

Министерство науки, высшей школы и технической
политики России

Нижегородский научно-исследовательский
радиофизический институт

П р е п р и н т N 394

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЧАСТОТНОГО СИНТЕЗА
СИГНАЛА ПРИ ГЕОЛОКАЦИИ ТОНАЛЬНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

Бубнов Е. Я. , Гущин В. В. , Заславский Ю. М. ,
Новиков Б. В. , Рубцов С. Н.

Н. Новгород
1994

Бубнов Е. Я., Гущин В. В., Заславский Ю. М.
Новиков Б. В., Рыбцов С. Н.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ЧАСТОТНОГО СИНТЕЗА
СИГНАЛА ПРИ ГЕОЛОКАЦИИ ТОНАЛЬНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ.**

//Препринт N 394.

-Нижний Новгород:НИРФИ.-1994.-15с.

В работе проведено обоснование применения в геолокации метода частотного синтеза сигналов, приведены результаты экспериментальной проверки метода.

Применение в геолокации источников тонального сигнала вызвано их большей экологичностью по сравнению с взрывными и ударными, поскольку они позволяют за счёт методов обработки, таких как фильтрация, накопление, свёртка получать сходные данные при меньшей излучаемой пиковой мощности. Для разрешения по глубине используется либо импульсный режим работы источника, либо непрерывный режим, при котором излучается частотноманипулированный сигнал с его последующей свёрткой в процессе обработки. Разрешение по глубине в обоих случаях ограничивается шириной полосы частот электромеханических, гидравлических или пьезоэлектрических излучателей.

Рассмотрим для примера две различные по целям задачи, предположив, для простоты оценки, что дисперсия в грунте отсутствует, а амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) грунта имеет равномерный характер.

Первая – геолокация верхнего (1 – 2м) слоя грунта. Она может использоваться для поиска подземных коммуникаций, дренажных труб (не обязательно металлических), неоднородностей типа каменных включений и т. д. Для решения этой задачи обычно применяются высокочастотные импульсные геолокаторы излучающие короткие тональные импульсы. Такая геолокация имеет смысл при разрешении по глубине не менее, чем 10 – 20

см, что, даже учитывая низкую скорость звука в приповерхностном слое (250–350 м/с), требует полосы зондирующего сигнала в 2,5–3,5 кГц, в то время, как полоса большинства высокочастотных источников лежит в пределах 0,2–1 кГц.

Обужение полосы частот источником приводит к "затягиванию" излучаемых им импульсов, что ухудшает разрешение по глубине. Расширить полосу источника можно его демпфированием или путём введения отрицательных обратных связей, но эти операции понижают амплитуду сигнала источника.

Вторая задача - использование мощных тональных источников для прозвучивания грунта на глубину в несколько сотен метров [1–4]. Такие источники, как правило, не могут воспроизвести импульсные сигналы и разрешение по глубине при их использовании достигается за счёт свёртывания частотноманипулированного сигнала. Для разрешения порядка 5м, учитывая высокую (более 1000 м/с) скорость звука на глубине, требуется рабочая полоса источника не менее 200 Гц, что является пределом для большинства подобных источников.

Операция свёртки частотноманипулированного сигнала, чаще всего сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), в настоящее время технически хорошо отработана, но в виду большого объёма обрабатываемой информации, свёртка сигнала обычно проводится при вторичной обработке записи сигнала в ЭВМ, что резко снижает оперативность работы.

Ниже изложен реализованный способ повышения разрешения по глубине для сейсмических источников тонального и импульсного сигналов, который заключается в синхронном накоплении сигналов разной частоты, излучаемых источником и синтезе частотной характеристики источника. Предлагаемый способ по идеологии подобен свёр-

тке ЛЧМ сигналов, но имеет перед последним некоторые технические преимущества, так как заменяет операцию свёртки простым суммированием и позволяет легко проводить коррекцию частотной и фазовой характеристик излучателя.

