

Свип-сигнал с 0 Гц. Миф или реальность?

■ Ягудин И.Р., Гафаров Р.М., Жужель А.С., АО «Башнефтегеофизика», г. Уфа.

Введение

Применение вибрационных источников при сейсморазведочных работах (СРР) всегда сопровождалось вопросами, связанными с технологией их использования. Один из важных и нерешенных вопросов сейчас связан с рабочим частотным диапазоном свип-сигнала, излучаемого вибрационным источником, а именно с ограничением по низким частотам. Если в спектре взрывного источника имеется полный частотный диапазон, то нижняя частота развёртки вибрационного источника ограничена на аппаратном уровне. В связи с этим ограничением получили развитие методики, позволяющие задавать свип-сигнал с низких частот за счет ограничения мощности излучения, увеличения тейперинга свип-сигнала. В данной статье показан альтернативный подход для излучения низкочастотной составляющей сигнала с 0 Гц.

Физические ограничения в конструкции вибрационных источников

Дадим краткую информацию о текущих ограничениях уже существующих вибрационных систем, рассмотрим с чем связаны данные ограничения. Минимальная и максимальная частота развёртки свип-сигнала зависят от аппаратной части источника. Так, уменьшение нижней частоты развёртки свип-сигнала связана с ограничением в конструктивной части источника, таких как ход реактивной массы Z_{max} , вес реактивной массы m , производительность Q насоса, перемещающего рабочую жидкость, S – площадь поршня возбудителя вибрации и F_{max} – максимальное усилие, развиваемое возбудителем вибрации, и описывается формулами [1]:

$$\omega_{min} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{F_{max}}{2Z_{max} \cdot m}}$$

$$\omega_{min} = \frac{F_{max} S}{m \cdot Q \cdot \pi \sqrt{2}}$$

Нижняя частота развёртки определяется минимальной из представленных выше формул. Также имеется обратная зависимость верхней частоты развёртки свип-сигнала от хода реактивной массы Z_{max} , производительности Q насоса (Е-объемный модуль упругости рабочей жидкости):

$$\omega_{max} = \frac{QE}{2\pi \cdot F_{max} \cdot Z_{max}}$$

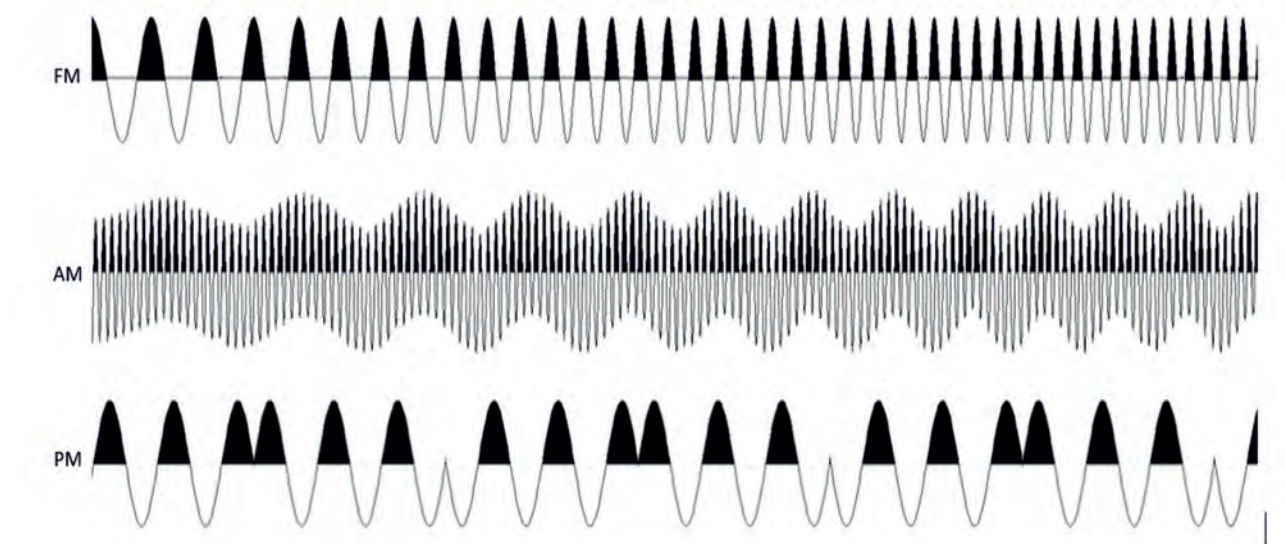
Таким образом, согласно классическому представлению о работе вибрационного источника, возникают условия, выполнение которых на данный момент невозможны из-за ряда ограничений, описанных выше. Из вышеизложенного следует, что частотная развёртка свип-сигнала на вибрационном источнике имеет ряд физических, т.е. аппаратных ограничений, особенно для низких частот, которые весьма важны при обработке сейсмических данных.

