

## **SmartLF как инструмент для мощного и стабильного уменьшения искажений низкочастотного сигнала**

*Жиль Оливрэн, Николя Тэлье\*, Sercel*

### **Аннотация**

Расширение диапазона сейсмического сигнала в сторону низких частот стало почти стандартом для вибросейсмических проектов, благодаря преимуществам, которые оно обеспечивает с точки зрения вертикального разрешения, распространения сигнала, инверсии или простоты интерпретации. Однако излучение сигнала в этой новой низкочастотной части спектра связано с уровнями искажений, которые значительно выше, чем в случае сигнала с обычной шириной полосы развертки, из-за конструкции сейсмических вибраторов на основе гидравлических приводов. В последние годы было предложено несколько решений для предотвращения возникновения таких искажений, но их реализация на местах до сих пор остается весьма затруднительной из-за ограничения производительности или запатентованных технологий, которые коммерчески недоступны для третьих сторон. В данной статье представлен новый подход к снижению низкочастотных искажений. Этот продукт встроен в саму электронику вибраторов и прост в реализации и использовании при сейсмических работах. Полевые испытания, проведенные с различными вибраторами на различных участках местности, подтвердили эффективность этого нового подхода.

### **Введение**

Появление технологий НЧ-вибросейс было связано с появлением десять лет назад низкочастотных (low-dwell) свипов (Bagaini 2007, Sallas 2010), которые остаются единственным типами развертки, позволяющими осуществлять точный контроль спектра (Tellier 2019). Выходная мощность вибратора снижается на низких частотах, чтобы соответствовать механическим и гидравлическим ограничениям вибратора, и обеспечивает минимально возможную длительность низкочастотного конуса. Генерируемый низкочастотный сейсмический сигнал имеет меньшую амплитуду, чем «традиционные» более высокие частоты. Это связано с более высокими искажениями из-за ограничений систем вибратора на низких частотах.

Это низкочастотное искажение, кроме того, плохо устраняется и представляет собой серьезный источник шума на сейсмических записях. Были предложены различные методы для устранения этого гармонического загрязнения во время обработки (например, Meunier 2002) и преодоления ограничения в производительности вибраторов, которое связано с загрязнением гармоническим шумом данных при перекрытии записей. Тем не менее, по-прежнему остается предпочтительным избегать генерации этих искажений непосредственно в поле, поскольку сейсмические

записи и так становятся все более и более зашумленными с учетом текущей отраслевой тенденции применения высокопроизводительных методов вибросейс (свободный вибратор и т.д.) и уменьшенных группирования источников и приемников, или применения одиночного источника, одиночного датчика.

### **О гармонических нелинейных искажениях**

Генерация сейсмического сигнала с помощью вибраторов связана с гармоническими искажениями, которые обычно различают на:

- Четные гармоники, которые в основном обусловлены распространением волны в приповерхностном слое. Эти гармоники связаны с изменением скорости распространения волн во время цикла сжатия-декомпрессии и в основном связаны с поверхностным слоем земли.
- Нечетные гармоники, которые происходят главным образом от самого вибратора и зависят от конструкции возбудителя, его изоляции от транспортного средства и шасси, а также правильных настроек гидравлики и технического обслуживания.

Стоит помнить, что в отличие от фазы и амплитуды, которые являются предметом контроля качества (QC) сейсмического сигнала, искажение является главным образом предметом QC оборудования. Более высокий уровень искажений на одном конкретном вибраторе по сравнению с другими сигнализирует о неисправности этой установки, что потребует либо регулировки, либо ремонта, в то время как высокий уровень искажений на всех вибраторах хорошо коррелирует с эффектом, связанным с рельефом местности.

Сравнение уровней искажений, полученных различными моделями электроники вибраторов неуместно, поскольку могут использоваться разные методы расчета. Например, максимальная частота, выбранная для вычисления искажений, может отличаться (и обычно не настраивается пользователями), и вычисление искажений может основываться только на гармониках или на всех сигналах, кроме основного (последний включает как субгармонические, так и внутригармонические шумы).