Способ заключается в следующем: излучаемый тональный сигнал на некоторой частоте f_1 принимается сейсмоприёмником и запоминается на некотором временном отрезке T , далее с ним складывается сигнал, излученный на частоте f_2 , причём начальная фаза сигнала задающего генератора на частоте f_2 равна начальной фазе такого же сигнала на частоте f_1 . Такая операция производится для набора синусоидальных сигналов в полосе f_1-f_n . Таким образом, в предельном случае сигнал на выходе излучателя описывается выражением:

$$A(t) = \int_{w_1}^{w_2} A \cos wt \, dw, \quad 0 < t < T, \quad (1)$$

что с точностью до коэффициентов соответствует

$$A(t) = \frac{\sin \frac{w_2 - w_1}{2} t}{\frac{w_2 - w_1}{2}} * \cos \frac{w_2 + w_1}{2} t \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что длительность синтезированного импульса определяется шириной полосы частот, используемых при синтезе, а частотное заполнение внутри импульса — центральной частотой в полосе синтеза. Фаза заполнения определяется фазой исходного сигнала.

В случае реального излучателя необходимо учитывать его частотную характеристику. В этом случае в подынтегральное выражение (1) вводится множитель $U(f)$, учитывающий изменение уровня излучаемого сигнала с частотой. При работе с

импульсными источниками необходимо ввести множитель $P(t)$ — огибающую импульса, сформированного источником.

В реальном случае при проведении синтеза сигнала используется дискретный ряд частот и синтезированный сигнал описывается суммой гармоник с "весом" $U(f)$:

$$A(t) = \sum_{i=1}^n U(f_i) \cos 2\pi f_i t \quad (3)$$

Переход от интеграла к конечной сумме приводит к формированию не одиночного импульса, а последовательности импульсов, имеющих период следования $T=1/f_{\Delta}$, где f_{Δ} — дискрет частоты при синтезе сигнала с равномерным частотным шагом. Неоднозначность по времени при этом будет равна $t=2/f_{\Delta}$. Для импульсных сигналов, благодаря присутствию в выражении множителя $P(t)$, неоднозначность устраняется.

Из условия неоднозначности определяется минимальное число слагаемых в выражении (3). Оценка проводится исходя из условий задачи — требуемого разрешения по глубине и заданной глубины зондирования. Пусть заданным условиям удовлетворяет импульсный процесс с длительностью синтезированного импульса $t=1/\Delta F$, где ΔF — полоса частот, в которой производится синтез, и периодом следования импульсов $T=N/\Delta F$, где N — скважность процесса. Исходя из того, что T из условий неоднозначности равно $1/f_{\Delta}$, получаем $-\Delta F/f_{\Delta}=N$, или число синусоидальных сигналов при синтезе не должно быть меньше заданной скважности процесса.

До сих пор рассматривался сигнал сформированный на выходе излучателя. Для суммы синусоидальных сигналов распространяющихся в грунте

со скоростью V выражение (3) переходит в

$$A(t) = \sum_{i=1}^n U_i(f_i) \cdot \cos[2\pi f_i (t-r/V)], \quad (4)$$

что аналогично импульсу, распространяющемуся в грунте со скоростью V и на приёмнике, расположенном в грунте на глубине r , в результате синтеза в момент $t=r/V$ сформируется импульс вида (2).

Таким же образом можно показать, что на датчике расположенном на поверхности ($r=0$) сворачивается не только сигнал с излучателя, но и отражённые сигналы. Предположим, что на приёмник находящийся на поверхности вблизи излучателя поступает, кроме прямого, отражённый сигнал с задержкой τ . В этом случае выражение для синтезированного сигнала будет:

$$A(t) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \{A \cos \omega t + A \cos \omega [(t-\tau) + \psi]\} d\omega \quad (5)$$

То есть, отражённые сигналы синтезируются наряду с прямым с соответствующей задержкой по времени.