Модуляция свип-сигналов

Существует 3 базовых способа передачи информации в радиосвязи (рис. 1.):

1. Частотная модуляция (FM) – это модуляция, где информация представлена в виде изменения частоты излучаемого сигнала при неизменной амплитуде несущего сигнала $A(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + m \int F(t) dt)$ (m – коэффициент частотной модуляции);

2. Амплитудная модуляция (AM) – это модуляция, где информация пред-



▲ Рис. 1. Фрагменты FM, AM и PM сигналов.

ставлена в виде изменения амплитуды при неизменной частоте и фазе сигнала $A(t) = A_0[1 + mF(t)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ (m -индекс модуляции от 0 до 1);

3. Фазовая модуляция (PM) – это модуляция, где информация представлена в виде изменения фазы сигнала при неизменной амплитуде $A(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + mF(t) + \varphi_0)$ (m – коэффициент фазовой модуляции).

Для генерации свип-сигналов вибрационными источниками, которые используют гидравлическую систему преобразований, применяется частотная модуляция, при которой происходит изменение несущей частоты по закону управляющего сигнала.

Амплитудно – Частотно модулированные свип-сигналы

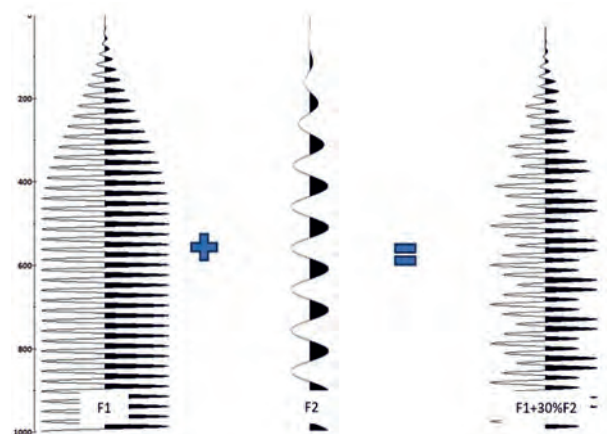
Смодулируем амплитудно-частотный (АЧ) свип-сигнал путем суммирования во временной области двух FM свип-сигналов, с непересекающимися частотными развертками, чтобы однозначно идентифицировать данные сигналы на волновом поле коррелограммы.

