

Парадоксы использования НЧМ свипов

■ Колесов С.В., Жуков А.П., Некрасов И.А., ООО «Геофизические системы данных», г.Москва

Аннотация. Нелинейно-частотно-модулированные (НЧМ) свип-сигналы всё ещё являются важным резервом повышения качества вибротсейсмических работ, однако использование их во всём мире ограничено 5%, а в 95% случаев используются линейно-частотно модулированные (ЛЧМ) свипы. Причины такого положения могут быть разными и, в частности, это некоторые свойства НЧМ свипов, которые не укладываются в привычную для геофизика – методиста последовательность действий в поле и, на первый взгляд, кажутся парадоксальными. (с точки зрения общепринятых представлений о форме сейсмического импульса).

На практике при проведении вибротсейсмических работ в 95% случаев мы имеем дело с линейными (ЛЧМ) свипами и такое положение во всём мире. Вместе с тем нелинейные (НЧМ) свипы при вибрационной сейсморазведке имеют явное преимущество перед ЛЧМ и если это преимущество не используется, то значит для этого есть какие-то причины. И не обязательно это – лень и нежелание читать мудрёные книги, когда нужно срочно «ковать деньги», а заказчик сам не грамотный, но жадный, и не требует качества: ему просто подавай километры и кубометры, чтобы как-нибудь выполнить лицензионное соглашение.

Возможно, причины кроются в особенностях практического использования НЧМ свипов. Вот об этом и пойдёт речь. И здесь уместно поговорить о парадоксах, связанных с НЧМ свипами. Частично они основываются на следующих особенностях НЧМ и ЛЧМ свипов:

1) имеет место расширение активной части спектра НЧМ сигнала в результате частотно-зависимого затухания: посылаем «плохой» НЧМ импульс, а получаем результат лучший, чем при посылке «хорошего» ЛЧМ импульса

2) наблюдается неожиданное и очень заметное увеличение реальной начальной частоты НЧМ свипа вследствие его конусования, приводящее к ухудшению прослеживаемости целевых отражений.

3) у полевиков возникают трудности в выборе оптимальных параметров НЧМ свипов с помощью независимого перебора значений их параметров, что в принципе неверно и не учитывается при опытных работах.

4) имеет место уменьшение времени отработки ПВ при использовании нелинейных свипов вместо линейных, при прочих равных условиях.

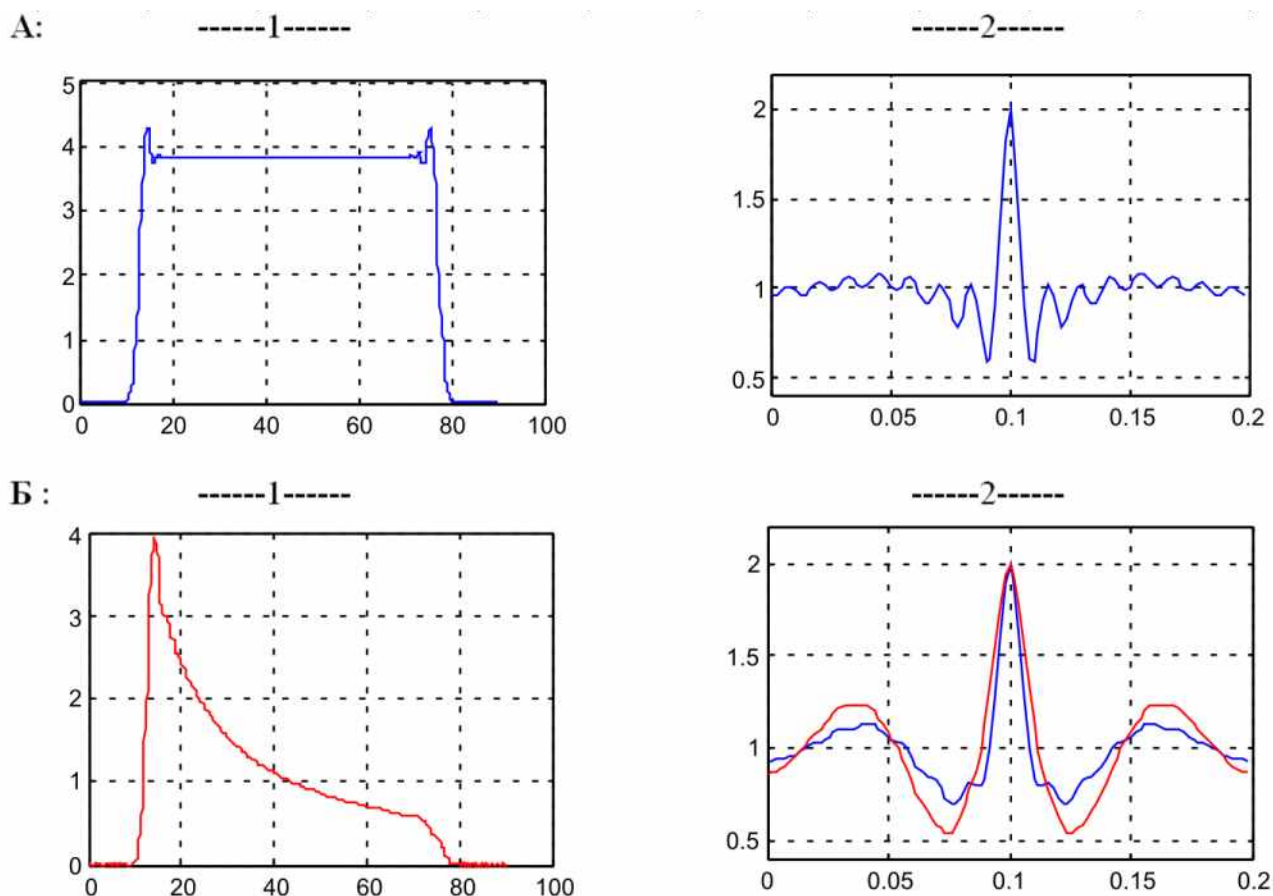
Есть и другие особенности, но с приведенными выше полевики чаще сталкиваются.

Первая особенность НЧМ свипов.

При рассмотрении последовательности действий геофизика - полевика можно видеть, что перечисленные особенности НЧМ свипов дают иногда неожиданные, даже парадоксальные результаты. Это оправдывает название данной публикации.

Для удобства изложения рассмотрим сначала, что такое «активная полоса спектра функции времени» (по Агееву Д.В., см. [5]). Сейчас чаще употребляется слово «эффективная» часть спектра, но смысл при этом не меняется. Речь идёт о взаимоотношении вида временной функции и её спектра, причём вид временной функции определяется, в основном, эффективной (активной) частью спектра.