Поскольку в процессе синтеза суммируются дискретные сигналы, имеется возможность коррекции частотной характеристики излучателя варьированием числа накопленных реализаций на различных частотах. Если фазовая задержка, вносимая в сигнал излучателем не постоянна в полосе синтеза, а зависит от частоты, возможна коррекция фазовой характеристики излучателя путём заданного изменения начальной фазы сигнала при накоплении. Способ предполагает отсутствие диспе-

рсии при распространении сигнала в грунте. Если дисперсия всё же имеется, она приведёт к "рассыпанию" синтезированного импульса точно такому же, как и для реального импульса такой же формы.

На первый взгляд описываемый способ значительно проигрывает по времени реализации по сравнению с традиционными, поскольку предполагает последовательное суммирование многих посылок сигнала. Однако суммирование посылок (накопление) часто используется и в традиционных способах для повышения помехоустойчивости, с той разницей, что в них суммируются одинаковые сигналы. Кроме того, описываемый способ представляет синтезированный (аналогичный свёрнутому) сигнал сразу по окончании суммирования без потерь времени на вторичную обработку.

Существенным недостатком способа частотного синтеза импульса по сравнению с традиционной свёрткой ЛЧМ-сигнала является его малый коэффициент полезного действия, поскольку выигрыш в отношении сигнал/шум обеспечиваемый свёрткой ЛЧМ при прочих равных условиях в одной посылке обеспечивается в описываемом способе за N посылок сигнала.

Была проведена экспериментальная проверка предложенного способа. Блок-схема эксперимента приведена на рис. 1.

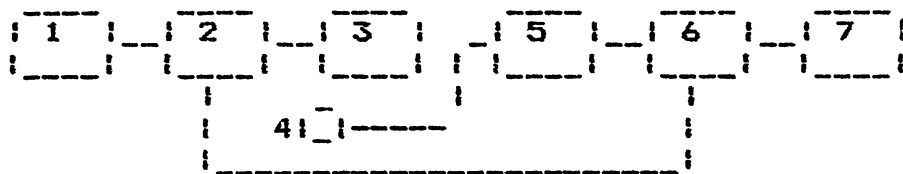


Рис. 1

Блок-схема эксперимента.

1. Заданный звуковой генератор.
2. Устройство ВИШНУ-ЗМ (разработка НИРФИ).

3. Стержневой пьезокерамический вибратор (разработка НИРФИ).
4. Акселерометр типа ПАМТ 4БШ.
5. Усилитель УМ-6.
6. Цифровой накопитель (разработка НИРФИ).
7. Самописец.

Задающий сигнал звукового генератора 1 поступал на вход устройства 2, которое формировало на частоте генератора последовательность электрических импульсов мощностью около 1 кВт в импульсе с заданной длительностью и скважностью. Начальная фаза частотного заполнения импульса равнялась нулю при любой частоте заполнения. Сформированная последовательность электрических импульсов подавалась на стержневой пьезокерамический вибратор 3, имеющий резонансную частоту 2,9 кГц и ширину полосы по уровню 0,7 - 200 Гц. (Частотная характеристика вибратора приведена на рис. 2). Сформированный вибратором сейсмический сигнал принимался акселерометром 4 типа ПАМТ 4БШ и через усилитель с высоким входным сопротивлением УМ-6 5, поступал на цифровой накопитель 6 с 11-ти разрядным аналого-цифровым преобразователем на входе и 24-разрядной памятью и сумматором. Работа накопителя синхронизовалась устройством 2. Регистрация накопленного сигнала производилась самописцем 7.

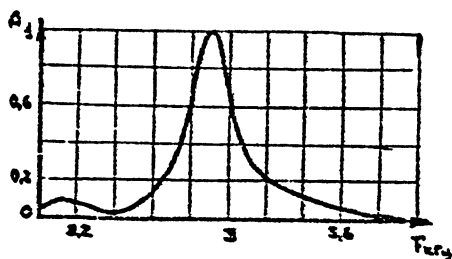


Рис. 2

Частотная характеристика вибратора

метром 4 типа ПАМТ 4БШ и через усилитель с высоким входным сопротивлением УМ-6 5, поступал на цифровой накопитель 6 с 11-ти разрядным аналого-цифровым преобразователем на входе и 24-разрядной памятью и сумматором. Работа накопителя синхронизовалась устройством 2. Регистрация накопленного сигнала производилась самописцем 7.