Следует отметить, что положение акселерометров также имеет первостепенное значение для правильного вычисления параметров QC (сила, фаза и искажение) на высоких частотах развертки. Акселерометр, расположенный на верхней части возбудителя будет обеспечивать, по-видимому, превосходное значение параметров QC, но это не будет отражать истинного качества излучаемого в

## Уменьшение низкочастотных искажений с помощью SmartLF

недра сигнала (для его оценки потребуется специальный стенд или проведение ВСП). И наоборот, акселерометр, расположенный на опорной плите, обеспечивает гораздо более представительное значение QC излучаемого сигнала. Достоверность параметров QC всегда может быть улучшена за счет использования нескольких акселерометров на оптимизированных местах опорной плиты (Boucard 2010, Tellier 2015).

### Искажения при НЧ-вибросейс

В силу самой своей природы сейсмические вибраторы естественным образом производят уровни гармонических искажений, которые выше на низких частотах (обычно ниже 5-10 Гц, в зависимости от выбранной развертки и вибратора), чем в обычной полосе частот развертки. Это стало особенно заметно с тех пор, как были применены низкочастотные (low-dwell) свипы. Это низкочастотное искажение имеет источником главным образом следующие эффекты:

- Нелинейность вибратора на низких частотах (функция квадратного корня между потоком масла и гидравлическим давлением);
- Перекрытие сервоклапана на низких частотах (кратковременное и резкое падение гидравлического давления, когда сервоклапан проходит свое нейтральное положение);
- Нелинейные механические свойства контакта «опорная плита – грунт» и переменная площадь контакта в течение цикла (Sallas, 1984);
- Колебания гидравлического давления (хотя они и были значительно смягчены на современных вибраторах с гидроаккумуляторами, установленными как можно ближе к сервоклапану);
- Резонансная частота пневмоподушек, изолирующих возбудитель колебаний от транспортного средства или шасси (обычно ~2 Гц);
- Трение и износ.

### Существующие решения по смягчению последствий

В последние годы было внедрено несколько методов уменьшения искажений на низких частотах при генерации развертки:

- В электронике вибратора VE нелинейность вибратора на низких частотах (т. е. функция квадратного корня между потоком масла и гидравлическим давлением) была учтена и интегрирована в модель вибратора, начиная с VE416, выпущенного в 1988 году (Ollivrin 2008). Чтобы соответствовать ожиданиям отрасли для все более низких частот (<5Гц), дополнительным улучшением стал более точный контроль усиления и фазы низких частот (Tellier 2014).

- В основе VibPro HDR (Phillips 2010) лежит попытка компенсировать нелинейность гидравлической системы и перекрытие сервоклапана, впрочем, она была предпринята не специально для низкочастотной части сигнала. Все гармоники уменьшены, кроме второй, которая тем не менее усиливается в соответствии с документацией, опубликованной производителем (Рисунок 1).

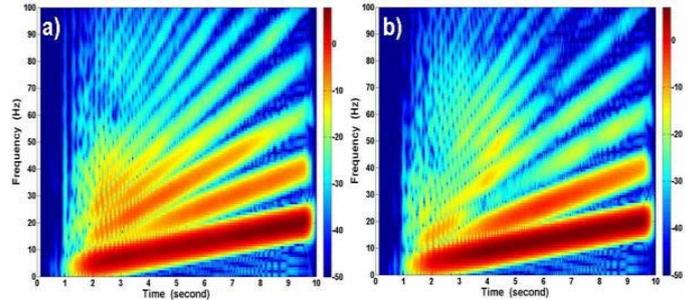


Рисунок 1: Сравнение параметра Силы (Ground Force) с включенной и выключенной опцией HDR Technology на низких частотах от 1 до 21 Гц. а) Технология HDR выключена. б) Технология HDR включена. Из брошюры производителя.

- CleanSweep (Castor 2014) - заключается в добавлении сигнала анти - искажения к пилоту развертки (180° фазового сдвига искажения), рассчитанного по сигналу Силы (Ground Force). Принцип подобен тому, который используется для шумоподавления в наушниках. Это решение поддерживается электроникой VE464 в силу требования быстрого сервоуправления, способного точно следовать более сложному пилоту, предотвращающему искажение. Технология CleanSweep превосходно обеспечивает устранение искажений на низких частотах, и учитывает все уровни гармонического шума (Рисунок 2).