Оценка ширины эффективной части спектра мощности (спектра авто-



▲ Рис. 1. Изменение спектра мощности, а также автокорреляционной (АКФ) и взаимно-корреляционной (ВКФ) функций линейного (ЛЧМ) свипа (10-80Гц/10с) вследствие частотно-зависимого затухания. А-1 – Спектр ЛЧМ свипа, исходный; Б-1 – спектр ЛЧМ свипа после моделирования частотно-зависимого затухания. А-2 – АКФ ЛЧМ свипа, исходная; Б-2 – АКФ ЛЧМ свипа после частотно-зависимого затухания (красная кривая) и ВКФ после частотно-зависимого затухания (синяя кривая).

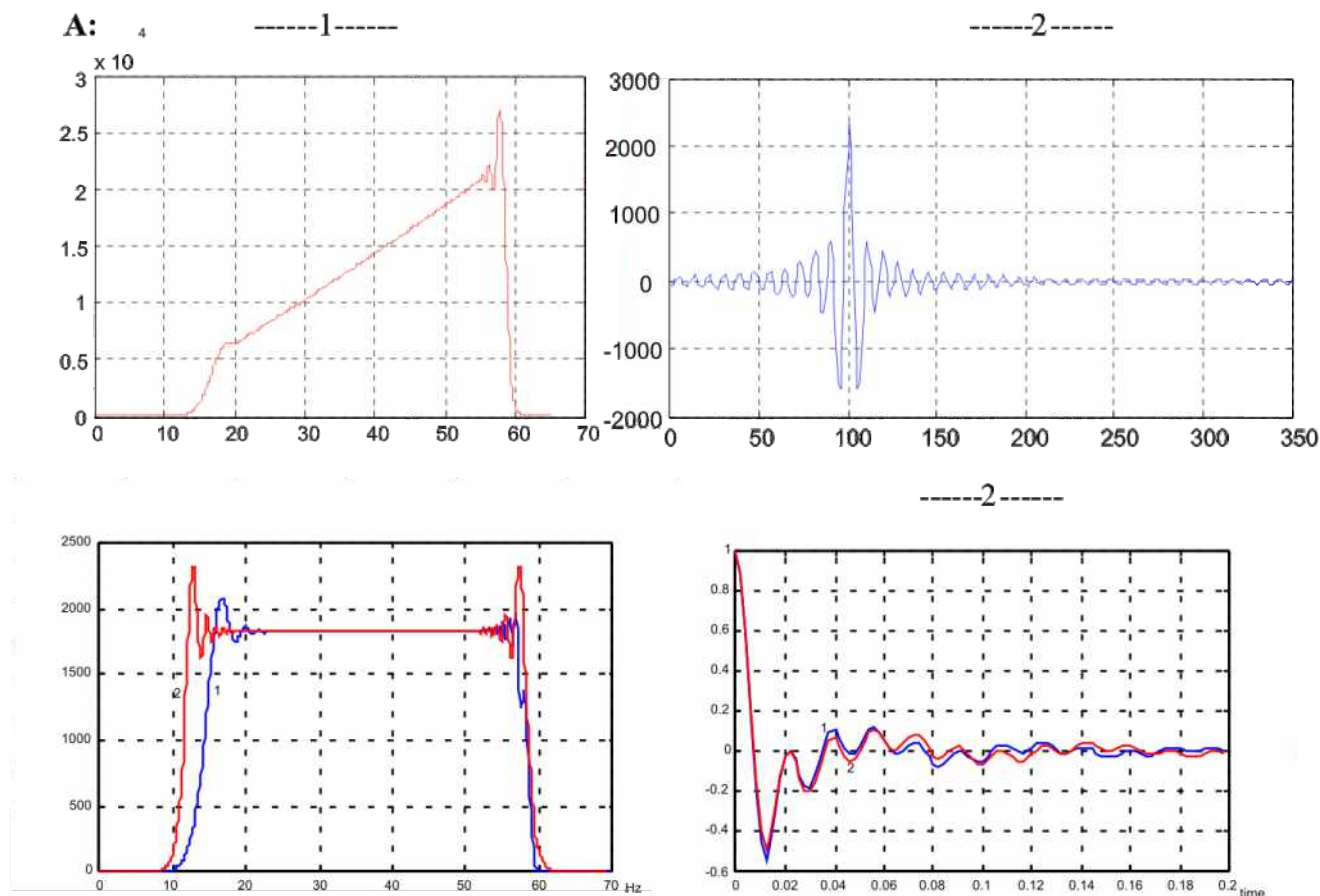
корреляционной функции свипа - АКФ) проводится на уровне половины максимума такого спектра. Для амплитудных спектров используется уровень 0.7 от максимума, но в вибрационной сейсморазведке мы чаще имеем дело с функциями авто- и взаимной корреляции и, соответственно, с их спектрами мощности.

Рассмотрим, как меняется вид спектра мощности при посылке ЛЧМ свипа в среду с частотно – зависимым затуханием сейсмической энергии. На рисунке 1 можно видеть, что эффективная часть спектра посланного свипа (позиция Б-1) сужена за счёт ослабления высоких частот и низкочастотная с уменьшенной октавностью, что видно также по форме

АКФ. Здесь можно говорить также и об эффективной октавности спектра АКФ.

Таким образом, при работе с ЛЧМ свипом мы «посылаем» довольно компактный импульс АКФ –позиция А-2) и регистрируем тоже «неплохой» импульс (синяя кривая ВКФ на позиции Б-2), но обеднённый высокими частотами. Для сравнения с ВКФ на Б-2 приведена и АКФ (красная кривая).

На рисунке 2 показано то, что происходит с НЧМ импульсом при частотно-зависимом затухании сейсмической энергии в среде. На позиции А-1 приведен исходный спектр нелинейного (НЧМ) свипа, конкретно «дБ/окт» –децибел-на октаву («аналитический», «библиотеч-



▲ Рис. 2. Изменение спектра мощности и взаимно-корреляционной функции нелинейного (НЧМ) свипа вследствие частотно-зависимого затухания:

А-1 – Спектр НЧМ свипа (7 дБ/окт), исходный; А-2 – АКФ НЧМ свипа, исходного;

Б-1 – спектр НЧМ свипа (синий) после моделирования его частотно-зависимого затухания в сравнении (по форме) со спектром ЛЧМ свипа (красный) в том же частотном диапазоне.

Б-2 – ВКФ НЧМ свипа после моделирования его частотно-зависимого затухания (синий №1) в сравнении (по форме) с АКФ исходного ЛЧМ свипа (красный №2).

ный» свип, имеющийся на всех современных блоках управления вибратором (БУСВ). Спектр примерно треугольный с увеличением амплитуд к высоким частотам и с эффективной полосой на высоких (>35Гц) частотах. Соответствующий ему «импульс» (АКФ, рисунок 2, А-2) – не компактный, а растянутый, с относительно (по сравнению с АКФ ЛЧМ) более сильными побочными экстремумами (до 70% от максимума – у НЧМ, по сравнению с 40% – у ЛЧМ – на рисунке 1 позиция А-2).