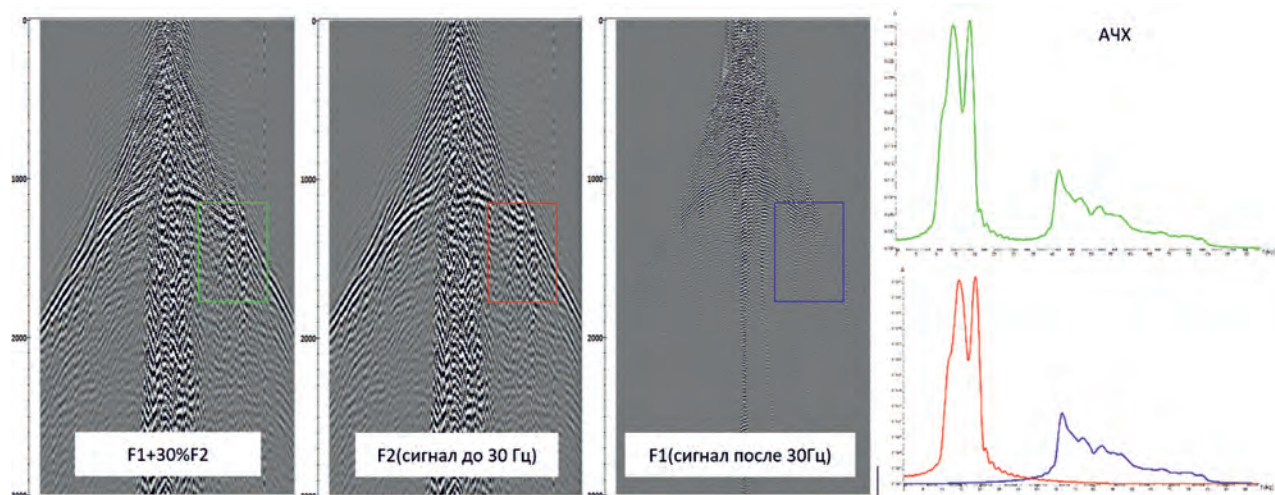
Первый свип-сигнал с частотами $F1 = f_n - 40 / f_k - 80$ Гц, а второй свип-сигнал с частотами $F2 = f_n - 10 / f_k - 20$ Гц. Длина и конусность свип-сигналов одинакова.

Просуммируем данные сигналы в области амплитуд так, чтобы сигнал $F2$ составлял всего 30% от первоначальной максимальной амплитуды $F1 + 30\%F2$, т.е. получим AFM свип-сигнал, где основная информация свип-сигнала закодирована как в изменении амплитуды, так и в изменении частоты несущего сигнала, что позволяет передавать больше информации за единицу времени. Такой сигнал можно описать математически как комбинацию синусоидальных функций, где амплитуда управляется одним сигнальным параметром, а частота – другим (рис. 2)

На рисунке 3 показано реальное волновое поле полученной коррелограммы для нашего составного AFM свип-

▼ Рис. 2. Фрагменты полученных FM и AFM свип-сигналов.





▲ Рис. 3. Полученные волновые поля и их АЧХ. Исходное волновое поле слева ($F1+30\%F2$) (зеленый спектр). В середине волновое поле в частотном диапазоне до 30 Гц (красный спектр). Справа волновое поле в частотном диапазоне после 30 Гц (синий спектр).

сигнала. Применим полосовую фильтрацию к полученной коррелограмме и выделим сигналы отдельно для $F1$ и $F2$ свип-сигналов. На полученных частотных срезах в выделенных окнах АЧХ показаны спектры свип-сигналов, излученного при частотной и амплитудной модуляции. Это показывает возможность излучения вибрационными источниками составных свип-сигналов в АФ области.