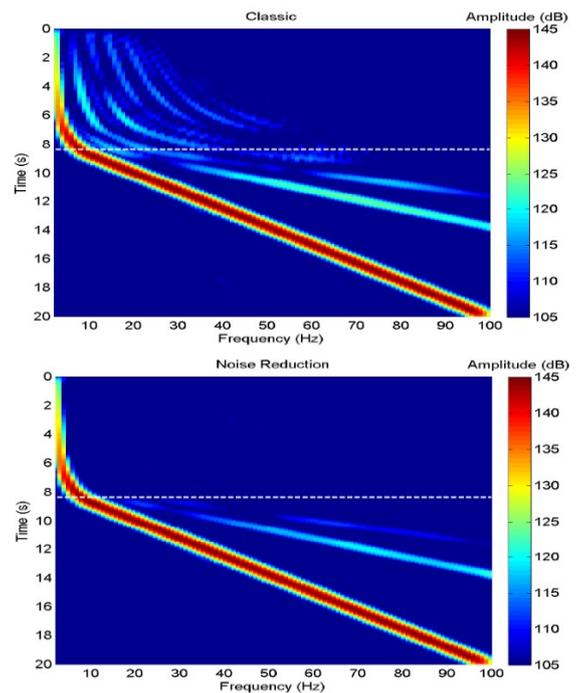


Рисунок 2: 1,5-100 Гц, 20 с, вибратор 60 000 фунтов, без (сверху) и с (снизу) CleanSweep. Из брошюры производителя.

**Новый подход к снижению искажений на низкой частоте**

В новом подходе к преодолению ограничений предыдущих решений по снижению низкочастотных искажений с помощью надежного, мощного и простого инструмента была улучшена модель вибратора, чтобы лучше учитывать различные источники низкочастотных искажений, упомянутые выше.

На основе этой усовершенствованной модели сервоуправление способно предсказывать низкочастотные искажения: входной сигнал сервоклапана соответственно модифицируется, и генерация гармоник исключается. Рабочий пилотный сигнал остается неизменным: электроника вибратора моделирует, предвидит и корректирует внутреннее поведение системы вибратора так, чтобы гарантированно удерживать величину усилия на грунт как можно ближе к желаемому пилоту. Это приводит к значительному снижению искажений на низких частотах. Общий сигнал усилия на грунт на низких частотах более чистый, все ранги гармоник уменьшены, и большая часть низкочастотных, ниже 15 Гц, искажений устранена (Рис.3). Надежность сервоуправления сохраняется, то есть не происходит никаких компромиссов по фазе и основным характеристикам сигнала (Рис.4). Поскольку рабочий пилотный сигнал остается неизменным для всех вибраторов, для корреляционного процесса может быть использован один пилот, что снижает сложность и вероятность ошибок, связанных с выделенными вибраторам пилотами.

Это решение, называемое SmartLF, встроено в электронику вибратора VE464, не требует модификации вибраторов или дополнительных механических компонентов. Его легко настроить при запуске партии без предварительного опыта или дополнительных знаний.