На рисунке 2 дано сравнение спектров (Б-1) и АКФ (Б-2) исходного ЛЧМ свипа 10-60Гц/10с (красные кривые) и НЧМ свипа после частотно зависимого затухания

(синие кривые). На импульсах (рисунок 2, Б-2) видно, что после ЧЗ – затухания НЧМ-свип превращается в ЛЧМ, то же самое видно и на спектрах (рисунок 2, Б-1): синий спектр (НЧМ свипа после затухания) почти совпадает с красным (исходный ЛЧМ свип 10-60Гц).

Сравнивая спектры (рисунок 2, Б-1) можно видеть, что НЧМ (синий) неточно совпадает с ЛЧМ (красным) на низких частотах. Это вызвано конусованием (аподизацией спектра), которое даёт разные результаты при различных энергиях спектров на начальных (здесь – низких) частотах.

Таким образом, при работе с НЧМ свипом мы «посылаем» растянутый,

некомпактный импульс, с узкой эффективной полосой частот, но регистрируем хороший результат во всём диапазоне возбуждаемых частот, с наиболее широким эффективным спектром (который по форме соответствует ЛЧМ свипу) и высокой октавностью, что и требуется для сейсморазведки высокого разрешения. Получается, что затухание превращает правильно подобранный НЧМ свип в ЛЧМ, что сказывается на результатах вибросейсмических работ.

Важно помнить, что в вибросейсморазведке на нелинейных развёртках понятие «регистрируем хороший сигнал» неразрывно связано с процессом кросскорреляции регистрируемых виброграмм с посылаемым сигналом. Эта особенность присуща исключительно вибросейсмическим наблюдениям и именно она диктует недопустимость слепого проецирования на «вибросейс» подходов к оценке сигнала, принятых в импульсной сейсморазведке. Непонимание или игнорирование этого факта и приводит к возникновению описываемого "парадокса", когда мы посылаем «плохой» сигнал, а получаем отличный результат.

Любой специалист, заинтересованный в повышении качества регистрируемых данных, может убедиться в справедливости приведенных утверждений, проанализировав результаты грамотного применения НЧМ развёрток.

На рисунке 2 показано то, что происходит с НЧМ импульсом при частотно-зависимом затухании сейсмической энергии в среде. На позиции А-1 приведен исходный спектр нелинейного (НЧМ) свипа, конкретно «дБ/окт» – децибел-на октаву («аналитический», «библиотечный» свип, имеющийся на всех современных блоках управления вибратором (БУСВ). Спектр примерно треугольный с

увеличением амплитуд к высоким частотам и с эффективной полосой на высоких (>35Гц) частотах. Соответствующий ему «импульс» (АКФ, рисунок 2, А-2) – не компактный, а растянутый, с относительно (по сравнению с АКФ ЛЧМ) более сильными побочными экстремумами (до 70% от максимума – у НЧМ, по сравнению с 40% – у ЛЧМ – на рисунке 1 позиция А-2).

На рисунке 2 дано сравнение спектров (Б-1) и АКФ (Б-2) исходного ЛЧМ свипа 10-60Гц/10с (красные кривые) и НЧМ свипа после частотно-зависимого затухания (синие кривые). На импульсах (рисунок 2, Б-2) видно, что после ЧЗ – затухания НЧМ-свип превращается в ЛЧМ, то же самое видно и на спектрах (рисунок 2, Б-1): синий спектр (НЧМ свипа после затухания) почти совпадает с красным (исходный ЛЧМ свип 10-60Гц).

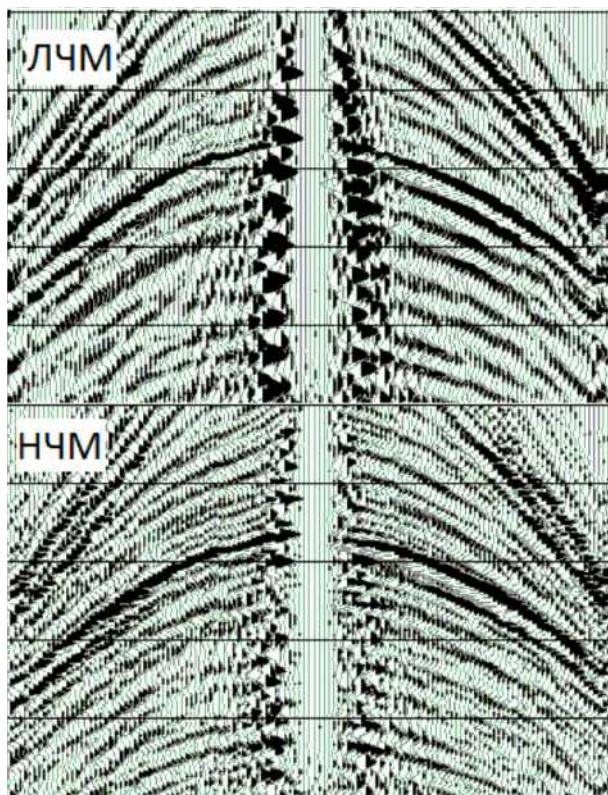
Сравнивая спектры (рисунок 2, Б-1) можно видеть, что НЧМ (синий) неточно совпадает с ЛЧМ (красным) на низких частотах. Это вызвано конусованием (аподизацией спектра), которое даёт разные результаты при различных энергиях спектров на начальных (здесь – низких) частотах.

Таким образом, при работе с НЧМ свипом мы «посылаем» растянутый, некомпактный импульс, с узкой эффективной полосой частот, но регистрируем хороший результат во всём диапазоне возбуждаемых частот, с наиболее широким эффективным спектром (который по форме соответствует ЛЧМ свипу) и высокой октавностью, что и требуется для сейсморазведки высокого разрешения. Получается, что затухание превращает правильно подобранный НЧМ свип в ЛЧМ, что сказывается на результатах вибросейсмических работ.

Важно помнить, что в вибросейсморазведке на нелинейных развёртках

понятие «регистрируем хороший сигнал» неразрывно связано с процессом кросскорреляции регистрируемых виброграмм с посылаемым сигналом. Эта особенность присуща исключительно вибросейсмическим наблюдениям и именно она диктует недопустимость слепого проецирования на «вибросейс» подходов к оценке сигнала, принятых в импульсной сейсморазведке. Непонимание или игнорирование этого факта и приводит к возникновению описываемого "парадокса", когда мы посылаем «плохой» сигнал, а получаем отличный результат.

Любой специалист, заинтересованный в повышении качества регистрируемых данных, может убедиться в справедливости приведенных утверждений, проанализировав результаты грамотного применения НЧМ развёрток.