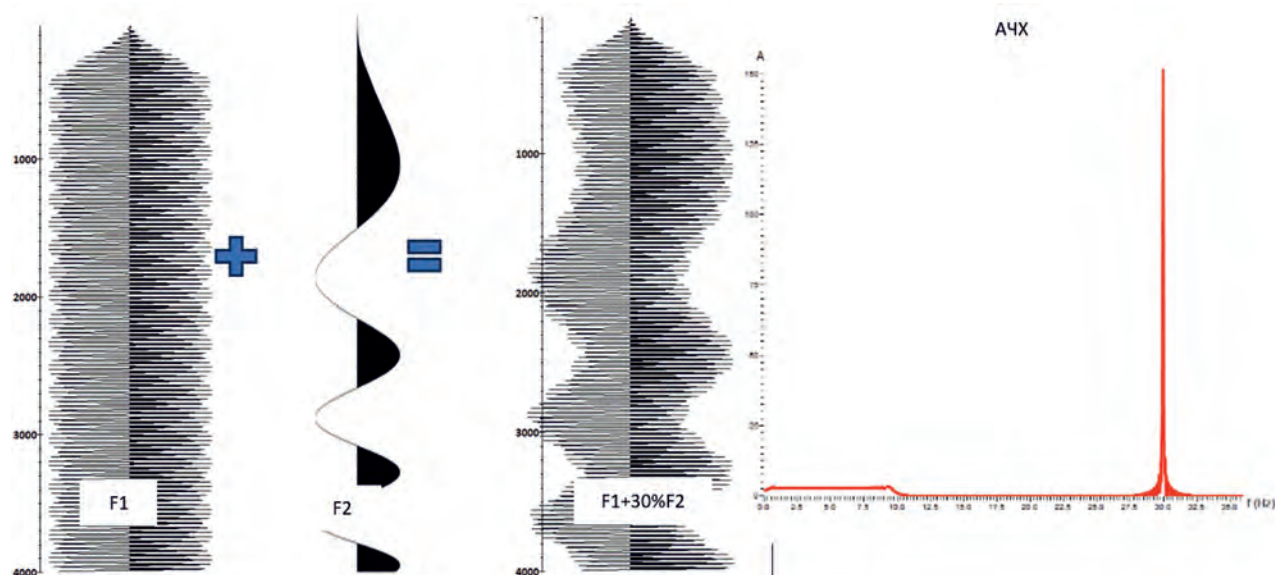
Мы выяснили, что вибрационный источник может излучать не только

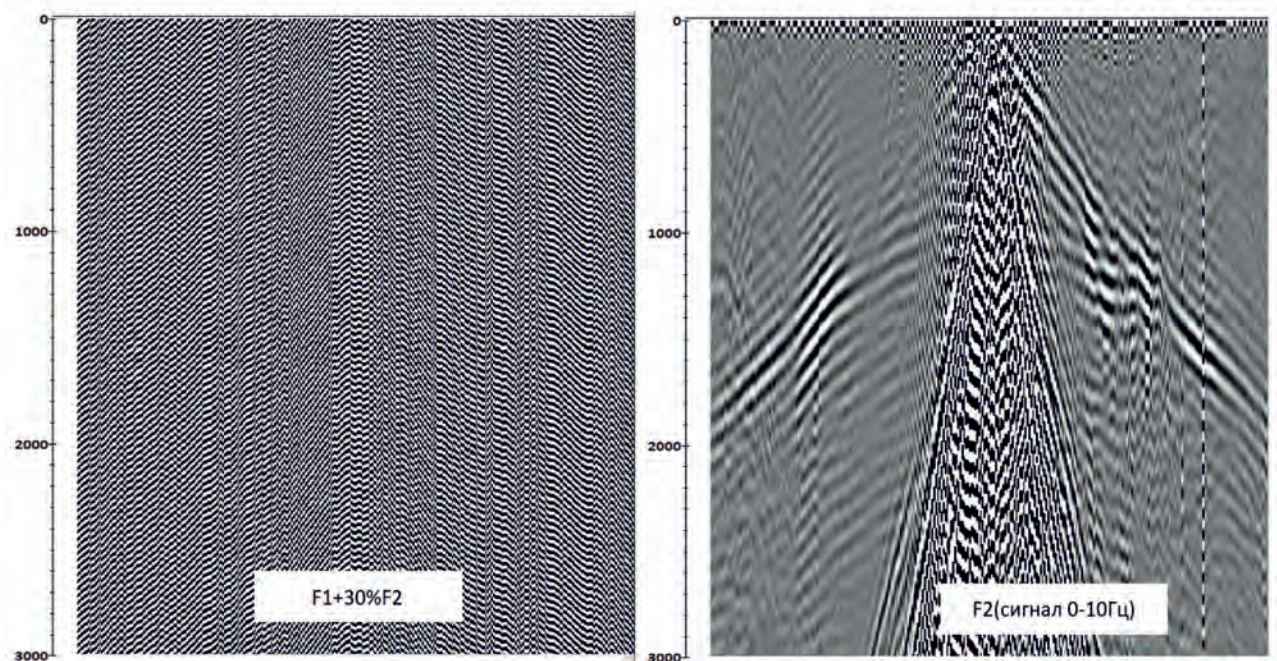
частотно-модулированные, но и амплитудно-частотные модулированные свип-сигналы.