В эксперименте осуществлялся синтез сейсмического импульсного сигнала в полосе несущих частот импульса 2,5–3,5 кГц. Дискрет частоты при синтезе был выбран равным 100 Гц. Частотной и фазовой коррекций не проводилось.

Для проведения синтеза на стержневой вибратор с устройства 2 подавалась последовательность электрических импульсов с несущей частотой 2,5 кГц и длительностью равной двум периодам несущей частоты. Глубина посыла выбиралась не менее 20. Излученные вибратором сейсмические сигналы принимались акселерометром 4. В память цифрового накопителя 6 при каждом импульсном зондировании вводилась реализация сигнала длительностью 20 мс, считая от момента вступления. В накопителе суммировались 10 таких реализаций. После этого звуковым генератором увеличивалась на 100 Гц несущая частота электрического импульса и 10 реализаций сигнала с измененной несущей частотой суммировались с предыдущими. Далее частота заполнения импульса опять увеличивалась на 100 Гц и вся операция повторялась до тех пор, пока частота заполнения в импульсе не достигала 3,5 кГц. Таким образом, на выходе накопителя формировался сигнал, являющийся суммой ста реализаций принятого импульсного сигнала, причём каждые десять реализаций отличались частотой заполнения импульса.

На рис. 3а, б изображены исходный импульс вибратора на частоте 2,9 кГц (рис. 3а) и синтезированный импульс (рис. 3б). Исходный импульс представляет собой затухающий колебательный процесс, длительность которого определяется шириной частотной характеристики вибратора. Длительность синтезированного импульса значительно короче исходного, но спад его всё же более медленный, чем предсказывается теорией. Амплитуда синтезированного импульса на 10 дБ меньше, чем исходного. Вызвано это тем, что фазовые ус-

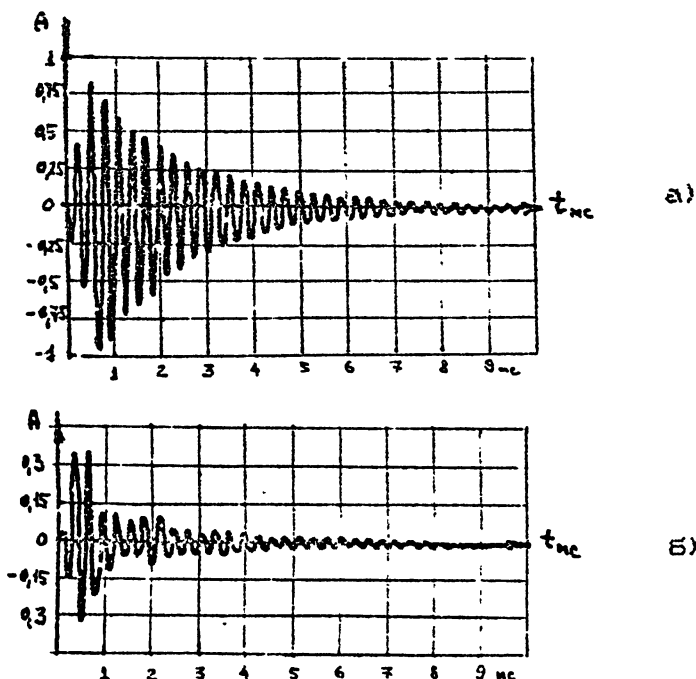
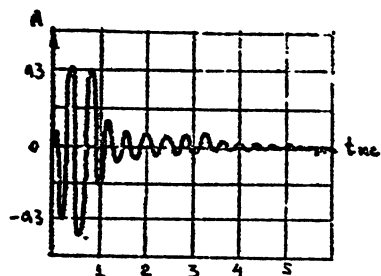


Рис. 3

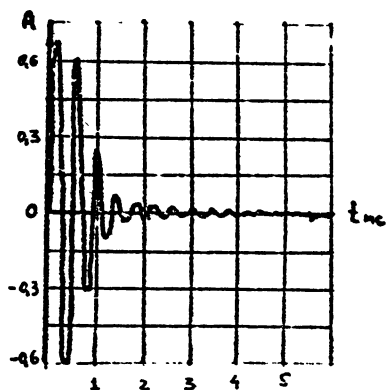
Вид исходного импульса вибратора на частоте 2,9 кГц (а) и синтезированного импульса (б).