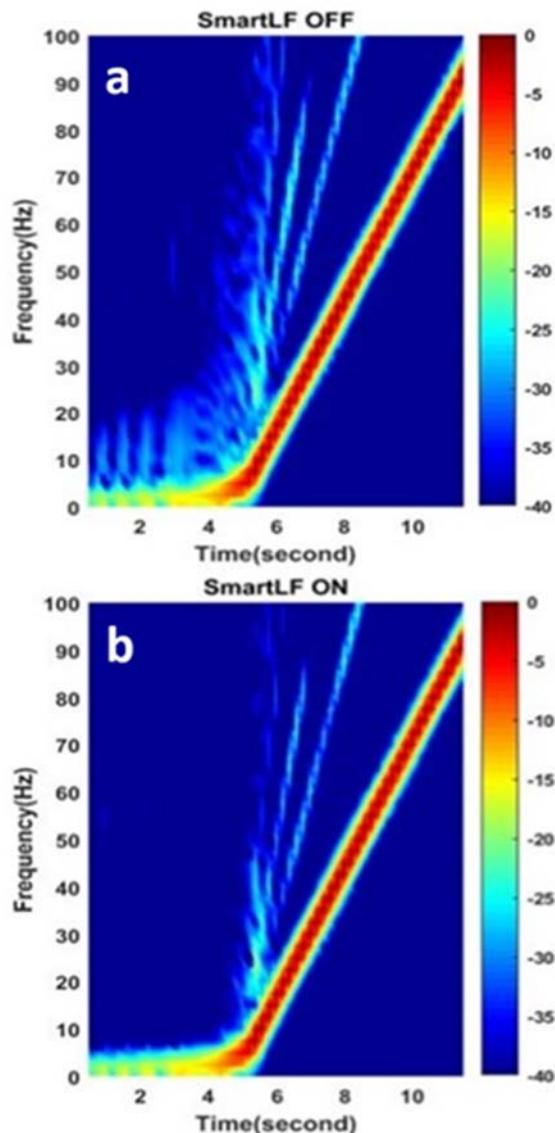


Рисунок 3: Результаты измерения низкочастотных искажений для низкочастотного свипа (low-dwell) 2-96 Гц, 80% 12с, Nomad 65 Neo, пашня: (a) SmartLF выключен, (b) SmartLF включен.

## Уменьшение низкочастотных искажений с помощью SmartLF

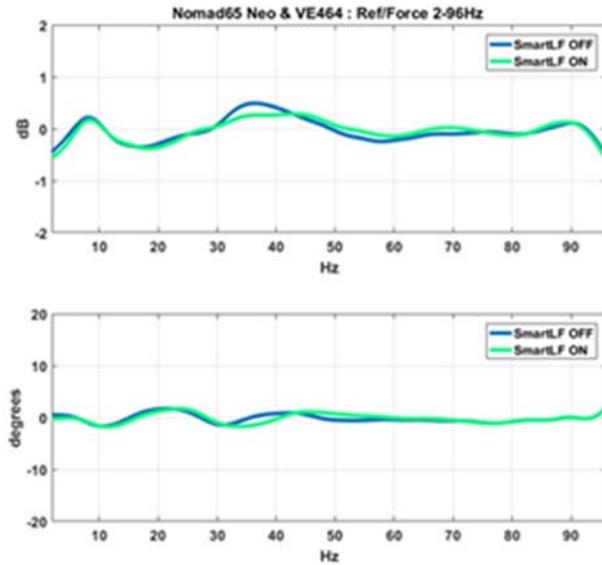


Рисунок 4: Сравнение между выключенным SmartLF (синяя линия) и включенным (зеленая линия) показывает, что решение не оказывает влияние на усилие на грунт (вверху) и фазу (внизу) сигнала вибрации.

Несколько проведенных полевых испытаний показали эффективность решения на различных типах вибраторов: сверхтяжелых (80 000 фунтов, Рис. 5), тяжелых (62 000 фунтов, Рис.3) и легких (16 135 фунтов, Рис. 6). Хорошее качество низкочастотной развертки может быть достигнуто с последним типом, хотя эти легкие вибраторы сконструированы больше для высокочастотного выходного сигнала (до 400 Гц, в зависимости от местности), чем для низкочастотных характеристик (частота выхода сигнала на полную мощность 7 Гц).

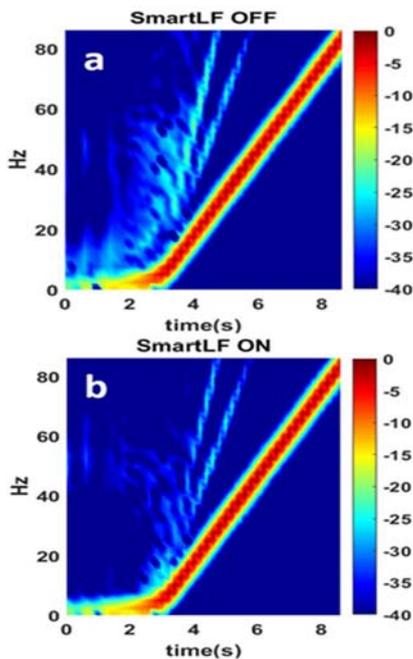


Рисунок 5: Low-Dwell 1,5-86 Гц, 9 с, 75%. Вибратор 80 000 фунтов (Nomad 90 Neo), бетонная подушка, Южная Франция. (a) SmartLF выключен, (b) SmartLF включен.

## Заключение

Снижение высоких уровней искажений, связанных с НЧ-виброейс, стало ключевой задачей для нефтяных и газовых компаний. Нужно получать высококачественные наборы данных и уменьшать генерацию шума непосредственно в полевых условиях, так как записи, полученные с одновременно работающими источниками и одиночными вибраторами и приемниками и так становятся все более и более шумными.