▲ Рис. 3 Сравнение фрагментов коррелограмм, полученных с ЛЧМ и НЧМ свипами одинаковой длительности и одинаковых частотных диапазонов.

На рисунке 3 представлены фрагменты коррелограмм, полученных с ЛЧМ и НЧМ свипами одинаковой длительности. Нелинейность НЧМ развёртки подобрана таким образом, чтобы частично компенсировать эффект затухания на виброграмме. В процессе кросскорреляции происходит частичная компенсации затухания за счёт преобладания высокочастотных составляющих в спектре оператора корреляции. Как результат – повышение разрешённости и динамической выразительности отражений на коррелограмме в сравнении с ЛЧМ развёрткой. Это происходит именно за счёт расширения эффективного спектра коррелограммы вследствие его выравнивания при НЧМ развёртке. При этом средняя частота возросла с 29 Гц (при ЛЧМ) до 45 Гц, эффективная ширина спектра возросла с 22 Гц до 70 Гц, разрешающая способность сигнала (в % от единичного импульса с $F = 250$ Гц) увеличилась по энергетической оценке с 20 до 48 единиц.

Иначе говоря, ЧЗ - затухание НЧМ свипа приводит к расширению эффективного спектра сейсмического сигнала (что видно из сравнения позиций ЛЧМ и НЧМ на рисунке 3) и к улучшению результатов вибросейсмических работ.

Эта особенность работ с НЧМ свипами удивляет полевиков своей нестандартностью, поскольку они контролируют на служебном канале сейсмостанции форму сигнала, запускаемого вибратором в грунт, по записи АКФ этого сигнала (ещё не прошедшего ЧЗ- затухание!). В противовес этому при работе с НЧМ свипами в конечном итоге нужно больше внимания уделять не посылаемому сигналу, а принимаемому!

ПАРАДОКС: при полевых работах из-за частотно-зависимого затухания у ЛЧМ свипа эффективный спектр сужается, а у

правильно подобранного НЧМ свипа – расширяется.

Прежде чем переходить к описанию следующей особенности НЧМ свипов нужно уточнить некоторые термины, которые будут употребляться далее. Речь идёт о параметрах сигналов, значения которых мы планируем использовать и которые мы получаем после посылки (отработки) вибратором, а также те, которые важны при оценке качества результатов сейсмических работ.

Установочные параметры: те значения, которые выставляются на блоках управления вибратором. Обычно это – граничные частоты $F1$, $F2$, длительность свипа T , параметр нелинейности C , (только для НЧМ свипов; у ЛЧМ его нет), длительности конусов $t1$, $t2$ – начального и конечного и, наконец, вид сигнала – ЛЧМ, НЧМ (какой именно из их набора) – степенной (t -power), НЧМ – дБ/Гц, НЧМ – дБ/окт и, возможно, многие другие.

Реальные параметры: $F1p$, $F2p$, Tr , – это параметры свипа, который уже отработан вибратором (о Tr см. ниже). То есть эти параметры соответствуют реальному сигналу, который запускается в среду.

При этом значения параметров C , $t1$, $t2$ не меняются, так что для них оговаривать особые, реальные значения не требуется.

Помимо установочных параметров есть очень важный параметр, который необходим для контроля спектра свипа, это скорость частотной развёртки V_f на задаваемой частоте. В частности, V_{fo} – на частоте $F1$, её реальное значение V_{fp} – на частоте $F1p$. V_f связана с амплитудами спектра мощности $|S(F)|^2$ соотношением:

$$|S(F)|^2 = 1/V_f(t) = 1/F'(t) \quad (1)$$

То есть $V_f(t) = F'(t)$ – производной по

времени от функции $F(t)$ – частотной развёртки свипа. Равенство (1) позволяет достаточно просто контролировать и сравнивать амплитуды спектров мощности свипов.

Геофизические параметры: сюда, помимо установочных, следует отнести параметры эффективных спектров $F1a$, $F2a$, окт (октавность), а также $F1p$, $F2p$, Tr , V_{fo} и V_{fp} , и другие параметры или их комбинации по выбору геофизика. Здесь буква «а» при $F1a$, $F2a$ обозначает «активные» (по Агееву Д.В.) значения частот активного участка спектра. Октавность «окт» здесь тоже эффективная.

Вторая особенность аналитических (библиотечных) НЧМ свипов.

Это заметное увеличение реальной начальной частоты после конусования. Аподизация, или на жаргоне геофизиков – конусование, известная в спектральном анализе операция, но её действие для квазисинусоид с меняющейся во времени частотой имеет определённую специфику.

Из радиолокации известна зависимость спектра мощности от частотной развёртки (равенство (1)). Для строго монотонных функций $F(t)$ существует обратная функция $t(F)$, так что $1/F'(t) = t'(F)$. Отсюда можно доказать, что площадь спектра мощности равна T – длительности свипа в пределах диапазона частот $F1 - F2$. Это легко проверить по формулам частотной развёртки любого ЛЧМ или НЧМ – свипа, заданного математической формулой (см. [1, 3]).

Поскольку из-за конусования спектр мощности сглаживается с краев, то и введен параметр Tr – реальная длительность свипа (не для установки, а для логики рассуждений и контроля параметров).

Конусование «захватывает» части площади спектра, равные длительнос-

тям интервалов конусования – t_1 , t_2 . Очевидно, что при одном и том же временном интервале конусования, но при различной скорости изменения частоты, конусование захватывает различные частотные интервалы. Чем ниже спектральные амплитуды (и выше скорость развёртки частоты свипа), тем больше полоса частот, захватываемая конусом, и наоборот. (см.[1,3]).

Частотный интервал, перекрываемый «конусом» одной и той же длительности, разный в зависимости от типа свипа. Он наибольший у степенного свипа (« $t - power$ »), у которого спектральная амплитуда на начальной нижней частоте равна нулю. При наибольших показателях степени у « $t - power$ » мы теряем низкие частоты от F_1 до 20 – 35 Гц, вследствие чего заметно падает прослеживаемость отражений (см.[1,3]). Тот, кто планирует вибросейсмические работы, должен это понимать. Конечно, со степенным свипом лучше не работать, но увеличение реальной начальной частоты есть у всех

свилов, в том числе и у ЛЧМ, и это нужно контролировать.

Фрагмент А: сравнение спектров мощности двух НЧМ свилов в диапазоне 10-120 Гц:

зелёная кривая – спектр конусованного стандартного свипа дБ/окт 10-120 Гц/10с 6дБ/окт;

синяя кривая – спектр неконусованного свипа «Парадокс» с добавкой 0.7 секунд времени на частоты 10 – 20 Гц; красная кривая – спектр конусованного свипа «Парадокс».

После 35 Гц спектры дБ/окт и Парадокс почти одинаковы.

