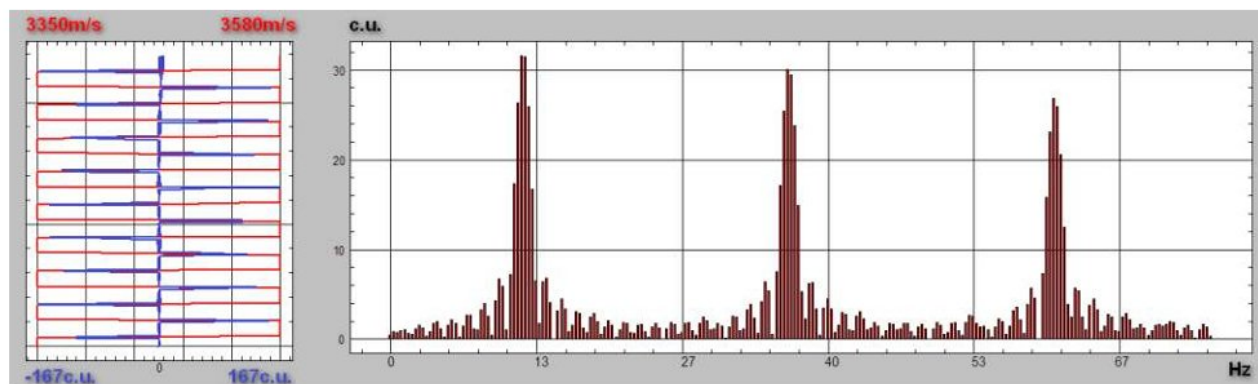
а) нелинейные составляющие волнового поля при регистрации на дневной поверхности проявляются на порядки экстенсивнее линейных [6];

б) в основном исследования нелинейных эффектов проводились при воздействии на среду монохроматическими сигналами (или их группой) [2-12, 14].

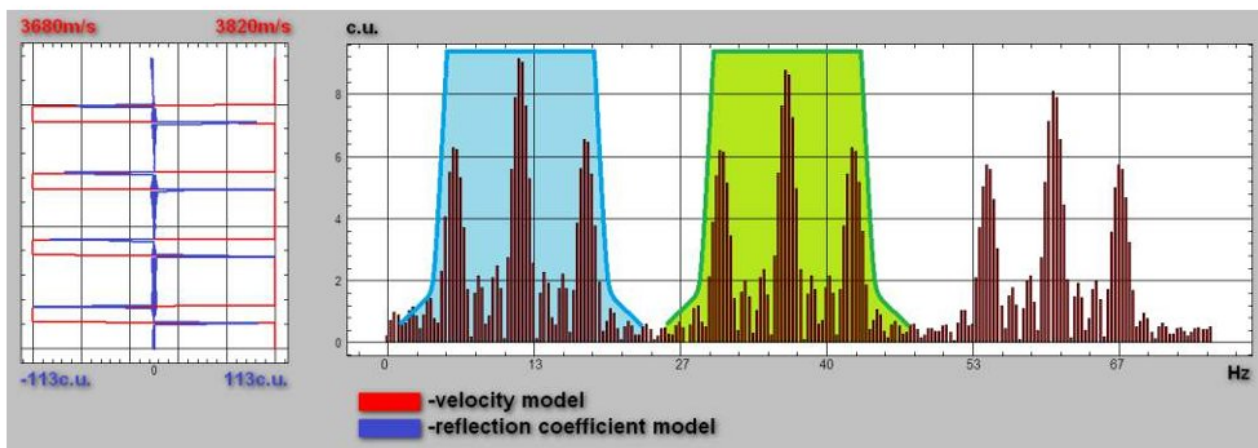
Последняя особенность организации экспериментов исключает возможность применения результатов исследований предыдущих лет к материалам традиционной широкополосной сейсморазведки. В силу необходимости монохроматического воздействия на среду, изучение нелинейных свойств было осуществимо лишь при вибрационных наблюдениях, что ограничивало область применения сухопутными работами.

