

Г. С. Чернышов^{1}, Д. А. Литвиченко², А. А. Дучков¹*

Методы возбуждения низкочастотных свип-сигналов в сейсморазведочных работах

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Научно-Технический Центр «Газпром нефти», г. Тюмень, Российская Федерация

* e-mail: chernyshovgs@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Расширение полосы частот сигнала вибрационной сейсморазведки позволяет увеличить глубинность, разрешенность данных, снизить уровень корреляционных шумов, повысить отношение сигнал/помеха. Одним из решений понижения начальной частоты свип-сигнала является генерация нелинейных свипов, одним из таких свипов является «maximum displacement sweep». Преимуществом такого свипа является сохранение ровного спектра («полочки») выходного сигнала на всем диапазоне частот. Сложностью построения такого свипа будет учет нелинейной зависимости возможного усилия вибратора от частоты, для частот ниже 5.5 Гц. На данный момент на рынке нет программного обеспечения, которое бы позволило генерировать подобные свип-сигналы, так же в литературе довольно мало исследований по возможности генерации таких свипов для конкретных моделей вибраторов в производственном режиме. В работе предлагается метод построения низкочастотных свипов, аналогичных «maximum displacement sweep». Построенные свипы были протестированы в рамках опытных работ. Результаты тестирования показали возможность генерации предлагаемых свипов вибраторами Nomad 65 Neo. Показано преимущество использования НЧ свипов в сравнении с линейными, по характеристикам регустрируемого волнового поля.

Ключевые слова: вибрационная сейсморазведка, низкочастотные свип-сигналы, корреляционные шумы

G. S. Chernyshov^{1}, D. A. Litvichenko², A. A. Duchkov¹*

Methods for Generating Low Frequency Sweeps in Exploration Seismic

¹ Trofimuk Institute of petroleum Geology and Geophysics, Novosibirsk, Russian Federation

² Gazpromneft's Research and Development Center, Tumen, Russian Federation

* e-mail: chernyshovgs@ipgg.sbras.ru

Abstract. Expanding the frequency band of a vibration seismic signal makes it possible to increase the depth and resolution of data, reduce the level of correlation noise, and increase the signal-to-noise ratio. Expanding the frequency band of a vibration seismic signal makes it possible to increase the depth and resolution of data, reduce the level of correlation noise, and increase the signal-to-noise ratio. The advantage of such a sweep is that it maintains a flat spectrum of the output signal over the entire frequency range. The difficulty of constructing a sweep is that the dependence of the possible force of the vibrator on frequency is nonlinear for frequencies below 5.5 Hz. At the moment, there is no software on the market that would allow generating such sweep signals, and there is also very little research in the literature on the possibility of generating such sweeps for specific models of vibrators in production mode. The paper proposes a method for constructing low-frequency sweeps similar to the “maximum displacement sweep”. The constructed sweeps were tested as part of field experi-

mental work, the test results showed the possibility of generating the proposed sweeps with Nomad 65 Neo vibrators. The advantage of using LF sweeps compared to linear ones in terms of wave field characteristics is shown.

Keywords: Vibroseis, MD sweep, low-frequency sweep

Введение

Расширение полосы частот генерируемого вибрационного сигнала позволяет увеличить глубинность, разрешенность данных, снизить уровень корреляционных шумов, повысить отношение сигнал/помеха [1]. Частотно-зависимое затухания сигнала в среде сильно ограничивает верхнюю границу частот, которые могут быть записаны от глубоких отражателей. Проблема низких частот (НЧ) связана с возможностью их генерации, для современных вибрационных источников уровень нелинейных помех существенно возрастает для частот меньше 5 Гц, а возможность работать на полном приводе доступна с 5.4 Гц [2]. Наиболее распространёнными в производстве являются линейные свипы с минимальной частотой 5-7 Гц, при этом первые несколько Герц генерируются с пониженной амплитудой из-за краевого сглаживания.

Одним из решений понижения начальной частоты свип сигнала является генерация нелинейных свипов, одним из таких свипов является «maximum displacement sweep» [1]. Свип позволяет генерировать частоты меньше чем частота выхода вибратора на полный привод, компенсируя меньшую амплитуду за счет меньшей скорости развертки низких частот. Основным преимуществом такого свипа является сохранение ровного спектра («полочки») выходного сигнала на всем диапазон частот. В данный момент на рынке РФ нет программного обеспечения, которое бы позволило генерировать подобные свип-сигналы. Также в литературе недостаточно описаны возможности генерации таких свипов для конкретных моделей вибраторов в производственном режиме.