Фрагмент Б: автокорреляционные функции исходного свипа дБ/окт (синяя кривая) и свипа «Парадокс» (красная кривая). По форме АКФ можно заметить, что у «Парадокс» свипа несколько ниже средняя частота и больше октавность – побочные экстремумы имеют меньшие амплитуды.

Фрагмент В: спектр адаптивного сигнала 10-80 Гц, где по технологии

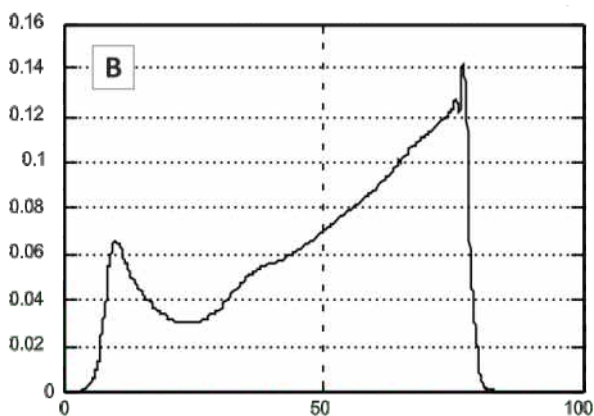
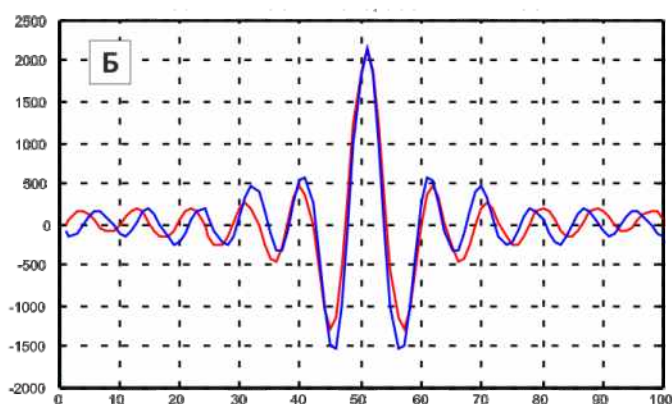
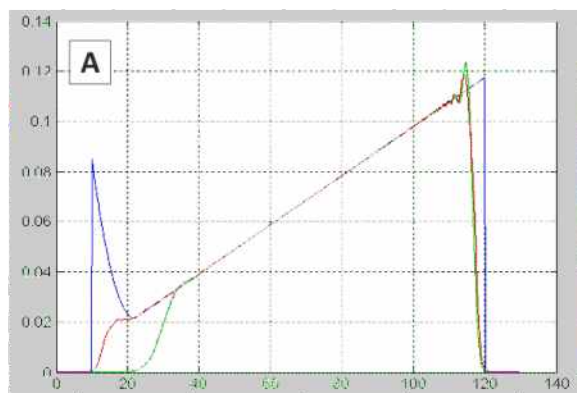


Рис. 4. Компенсация увеличения реальной начальной частоты НЧМ свипа с помощью добавления времени на нижние частоты НЧМ свилов: стандартного «дБ/окт» (А) и адаптивного – (В), (технология АВИСейс).

АВИСейс уже добавлена энергия на низкие частоты НЧМ свипа, чтобы компенсировать нежелательное увеличение начальной частоты после конусования.

Способы частичной компенсации роста реальной начальной частоты у свипов могут быть разными. Например, это просто увеличение общей длительности свипа T , но это нежелательно, поскольку соответствует известному афоризму «время – деньги». Другой вариант – использование специально построенного свипа со спектром, где добавлено немного (примерно около 10% от T) времени на низкие частоты [2, 4]. Напомним, что время равно площади спектра мощности свипа [1]. Другой способ – добавка времени в начало частотного диапазона при вычислении спектра оптимального свипа по технологии АВИСейс [2].

Способы компенсации увеличения начальной частоты свипа F_{1p} , связанные с добавлением небольшого количества времени на низкие частоты, показаны на рисунке 4. Фрагменты рисунка 4: А и 4-Б соответствуют «подправленным» вариантам НЧМ свипов, имеющихся на всех блоках управления вибраторами («библиотечным» НЧМ свипам). Реальная начальная частота с 30 Гц уменьшилась до 16 Гц (почти на октаву!). При этом ошутимое изменение формы АЧФ видно на рисунке 4 – Б. На фрагменте 4 – В показан пример спектра свип-сигнала, формируемого по адаптивной технологии АВИСейс. Здесь уже не требуется ничего добавлять.

Третья особенность НЧМ свипов

Это взаимозависимость выбираемых параметров свипа, которые должен контролировать геофизик – методист. При проведении опытных работ в большинстве случаев геофизики перебирают значения установочных (на вибраторе)

параметров, считая их независимыми, и анализируют вид коррелограмм. Установочные параметры и в самом деле независимы между собой, но оценка качества вибросейсмического материала при их переборе производится не только по ним, но и по их «атрибутам», в том числе по комбинациям параметров.

В частности, результат опыта при выборе установочных параметров зависит не только от граничных частот F_1 , F_2 , времени T и параметра нелинейности (обычно для НЧМ: $C = \text{дБ/Гц}$, $C = \text{дБ/окт}$, или $C = \log(A_2/A_1)$, где A_1 и A_2 – спектральные амплитуды на частотах F_1 и F_2 , соответственно, до конусования свипа), но и от распределения энергии свипа по частотам. Для линейного свипа, имеющего прямоугольный спектр, энергия постоянна в диапазоне граничных частот и равна $T/(F_2 - F_1)$. Она есть обратная величина скорости частотной развёртки V_f на начальной реальной частоте F_{1p} . Из формулы $V_f = (F_2 - F_1)/T$ следует, что при переборе частот меняется и энергия (высота прямоугольника, соответствующая спектру ЛЧМ свипа) на одной и той же выбранной частоте, равная $1/V_f$, что хорошо видно на рис. 5-А и 5-Б, а при переборе значений длительности на (рис. 5-В в сравнении фигур 5-В-1, 2, 3, и 5-В-4) меняются и реальные граничные частоты.

Если мы хотим подбирать граничные частоты, то естественно полагать, что энергия должна сохраняться на тех частотах, которые не затрагиваются при переборе значений нижней или верхней частоты, но тогда должна меняться общая энергия свипа, то есть его длительность, что хорошо видно на рис. 5-В, на фигурах В-1, В-2 и В-3., где перебирается верхняя частота, но меняется и общая площадь спектра свипа. Видно, что при смещении частоты F_2 нужно исправлять

и значение T , а это обычно никто не делает.

Что касается изменения граничных реальных частот при изменении длительности свипа, то, на первый взгляд, кажется, что эти изменения малы и их можно не учитывать. Но оказывается, что можно безболезненно пренебречь лишь изменением верхней частоты.