Для возможности излучения низких частот смодулируем в области FM моночастотный свип-сигнал с частотой $F1=30\text{ Гц}$ и свип-сигнал $F2=f_n-0/f_k-10\text{ Гц}$. Просуммируем их в амплитудной области и получим составной АФМ свип-сигнал $F1+30\%F2$ (рис. 4.)

На рисунке 5 показано реальное волновое поле полученной коррелог-

▼ Рис. 4. Фрагменты полученных FM и АФМ свип-сигналов. АЧХ, полученного составного АФМ свип-сигнала.





▲ Рис. 5. Волновое поле коррелограммы. Слева исходная нефильТРованная коррелограмма, справа фильТРованная коррелограмма режекторным фильТРом 30Гц.

раммы для нашего составного AFM свип-сигнала. Для выделения низкочастотной составляющей свип-сигнала 0-10Гц удалим фильТРом моночастоту в 30Гц. На полученной отфильТРованной коррелограмме отчетливо проявляется волновое поле коррелограммы для свип-сигнала F2, излученного амплитудной модуляцией. Это показывает возможность излучения вибрационными источниками низкочастотных составных свип-сигналов в AF области.

Низкочастотные AFM свип-сигналы

Для изучения возможности использования низкочастотных AFM свип-сигналов в производстве были опробованы следующие параметры составных свип-сигналов (Таблица 1).

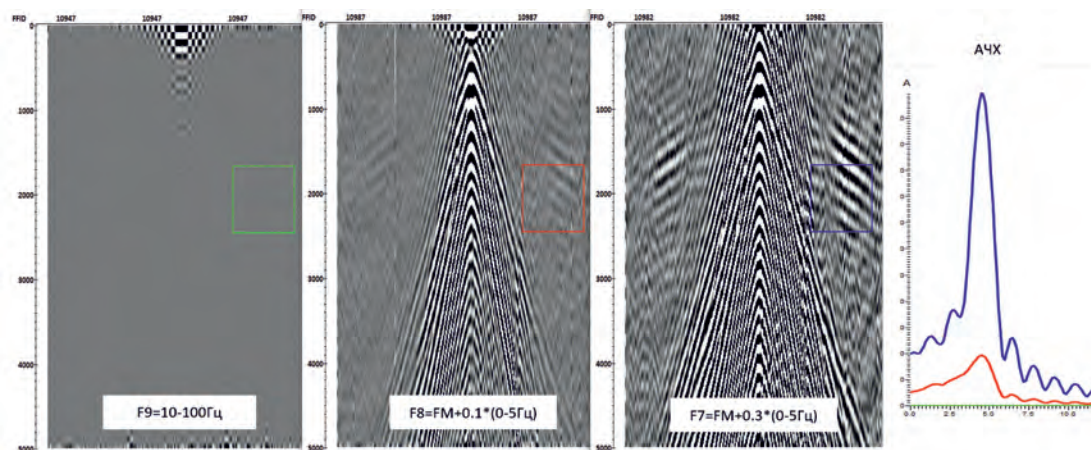
При сравнении полученных волновых полей коррелограмм (рис. 6.) для пунктов №7, 8 и 9 после применения фильТра низких частот (ФНЧ) 5/7Гц на волновом поле видно, что на свип-сигнале №9 (10-100Гц) никакой полезной

информации нет, однако на волновых полях №7 и №8 отчетливо проявляется низкочастотная составляющая свип-сигнала, излученного амплитудной модуляцией, что подтверждается на спектрах АЧХ.