Нелинейность при широкополосном воздействии

До сих пор практическому рассмотрению подвергались «сложные» среды при «простом» воздействии (естественная геологическая среда при монохроматическом зондирующем сигнале). Что же происходит в противоположном случае («простая» среда при «сложном», широкополосном воздействии)? Представим периодическую линейную модель с чередованием пластов одинаковой мощности и фиксированными скоростями пробега продольной волны. Упрощенно амплитудный спектр однократных отражений (при широкополосном воздействии и нормальном падении луча) от такой среды представляет собой спектр дифференцированного меандра (рис.1а, красная кривая – модель среды, синяя – коэффициенты отражения, в



▲ Рис. 1а. Модель среды с пластами равной мощности и частотный спектр линейного отклика среды при широкополосном воздействии.



▲ Рис. 1б. Модель среды с пластами разной мощности и частотный спектр линейного отклика среды при широкополосном воздействии.

правой части – частотный спектр). Именно этот эффект связывают с преобладающим резонансом и, соответственно, с преобладающей мощностью пластов в интервале исследования, что в немногих более сложных средах – некорректно.

К примеру, рассмотрим линейную среду с изменённой скважностью «мандра» (рис.1б, красная кривая – модель среды, синяя – коэффициенты отражения, в правой части – частотный спектр). Спектр однократных отражений от границ данной модели существенно более насыщен. Остановимся подробнее на первой группе частот: $f_0=6$ Гц, $f_1=12$ Гц, $f_2=18$ Гц. Вторая составляющая (f_1) совпадает с резонансной (собственной) частотой слоя малой мощности, однако ни первая (f_0), ни третья (f_2) частоты анализи-

руемой части спектра не характеризуют преобладающую мощность пластов среды. Схожий сигнал можно получить путём нелинейного (кубического) преобразования монохроматического воздействия частоты f_0 :

$$x_0(t) = \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0),$$

$$c_0(t) = -k_0 x_0(t) + \frac{4}{3} k_0 x_0(t)^2 + 2k_0 x_0(t)^3,$$

где k_0 – масштабирующий коэффициент, $x_0(t)$ – линейный монохроматический сигнал воздействия (зондирующий сигнал), $c_0(t)$ – преобразование.

Вероятно, именно по этой причине в некоторых случаях проявляемые эффекты (рис.1б) ошибочно связывают с нелинейностью среды. Автор предлагает использовать термин кажущейся или фиктивной нелинейности для описания

наблюдаемых особенностей формирования частотного спектра волнового поля.

С прикладной точки зрения рассматриваемая псевдонелинейная форма отклика среды лишена описанных недостатков истинной нелинейности, усложняющих практику применения. Воздействие на среду происходит широкополосным сигналом, а амплитуды «вторичных» составляющих ($f_0=6\text{Гц}$, $f_2=18\text{Гц}$) сопоставимы с «первичной» ($f_1=12\text{Гц}$).

Практика применения

Ранее автор неоднократно приводил в своих докладах результаты практических применений разработанной технологии анализа проявлений нелинейных свойств среды с целью расширения полосы полезного волнового сигнала путём постобработки материалов сейсморазведки ("Разведка и добыча 2013", "41-я сессия семинара им. Д.Г. Успенского", "Четвёртая международная научно-практическая конференция ЕАГО", "EAGE Геомодель-2014", "XVIII научно-практическая конференция "Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала ХМАО-Югры"). Основной гипотезой, лежащей в основе работ, является гипотеза об одном из частных случаев проявления нелинейности геологической среды (квадратичной нелинейности), совпадающим с математикой амплитудного модулятора в случае воздействия на

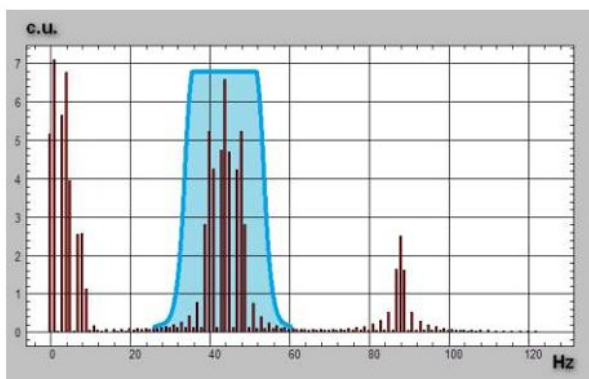
среду суммой двух монохроматических сигналов (при условии полосовой фильтрации за счёт АЧХ регистрирующего устройства, естественного затухания ВЧ части спектра и/или постобработки) (рис.2).