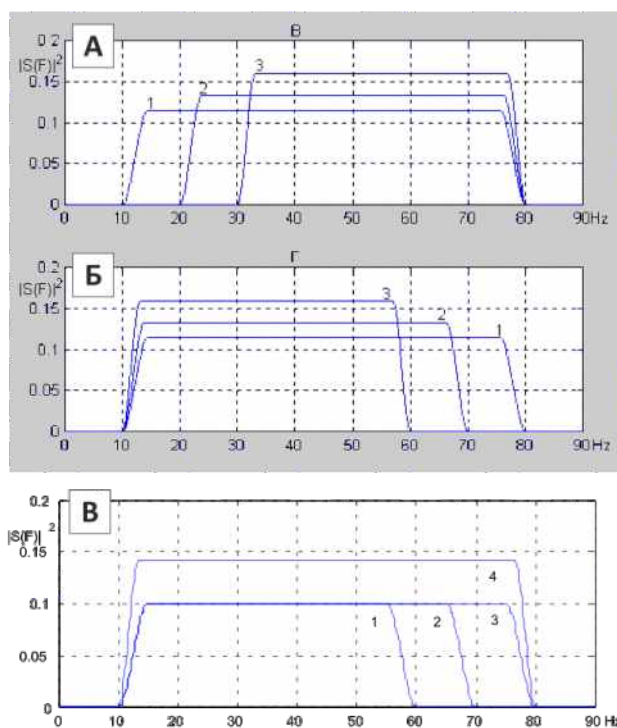
Пример: свип 4 – 84Гц/10с, конуса по 0.5с. Условия работ близки к стандартным. Скорость частотной развёртки – $(84 - 4)/10 = 8$ Гц/с. На конус длительностью 0.5с приходится 4Гц. Тогда реальная начальная частота – 8Гц, но от 4Гц до 8Гц – одна октава, то есть мы теряем целую

октаву в начале спектра записи, что, безусловно, должно сказаться на качестве результатов.

При использовании НЧМ свипов взаимозависимость параметров выглядит сложнее, прежде всего из-за добавления параметра нелинейности, вследствие чего при изменении частоты меняется скорость частотной развёртки (и, соответственно, энергия спектра). Если при ЛЧМ свипе нужно контролировать 4 параметра – $F1$, $F2$, T , Vfo , то при НЧМ – пять: $F1$, $F2$, T , C , Vfo . При этом из 5-ти параметров только 4 независимых, а 5-ый вычисляется по

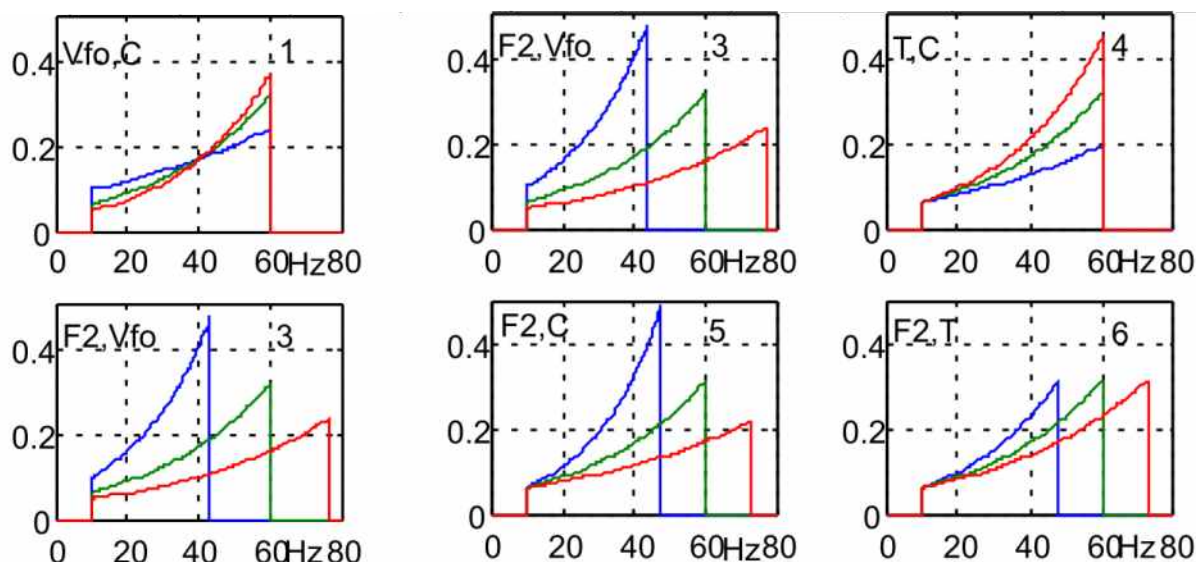
4-ем выбранным. При этом в качестве зависимого можно взять любой параметр из пяти и определить его зависимость от любого параметра из оставшихся четырёх, зафиксировав значения оставшихся трёх параметров. На рисунке 6 показано только 6 вариантов взаимозависимостей параметров, но на деле их больше. На каждой позиции три параметра фиксированы, а два – взаимосвязаны (они указаны в левом верхнем углу каждой позиции).

Например, на позиции 6-1 фиксированы значения частот и длительность – $F1$, $F2$ и T , а коэффициент нелинейности C и начальная скорость развёртки Vfo взаимозависимые параметры. Если мы хотим увеличить C , т.е. подбавить энергию на высокие частоты, то энергия $1/Vfo$ на начальной частоте уменьшается, то есть возможно ухудшение прослеживаемости, а также увеличение начальной реальной частоты $F1p$ после конусования. Чтобы этого не было, при увеличении C нужно подбавлять энергию на высокие частоты за счёт увеличения времени T , что можно видеть на позиции 6-4, где фиксированы $F1$, $F2$, и Vfo , а значения C и T – взаимосвязимы. Кстати говоря, следует помнить, что если в блоке управ-



▲ Рис. 5. Взаимозависимость геофизических параметров ЛЧМ свипа.

«А», «Б» – результаты обычного перебора частот $F1$ и $F2$. «В-1,-2 и -3 - правильный выбор $F2$ – с изменением общей длительности свипа. Фигура «В»-4 соответствует увеличению общей длительности свипа в интервале частот 10 – 80 Гц, причём видно расширение реального диапазона частот при постоянных значениях $t1$, $t2$ – длительностях интервалов конусования.



▲ Рис. 6. Взаимозависимость геофизических параметров НЧМ свипа. На каждом из шести позиций из пяти параметров $F1$, $F2$, T , C , Vfo фиксированы три параметра, а два зависимы (они показаны в левом верхнем углу каждой позиции) и их изменения видны на спектрах мощности. В качестве параметра нелинейности C взят логарифм отношения спектральных амплитуд на частоте $F2$ к амплитуде на $F1$, последняя равна обратному значению параметра Vfo ; длительности T соответствует площадь спектра. Разным спектрам соответствуют разные значения зависимых параметров.