Было разработано новое решение, интегрированное в электронику вибратора, основанное на надежной низкочастотной модели вибратора, которая лучше учитывает различные источники низкочастотных искажений; усовершенствованное сервоуправление может заранее предсказать искажение и предотвратить его генерацию, без изменения рабочего пилота и с сохранением качества развертки.

Предложенное решение легко реализовать; оно не требует ни калибровки, ни дополнительных механических компонентов, ни особых настроек вибратора. Его эффективность на различных вибраторах была доказана в полевых условиях, и на момент написания статьи внедрение решения продолжается на коммерческих производственных проектах.

Дальнейшее снижение искажения на всех частотах развертки потребует дополнительных инновационных подходов и может быть рассмотрено, если нефтегазовые компании подтвердят свою заинтересованность в необходимости записей, почти не имеющих искажений.

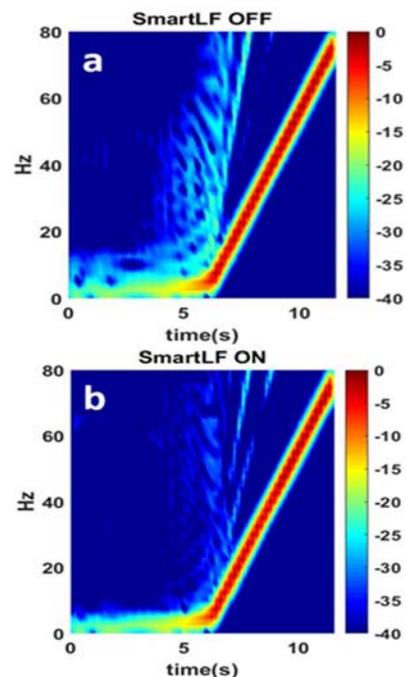


Рисунок 6: Low-Dwell свип 2-80 Гц, 12 с, 70%. Вибратор 16 135 фунтов (Nomad 15), дорога, Северная Франция. (a) SmartLF выключен, (b) SmartLF включен.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы хотели бы поблагодарить Николаса Гота, Ивана Торреса и коллектив Sercel в г. Сен-Годанс за поддержку в разработке и тестировании представленного решения, а также руководство Sercel за разрешение на публикацию этой работы.

## БИБЛИОГРАФИЯ

- Bagaini, C., 2007, Enhancing the low-frequency content of Vibroseis data with maximum displacement sweeps: 69th Annual International Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201401461>.
- Boucard, D., and G. Ollivrin, 2010, Developments in vibrator control: Geophysical Prospecting, 58, no. 1, 33–40, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2009.00848.x>.
- Castor, K., T. Bianchi, O. Winter, and T. Klein, 2014, Noise reduction in vibroseis source: 84th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstract, 16–20, <https://doi.org/10.1190/segam2014-0520.1>.
- Meunier, J., and T. Bianchi, 2002, Harmonic noise reduction opens the way for array size reduction in Vibroseis™ operations: 72nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstract, 70–73, <https://doi.org/10.1190/1.1817354>.
- Ollivrin, G., and D. Boucard, 2008, Developments in vibrator control: EAGE Vibroseis Workshop — Vibroseis Acquisition and Processing Half Century Later, New Developments in Data Quality and Productivity, Extended Abstracts, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20147507>.
- Phillips, T. F., 2010, Harmonic distortion reduction of seismic vibrator using vibrator control electronics: 72nd Annual International Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201400621>.
- Sallas, J. J., 1984, Seismic vibrator control and the downgoing P-wave: Geophysics, 49, 732–740, <https://doi.org/10.1190/1.1441701>.
- Sallas, J. J., 2010, How do hydraulic vibrators work? A look inside the black box: Geophysical Prospecting, 58, no. 1, 3–17, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2009.00837.x>.
- Tellier, N., G. Ollivrin, and D. Boucard, 2014, Optimizing the generation and QC of low-dwell sweeps: 76th Annual International Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20140755>.
- Tellier, N., G. Caradec, and G. Ollivrin, 2015, Practical solutions for effective vibrator high-frequency generation: 85th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstract, 201–205, <https://doi.org/10.1190/segam2015-5844765.1>.
- Tellier, N., and G. Ollivrin, 2019, Low-frequency Vibroseis: current achievements and the road ahead?: First Break, 37, no. 1, 48–54