В работе предлагается метод построения низкочастотных свипов, аналогичных «maximum displacement sweep». Построенные свипы были протестированы в рамках опытных работ. Результаты тестирования показали возможность генерации предлагаемых свипов вибраторами Nomad 65 Neo. Показано преимущество использования НЧ свипов в сравнении с линейными, по характеристикам регустрируемого волнового поля.

Методы и материалы

В основе генерации НЧ свип-сигналов стоит график изменения максимального усилия источника, основным параметром которой является значение частоты выхода на максимальную мощность вибратора (см. рис. 1) [3, 4].

Функция изменения усилия до частоты полного привода имеет следующий вид [3]:

$$DF(f) = 2\pi^2 M_{rm} X_{rm} f^2,$$

где M – масса реакционной плиты, X – ход реакционной массы, f – частота сигнала, gm – параметры реакционной плиты (reaction mass).

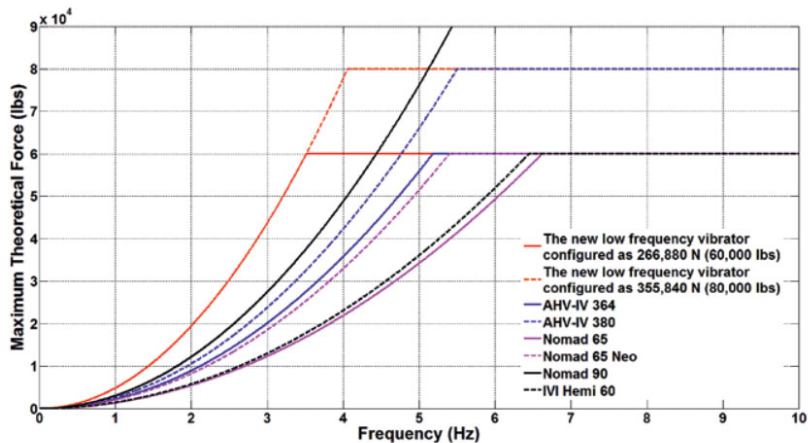


Рисунок 1. График зависимости усилия вибратора от частоты [3]

Свип-сигнал рассчитывается по формуле:

$$a(t) = DF(f_i(t)) \sin\left(2\pi \int_0^t f_i(\tau) d\tau + \alpha\right),$$

где α – начальная фаза свипа, $f_i(t)$ - скорость развертки частоты от времени. Зависимость $f_i(t)$ получается путем обращения мгновенного времени:

$$t_i(f_i) = \int_{f_{min}}^{f_i} 4 \frac{psd(\eta)}{DF^2(\eta)} d\eta,$$

где $psd(\eta)$ – ожидаемая спектральная плотность мощности усилия; выражение под интегралом можно характеризовать как обратную величину к квадрату занижения мощности зависящая от частоты, при частоте больше частоты выхода на полный привод.

Функцию $f_i(\tau)$ можно рассчитать из известных производных для двух частей, до частоты выхода на полное усилие и после, см. рис. 2. Производная для второй части графика является константой:

$$\frac{t_k - t_x}{f_k - f_x}$$

где, f_x – нижняя частота линейной развертки, f_k – верхняя частота линейной развертки, t_x – время начала линейной развертки, t_k – длина свип-сигнала.

Для первой части графика производная должна быть больше в квадрат занижения мощности (рис. 1) – отношение усилия вибратора на низких частотах к максимальному усилию вибратора на высоких частотах:

$$\frac{f_x^2 t_k - t_x}{f^2 f_k - f_x}$$

Подставляя значения полученных функций под синус, производится расчет свип-сигнала с компенсацией занижения усилия вибратора на низких частотах за счет длительности развертки.