ления (БУСВ) не учтена возможность взаимозависимости параметров свипов, то при переборе значений C могут «поплыть» значения и $F1$, и $F2$, и T , и Vfo . Здесь упомянут параметр Vfo , поскольку на некоторых БУСВ он входит в число установочных параметров, например, вместо $F2$.

Если при ЛЧМ свипе независимый перебор значений установочных параметров даёт среднее качество результатов, то при НЧМ свипах прийти путём перебора к приемлемому решению в ограниченные сроки опытных работ практически не удаётся.

Выход из неприятностей с выбором оптимальных параметров НЧМ свипов разумеется есть и он давно опубликован, в частности, в [1, 3].

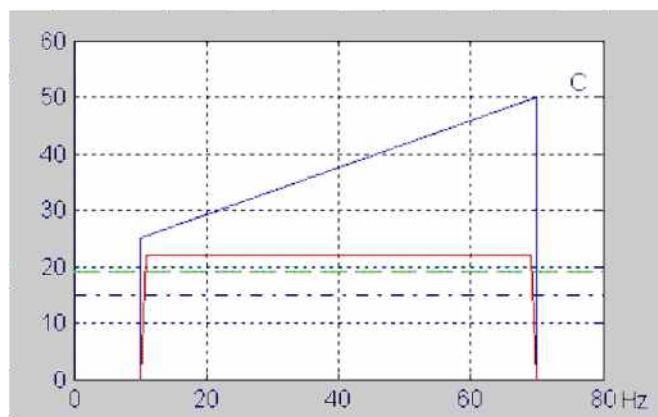
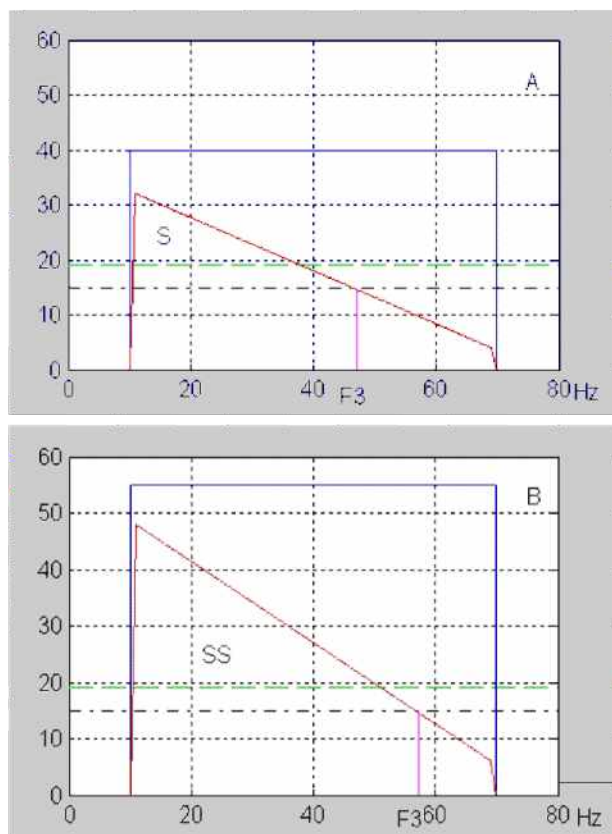
Наконец есть ещё одна особенность использования НЧМ свипов, которую стоит упомянуть и которую нужно учитывать всем заказчикам вибросейсмических работ, поскольку она связана с умень-

шением стоимости работ с НЧМ свипами по сравнению с ЛЧМ без потери качества результатов.

Четвёртая особенность НЧМ свипов: «время – деньги».

Проанализируем рисунок 7, где рассмотрены схемы (близкие к реальности) вариантов послылки двух ЛЧМ свипов разной длительности и одного НЧМ свипа, соответствующего свипу децибел-на-октаву с параметром нелинейности 6дБ/окт. Это приблизительно соответствует росту энергии от нижней частоты к верхней в 15 – 17дБ, часто встречающейся величине для оптимальных НЧМ свипов при диапазоне частот 10 – 70Гц для работ до времён 2.5 – 3.0 секунды в нефтеносных районах РФ.

Рисунок 7-А схематически иллюстрирует послылку ЛЧМ свипа 10 – 70Гц/12с, при котором частоты, на которых энергия свипа превышает уровень помех, находятся в диапазоне 10Гц < $F3$ <= 47Гц. Синим цветом показан спектр опорного сигнала,



Условные обозначения :

- спектры мощности посылаемых свип — сигналов,
- спектры мощности принимаемых сигналов,
- спектр шумов,
- допустимый уровень энергии принятого сигнала,

▲ Рис. 7. Пояснение преимуществ использования нелинейных свипов по сравнению с линейными при наличии в среде частотно – зависимо затухания сейсмической энергии. F3 – верхняя граница рабочей полосы частот, S SS – избыточная часть энергии ЛЧМ свипа при разных граничных частотах рабочей полосы.

красным - спектр свипа после частотно-зависимого затухания в среде - то есть спектр принятого сигнала. Зелёной чертой обозначен уровень энергии, выше которого не требуется повышать энергию свипа, точками/пунктиром (чёрного цвета) обозначен уровень шумов. Очевидно часть спектра принятого сигнала выше зелёной линии, обозначенная буквой «S», «лишняя» для анализа результатов часть спектра посылаемого свипа, с точки зрения поставленной задачи вибросейсмических работ.

Чтобы расширить диапазон частот, где сигнал превышает помеху, при ЛЧМ свипе обычно увеличивают его длительность. Этот вариант показан на схеме 7-В, где рассмотрен свип 10 – 70Гц с длительностью 16.5с. Здесь правая граничная частота рабочего диапазона частот F3

возросла до 57Гц и, соответственно, возросла «лишняя» энергия, обозначенная здесь буквами «SS».

На рис. 7-С показан результат послыски правильно подобранного НЧМ свипа (здесь это свип 10 – 70Гц/11.25с – 6дБ/окт), при котором энергия принятого сигнала превышает уровень шумов во всём частотном диапазоне 10 - 70Гц, т.е. здесь F3 = 70Гц притом, что длительность несколько меньше, чем при ЛЧМ свипе 10 – 70Гц/12с, а рабочий диапазон частот заметно шире. Он даже шире, чем у свипа 10 – 70Гц/16.5с.

Увеличение энергии на высоких частотах, там, где её недостаток вследствие ЧЗ - затухания при ЛЧМ свипах, при уменьшении её на низких частотах, где её избыток, можно представить как перекачку энергии с низких частот на высокие.