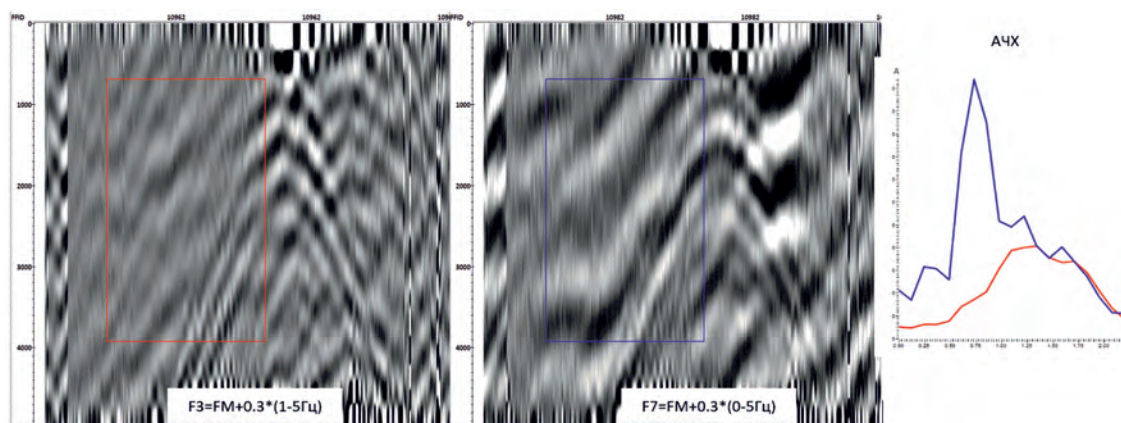
При сравнении полученных волновых полей коррелограмм (рис. 7.) для свип-сигналов №3 и №7 после применения ФНЧ 1/2Гц, отчетливо наблюдается низкочастотная составляющая до 1Гц на свип-сигнале №7 (0-5Гц), как на волновом поле коррелограммы, так и на спектрах АЧХ.

▼ Табл. 1. Список составных свип-сигналов.

№	FM область		AM область		
	Fn, Гц	Fk, Гц	Fn, Гц	Fk, Гц	Энергия, %
1	10	100	1	10	30%
2	10	100	1	10	10%
3	10	100	1	5	30%
4	10	100	1	5	10%
5	10	100	0	10	30%
6	10	100	0	10	10%
7	10	100	0	5	30%
8	10	100	0	5	10%
9	10	100	-	-	-



▲ Рис. 6. Волновые поля коррелограммы после применения ФНЧ-5/7Гц. Слева волновое поле коррелограммы для свип-сигнала №9 (зеленый спектр), в середине для №8 (красный спектр), справа для №7 (синий спектр).



▲ Рис. 7. Волновые поля коррелограммы после применения ФНЧ-1/2Гц. Слева волновое поле коррелограммы для свип-сигнала №3 (красный спектр), справа для №7 (синий спектр).

Выводы

Большинство вибрационных источников на данный момент имеют ряд фундаментальных ограничений, связанных с аппаратной частью, не позволяющих существенно расширять рабочий частотный диапазон свип-сигнала в сторону низких частот. Предложенный в данной статье метод позволит обойти ограничение источников в области частотной модуляции за счёт добавления низкочастотной составляющей свип-сигнала в области амплитудной модуляции, т.к. необходимый частотный диапазон составляет всего от 0 до 5Гц. Низкочастотная часть свип-сигнала не должна обладать высокой энергией, т.к. поглощение

ВЧР будет минимальным, что позволит задавать энергию в АМ части свип-сигнала до 5-10 % от энергии основного FM несущего свип-сигнала, заданного в частотной области.

Литература

1. Кострыгин Ю.П. Вибросейсмический и кодоимпульсный способы сейсмической разведки. Краснодар: Просвещение-Юг, 2014. 494 с.
2. Жуков А.П. Шнеерсон М. Б. Сейсморазведка с вибрационными источниками. Тверь: ГЕРС, 2011. 412 с.
3. Першин В.Т. Формирование и генерирование сигналов в цифровой радиосвязи. Минск: Новое знание, 2015 г. 614 с.