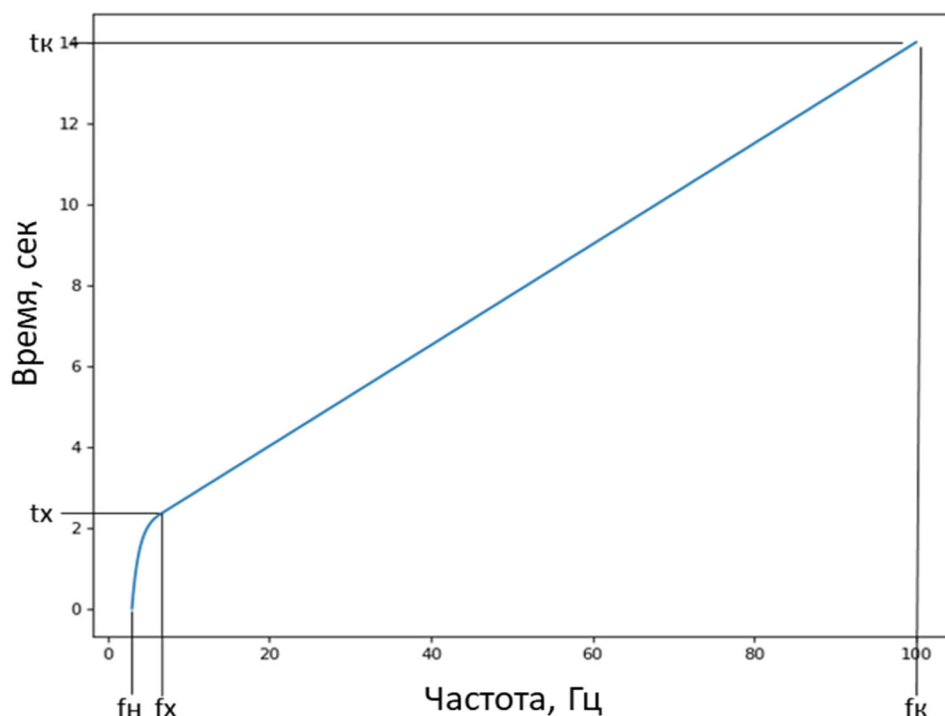


Рисунок 2. График изменения частоты свип-сигнала от времени развертки

На рисунке 3 приводится НЧ свип-сигнал для параметров $f_n = 3$ Гц, $f_x = 6$ Гц, $f_k = 100$ Гц, $t_k = 14$ сек. Дополнительно на краях свип-сигнал сглаживается тэйпером, в качестве окна сглаживания было выбрано окно Хамминга. Длина тэйпера в примере составила 480 мс.

На низких частотах спектр в среднем является постоянным, хоть и неизбежно осложняется эффектом Гиббса, см. рис. 4.