Соответственно, в результате детектирования (демодуляции) сигнала в полосе фильтра (выделенная область спектра на рис.2) однозначно восстанавливается гармоника на частоте $f_4=4\text{Гц}$ находящаяся за пределами полосы регистрации сигнала сейсмоприёмником.

Аналогичный амплитудной модуляции процесс «кажущегося переноса» сигнала в область высоких частот происходит при ранее упомянутой кажущейся или фиктивной нелинейности (рис.1б, зелёная область – «кажущийся перенос» синей области). К примеру, при условии подавления сейсмоустройством составляющей на частоте $f_0=6\text{Гц}$, детектированием сигнала в полосе второго фильтра (выделенная зелёным цветом область на рис.1б) её так же возможно однозначно восстановить (как и в случае с частотой $f_4=4\text{Гц}$ при истинной нелинейности на рис. 2).

Влияние ширины спектра полезного сигнала на решение обратной задачи

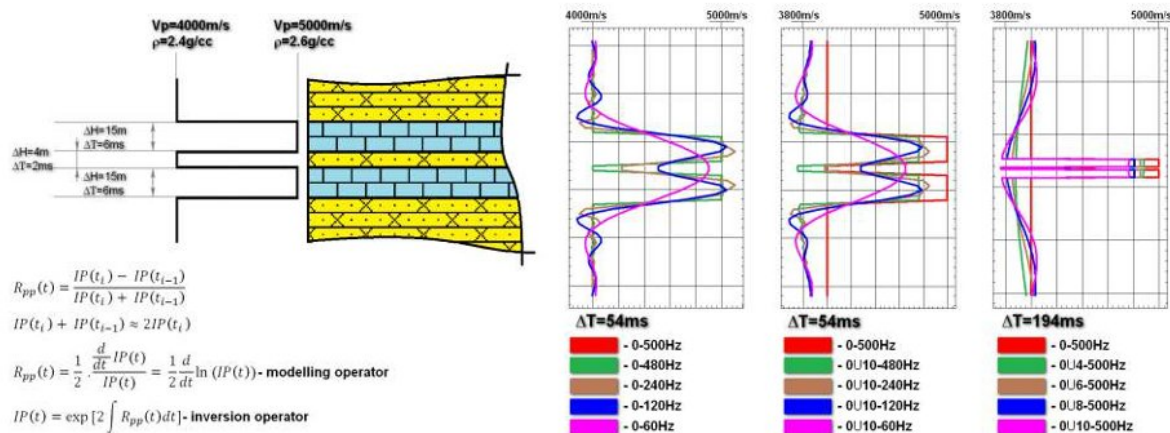
Согласно результатам одномерного моделирования (рис.3) и ряду исследований специалистов [13], только при условии наличия полезного сигнала в



▲ Рис. 2. Спектр отклика однопластовой среды с сильной квадратичной нелинейностью.

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \sin(\omega_3) + \sin(\omega_4), \\ c_1(t) &= a_1 x_1(t) + a_2 x_1(t)^2 = \dots \\ &= a_1 \sin(\omega_3 t) + a_1 \sin(\omega_4 t) + a_2 \\ &\quad - \frac{1}{2} a_2 \cos(2\omega_3 t) + a_2 (\cos((\omega_3 - \omega_4) t) \\ &\quad - \cos((\omega_3 + \omega_4) t)) - \frac{1}{2} a_2 \cos(2\omega_4 t), \end{aligned}$$

где ω_3, ω_4 – угловые частоты, соответствующие $f_3 = 44\text{Гц}$, $f_4 = 4\text{Гц}$, $x_1(t)$ – сигнал воздействия, $c_1(t)$ – преобразование, a_1, a_2 – коэффициенты.



▲ Рис. 3. Результаты моделирования влияния ширины полосы спектра полезного сигнала сейсморазведки на решение обратной динамической задачи.

низкочастотном диапазоне волновой записи возможно получить достоверную оценку абсолютных значений параметров разреза при решении обратной задачи.

Доказано, что компенсация недостатка полезного сигнала в НЧ области записи путём использования трендов, полученных в результате кинематической обработки материалов сейсморазведки - некорректно, а интерполяция / экстраполяция скважинных данных приводит к существенному снижению латерального разрешения и ошибкам инверсии.

Применение специальных регистрирующих устройств, позволяющих расширить спектр полезного сигнала, проблему полностью не решает, не говоря уже о необходимости проведения повторных сейсморазведочных работ.