При одном и том же частотном диапазоне НЧМ свип не требует увеличения энергии для повышения разрешённости, по сравнению с ЛЧМ свипом [5]. Однако, если нам нужно расширить частотный диапазон опорного сигнала, т.е. увеличить F_2 , тогда нужно увеличивать длительность свипа – как ЛЧМ, так и НЧМ, хотя и в разной степени.

Пока что мы рассматривали улучшение качества результатов, полученных с ЛЧМ свипом при переходе к НЧМ свипам без изменения установочных параметров F_1 , F_2 и T . Вместе с тем если качество результатов при ЛЧМ свипе нас устраивает, тогда то же качество, но с НЧМ свипом, можно получить с уменьшением времени отработки объекта на 25 – 30%. Из опыта вполне успешных работ с НЧМ свипом следует, что при ЛЧМ свипе начальную энергию $1/V_{fo}$ на частоте F_1 можно уменьшить в 2 – 3 раза (т.е. начальную скорость частотной развёртки увеличить в 2 – 3 раза). Если качество работ с ЛЧМ свипом нас устраивает, то и энергия НЧМ свипа на частоте F_2 нас тоже устраивает. Тогда спектр опорного ЛЧМ свипа изобразим в виде прямоугольника шириной от F_1 до F_2 , высотой - $1/V_{fo}$ и площадью - T . У этого прямоугольника левую сторону уменьшим вдвое или втрое (два варианта) и он превратится в трапецию (её спектр соответствует НЧМ свипу) с площадью $0.75 * T$, если левая сторона уменьшена вдвое, или $0.67 * T$, если эта сторона уменьшена втрое. В данном случае площадь спектра мощности – это длительность свип-сигнала. Отсюда и следует оценка уменьшения длительности свипа на 25% или на 33%, и это только в результате перехода от ЛЧМ к НЧМ свипам.

Здесь парадокс состоит в том, что при ЛЧМ свипе мы не можем как следует распорядиться его энергией, как при

НЧМ, поскольку большинству геофизиков простота методики работ дороже целесообразности.

Отметим, что уменьшение энергии на низких частотах ведёт к уменьшению глубинности, то есть выбор параметров свипов должен быть согласован с решением геологической задачи данных работ.

В заключение надо отметить, что данная публикация не содержит никаких новых идей. Всё давно уже описано и издано, но, как показывает практика вибросейсмических работ, необходимо ещё раз упомянуть об особенностях применения НЧМ свипов, чтобы они, наконец, перестали быть только резервом повышения качества результатов вибросейсморазведки, а вошли бы полноправно в практику полевых работ.

Выводы.

1) Оценку качества возбуждения следует проводить по разрешённости целевых отражений на коррелограммах, а не по автокорреляционному импульсу на служебном канале, поскольку в результате частотно-зависимого затухания в среде эффективный спектр оптимального нелинейного свипа расширяется до исходных граничных частот, тогда как эффективный спектр ЛЧМ свипа сужается с понижением верхней граничной частоты.

2) Неконтролируемое уменьшение энергии спектра НЧМ свипа на начальной частоте может привести, вследствие конусования, к чрезмерному сдвигу реальной начальной частоты свипа в сторону высоких частот, что приведёт к потере низких частот у корреляционного импульса, к ухудшению прослеживаемости осей синфазности и уменьшению октавности сейсмической записи (к появлению побочных осей синфазности).

В числе параметров НЧМ свипа, кроме граничных частот, длительности и коэффициента нелинейности, необходимо контролировать скорость частотной развёртки V_{fo} на начальной частоте свипа.

3) Существует взаимозависимость геофизических параметров как у ЛЧМ, так и у НЧМ свипов. При опытных работах недопустимо перебирать значения одного параметра свипа, не контролируя изменение других параметров, значимых для оценки качества коррелограмм.

4) При одном и том же частотном диапазоне использование нелинейного свипа (НЧМ) вместо линейного (ЛЧМ) позволяет уменьшить время отработки ПВ на 25% – 30% и тем самым уменьшить стоимость работ.

РЕКОМЕНДАЦИЯ

по выбору значений параметров НЧМ свипов (см. [1, 3])

Взять в качестве F_1 самую низкую частоту, какую могут обрабатывать имеющиеся в партии вибраторы

По результатам предыдущих работ с ЛЧМ свипами в данном регионе отработать несколько ф.н. с ЛЧМ свипом при заданных F_1 , предыдущих F_2 и выбирая время $T_{оп}$ (для опытов со скоростью частотной развёртки на нижней частоте – V_{fo}), приближённо в 2-3 раза меньшее, чем при предыдущих работах. Анализировать разрешённость и прослеживаемость следует только на низких и средних частотах.

Скорость частотной развёртки на частоте F_1 тогда можно взять равной $V_{fo} = (F_2 - F_1) / T_{оп}$. Далее, фиксируя, например, длительность T (заданную начальством или заказчиком), мы имеем уже три параметра V_{fo} , F_1 и T (из пяти контролируемых параметров НЧМ свипа

– V_{fo} , F_1 , F_2 , T , C) и уже можем выбрать приемлемую пару значений F_2 и коэффициента нелинейности C . Для расчётов потребуется компьютерная программа типа «РАПАНС» (РАсчёт ПАраметров Нелинейных Свипов, составленная в ООО «ГСД»). С её помощью можно, задавая значения любых 4-х параметров из пяти, можно вычислить значение пятого параметра.

Меняя значения параметров F_2 или C , анализируем качество коррелограмм (прослеживаемость целевых отражений на высоких частотах). Если нет подходящей пары значений F_2 и C , то следует увеличить время T и подбирать новые значения F_2 и C .

Литература

- 1) Жуков А.П., Колесов С.В., Шехтман Г.А., Шнеерсон М.Б., 2011, Сейсморазведка с вибрационными источниками. // Тверь, Изд. «ГЕРС»
- 2) Жуков А.П. 2016, Технологии адаптивной вибросейсморазведки повышают качество и эффективность сейсморазведочных работ // Приборы и системы разведочной геофизики, №1 стр.71-79
- 3) Колесов С.В., Потапов О.А., Иноземцев А.Н., Захарова Г.А. 2002, Использование нелинейных свипов при высокоразрешающей вибро-сейсморазведке. // ЕАГО, «Геофизика» № 1, стр.18-28.
- 4) Колесов С.В., Иноземцев А.Н., Потапов О.А., 2005 Корректировка низкочастотных частей спектров нелинейных функциональных свипов. // Геофизический вестник № 6, с.13-15
- 5) Колесов С.В., Потапов О.А., Иноземцев А.Н. 2005 О выборе оптимального вибросейсмического сигнала. // Геофизический вестник № 7, стр.4-7
- 6) Притчетт У. 1999, Получение надёжных данных сейсморазведки // Мир, М.
- 7) Харкевич А.А. 1962 Спектры и анализ. // Физматгиз, М. 4-е изд.