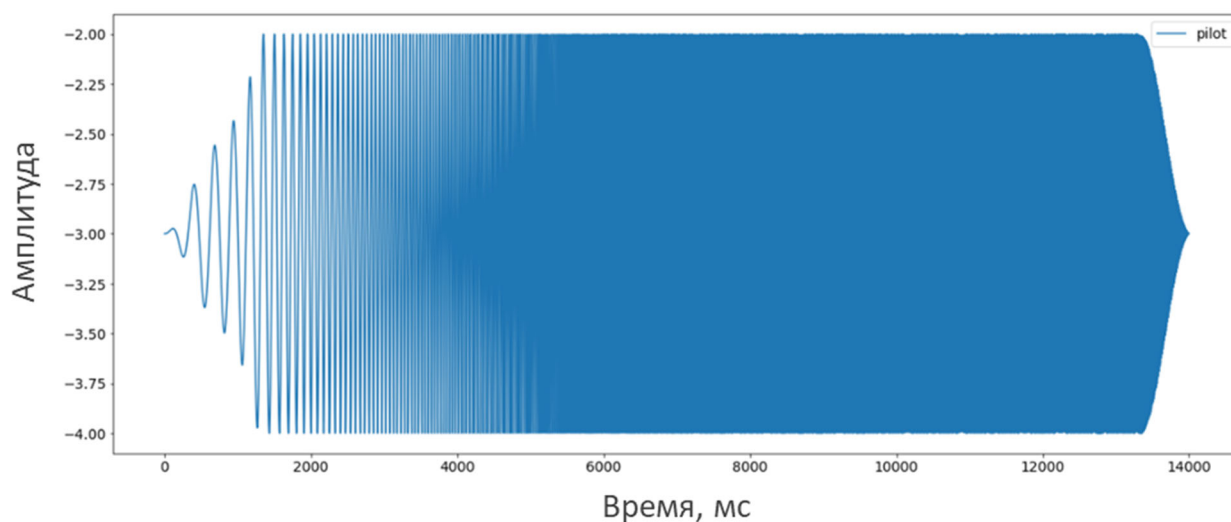


Рисунок 3. Пример генерации «maximum displacement sweep» сигнала

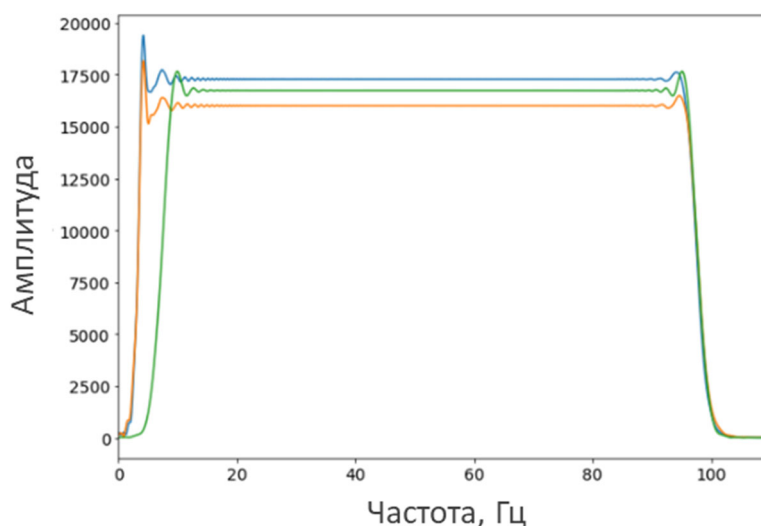


Рисунок 4. Амплитудные спектры НЧ свип сигналов разной длительности в сравнении с спектром линейного свип-сигнала, зеленым – спектр линейного свипа (5-100 Гц, 12 сек), оранжевым – НЧ свипа (3-100 Гц, 12 сек), синим – НЧ свипа (3-100 Гц, 14 сек)

Результаты

Тестирование НЧ свип-сигналов и выбор оптимальных параметров проводился в рамках опытно-методических работ (ОМР) вибраторами Nomad 65 Neo. Подбираемыми параметрами являются: F_n – начальная частота, F_c – частота выхода на максимальное усиление, F_k – конечная частота, длина сигнала, длина тэйперинга. Целью является получение ровного спектра выходного волнового поля в диапазоне 5-100Гц.

Перебор параметров возбуждения НЧ свип-сигналов осуществлялся по программе, указанной в Табл. 1.

Перебор параметров возбуждения

Тест, №	Этап	Усилие прижима, %	Fн, Гц	Fс, Гц	Fк, Гц	Длина свип-сигнала, с	Тэйперинг свип-сигнала, [нач., кон.] мс
1	1	70	3	6.7	100	14	640, 640
2		70	3	5.5	100	14	640, 640
3		70	3	8	100	14	640, 640
4		70	3	5.5	100	18	720, 720
5		70	3	6.7	100	12	480, 480
6		70	3	5.5	100	12	480, 480
7	2	70	4	5.5	100	12	480, 480
8		70	4	6	100	18	720, 720
9	3	70	5	7	100	18	720, 720
10	4	70	3	9	100	14	640, 640

Проведен анализ волнового поля, зарегистрированного приемной расстановкой. На рис. 5 приводится сравнение ближней линии приема к источнику; слева – линейный свип 5-100 Гц, справа НЧ свип 3-100 Гц. Низкие частоты дают наибольший вклад в поверхностные волны, но визуально так же отмечается меньший уровень корреляционных шумов до первых вступлений у НЧ свипа. Такой эффект можно объяснить повышением разрешенности импульса Клаудера у НЧ свипа за счет расширения спектра в область низких частот.