Таким образом, корректное расширение спектра полезного сигнала в область низких частот методами обработки данных – крайне актуальная задача.

Вместо заключения.

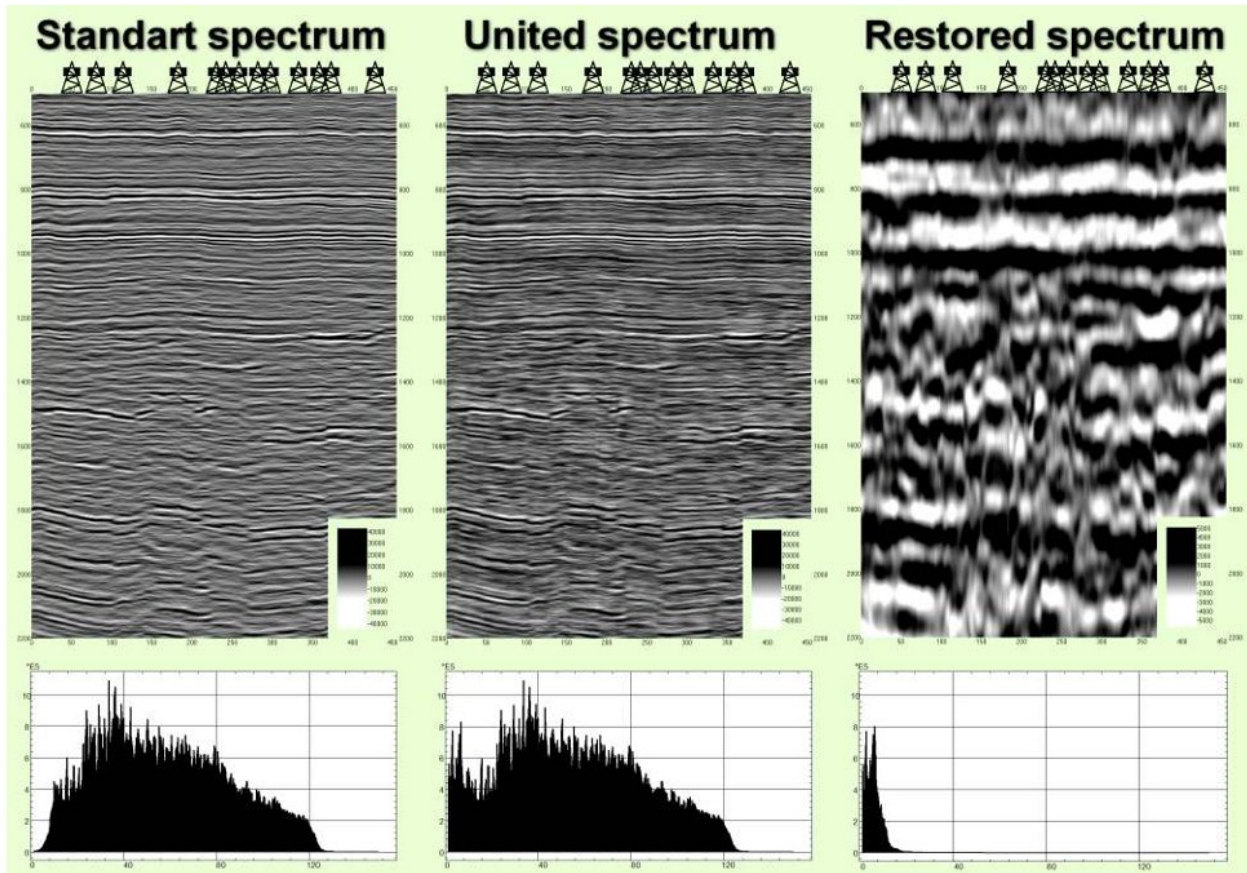
В статье приведен лишь частный случай проявления кажущейся или фиктивной нелинейности, представляющий практический интерес. В общем случае спектры откликов сред при широкополосном воздействии более разнообразны, но общая тенденция «переноса»

или «дублирования» низкочастотного сигнала в области высоких частот сейсмической записи сохраняется.

При полевых измерениях задача расширения спектра полезного сигнала существенно усложняется, но всё же, при условии наличия опорной скважины в объёме сейсморазведочных данных, её решение возможно. В комплексе «ЛИТОСКАН» реализована соответствующая технология, прошедшая успешные испытания на площадях Обской губы, Западной Сибири, Северного Каспия и Республики Башкортостан. Общий объем проведённых работ составил: ~1400 пог.км. 2D и ~800 кв.км. 3D при 26 опорных скважинах.

В настоящее время ведутся работы по усовершенствованию методики расширения спектра полезного сигнала в область высоких частот, оформлены патенты на полезную модель и изобретение [1].

Ниже приведён пример расширения спектра записи в область низких частот по одному из исследуемых в 2014 году объектов (рис.4). В левой части рисунка расположен исходный разрез, в средней - разрез после расширения диапазона полезного сигнала в область низких частот, в правой – восстановленная волновая картина в полосе от 0 Гц до



▲ Рис. 4. Пример результата расширения спектра полезного сигнала сейсморазведки в область низких частот с помощью технологии комплекса «ЛИТОСКАН».

10Гц. Профиль проходит по линии опорных скважин проекта (13скв.).

Предлагаемая технология расширения спектра волновой записи не имеет аналогов, актуальность комплексирования изложенного подхода со всеми, без исключения, методами решения обратной динамической задачи - очевидна.

Автор благодарит коллектив предприятия за помощь при подготовке материалов публикации.

Литература.

1. Архипов А.А. Патент на полезную модель №146947. Приоритет от 05.08.2014. Технологический комплекс для анализа нелинейных свойств среды с целью расширения спектра регистрируемого волнового сигнала.
2. Гущин В.В, Шалашов Г.М. О возможности использования нелинейных сейсмических эффектов в задачах вибрационного

просвечивания Земли. Сборник научных трудов: Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками. Наука, М, с.144-155, 1981

3. Динариев О.Ю., Николаевский В.Н. Нелинейная математическая модель генерации низких частот в спектре сейсмического сигнала. Сборник трудов: Геомеханика. Том 2. АНО «Ижевский институт компьютерных исследований», Ижевск, с.271-276, 2010

4. Динариев О.Ю., Николаевский В.Н. Кратное увеличение периода при распространении волн в упругих телах с диссипативной микроструктурой. Сборник трудов: Геомеханика. Том 2. АНО «Ижевский институт компьютерных исследований», Ижевск, с.277-284, 2010

5. Жуков А.П., Шнеерсон М.Б. Адаптивные и нелинейные методы вибрационной сейсморазведки., Недра, М, с.51-95, 2000

6. Зейгарник В.А., Ключкин В.Н., Кузнецов А.Н. Сейсмические приборы. Т. 45, № 3,

с.41-47, 2009

7. Касьянов Д.А., Шалашов Г.М. О возможности нелинейной сейсмоакустической томографии. Сборник научных трудов: Проблемы геотомографии. Наука, М, с.203-209, 1997

8. Логинов К.И., Жуков А.П., Шнеерсон М.Б, Логинов И.В. Нелинейные волновые поля в акустическом каротаже и вибрационной сейсморазведке. ООО «Издательство ГЕРС», 2012

9. Николаев А.В. Проблемы нелинейной сейсмики. Под ред. А.В.Николаева и И.Н.Галкина. Наука, М, 1987

10. Новожилов В.В., Толоконников Л.А., Черных К.Ф. Нелинейная теория упругости. Механика в СССР за 50 лет. Том 3. Наука, М, с.71-78, 1972

11. Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Исследование нелинейных эффектов частотным анализом виброграмм. Сборник научных трудов: Исследование Земли

невзрывными сейсмическими источниками. Наука, М, с.272-280, 1981

12. Шулакова В.Е. Нелинейные свойства вибросейсмических волновых полей и их использование для прогнозирования коллекторских свойств резервуаров. 2007, автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук

13. Buxton R.L., Davison R. An interpreter's guide to understanding and working with seismic-derived acoustic impedance data. March 2000, The Leading Edge, p.242-256

14. Zhukov A.P., Loginov K.I., Shneerson M.B., Shulakova V.E., Kharisov R.G., Ekimenko V.A. Nonlinear properties of vibrator-generated wavefields and their application to hydrocarbon detection. November 2007, The Leading Edge, p.1395-1402

РЕЦЕНЗЕНТ – доктор физико-математических наук А.А. Никитин

Подробнее об авторе



Архипов
Александр Алексеевич

директор
ООО «Геошельф-
Сервис»