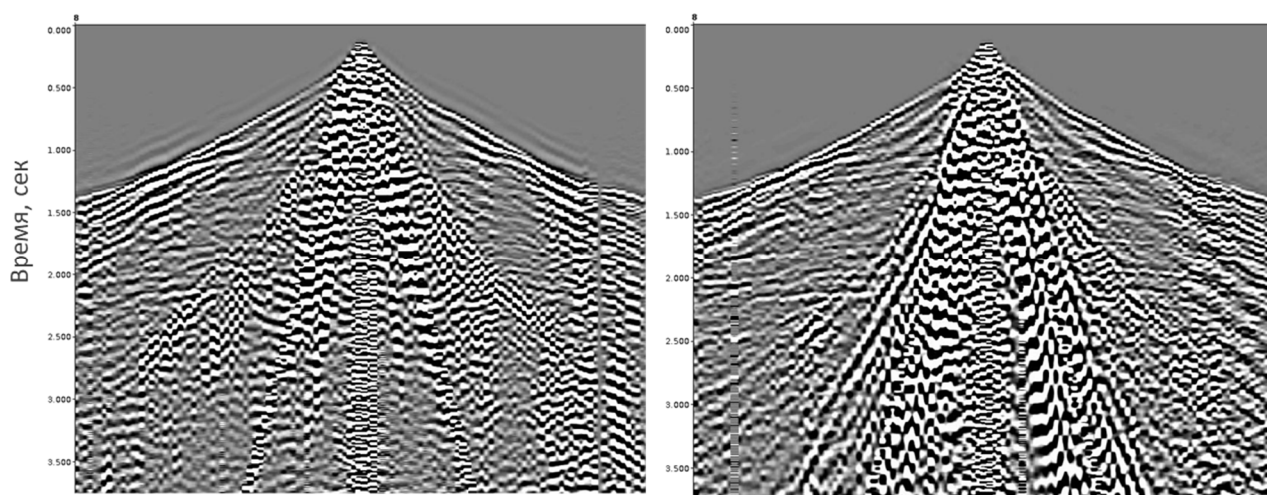


Рисунок 5. Коррелограммы одной приемной линии, слева – для линейного свипа 5-100Гц, справа для НЧ свипа 3-100Гц

Волновая картина свипов с различными параметрами визуально сильно отличается. Можно сделать вывод о корректной генерации свипов вибраторами. Видно, что НЧ свип дает меньший уровень корреляционных помех перед первыми вступлениями, что повысит качество снятия времен первых вступлений для построения модели верхней части разреза.

По одиночным сейсмограммам не удастся сделать однозначный вывод об оптимальных параметрах НЧ свипа. Требуется дополнительный анализ данных после обработки сейсморазведочной съемки не для единичных сейсмограмм, а для небольшой площади.

Заключение

В рамках работы разработан и реализован метод генерации низкочастотных свип-сигналов, аналогичных («maximum displacement sweep»). Сгенерированные свип-сигналы были протестированы в рамках ОМР.

Была подтверждена возможность корректной генерации НЧ свип-сигналов виброустановками Nomad 65 Neo.

По результатам анализа волновой картины были сделаны выводы о приросте низких частот для поверхностной и преломленных волн, относительно линейного свип-сигнала с большей начальной частотой развертки. И понижении уровня корреляционных помех от сигнала преломленных и поверхностных волн, что повысит качество последующей пикировки первых вступлений и как следствие построение разрезов ВЧР.

Расширение полосы частот волнового поля будет давать прирост информативности сейсморазведочных данных. Во-первых, оно будет повышению точности результатов полноволновой инверсии. Во-вторых, уменьшение уровня корреляционных помех повысит качество снятия времен первых вступлений при использовании НЧ свип-сигналов для построения модели верхней части разреза в рамках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шнеерсон М. Б., Жуков А. П. Современные технологии возбуждения сейсмических волн // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2013. – Т. 45. – №. 3. – С. 6-22.
2. Tellier N., Ollivrin G. Low-frequency Vibroseis: current achievements and the road ahead? // First Break. – 2019. – V. 37. – No. 1. – С. 49-54.
3. Wei Z. et al. The low-frequency seismic vibrator: design and experimental verification // First Break. – 2018. – Т. 36. – №. 1. – С. 77-84.
4. Gang Li G., Qi W., Ding Y.-P., Huang Z.-Q., Lian Z.-H., Tao Z., Yang X.-Y. Method and application of extending seismic vibrator bandwidth toward low frequency // Advances in Mechanical Engineering. – 2019. – V. 11. – No. 10.

© Г. С. Чернышов, Д. А. Литвиченко, А. А. Дучков, 2024