ловия для синтеза в эксперименте не были оптимальными. За отсчётную точку при синтезе ($t=0$) было принято начало электрического импульса. В этот момент вибратор ещё не успевал "раскачаться" и суммирование сфазированных сигналов проводилось при их малых амплитудах. Это привело к уменьшению максимальной амплитуды синтезированного импульса и некоторому относительному подъёму его "хвостов", что хорошо видно на рис. 3б. За начало синтеза в подобном случае надо выбирать не начало электрического возбуж-

дения, а а его окончание — момент наиболее интенсивных колебаний вибратора. В эксперименте это не было осуществлено из-за того, что в момент его проведения отсутствовала привязка к окончанию электрического импульса. На рис. 4а, б приведены расчётные формы синтезированного импульса при синхронизации накопителя началом (рис. 4а) и окончанием (рис. 4б) электрического возбуждения вибратора.



а) Вид синтезированного импульса при синхронизации началом электрического возбуждения вибратора.



б) Вид синтезированного импульса при синхронизации окончанием электрического возбуждения вибратора.

Рис. 4

При синтезе непрерывного сигнала вибратора без частотной коррекции укорочения синтезированного импульса практически не было бы, поскольку его длительность определяется частотной характеристикой вибратора (см. рис. 2). Синтези-

рованный импульс только сменил бы форму, став из ассимметричного затухающего симметричным колоколообразным. В нашем случае, когда длительность электрического возбуждающего импульса меньше времени установления колебаний в вибраторе, играет роль не статическая, а динамическая частотная характеристика вибратора [5]. На рис. 5 приведён вид спектра синтезированного

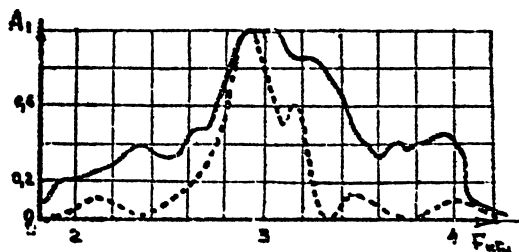


Рис. 5

импульса (сплошная кривая) и спектр несинтезированного импульса с частотой заполнения 2,9 кГц, который фактически совпадает с динамической частотной характеристикой вибратора на этой частоте. Из графиков видно, что при синтезе полоса частот сигнала расширяется и становится шире как статической, так и динамической частотной характеристики вибратора.

В завершение эксперимента была проверена возможность геолокации с синтезом импульсов. На рис. 6 показана синтезированная реализация сиг-

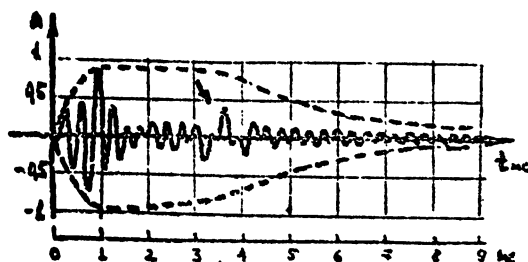


Рис. 6

нала в которой присутствует отражение от силового кабеля прикрытого кирпичём расположенного на глубине - 0,7 м (отмечено стрелкой). Синтез проводился в тех же условиях как и в предыдущих экспериментах. Приём сигнала осуществлялся пятью объединёнными акселерометрами, расположенными по окружности вокруг излучателя. Расстояние от датчика до края излучателя около 5 см. Для сравнения, штриховой линией на рисунке дана огибающая несинтезированного импульса для этого случая.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Fowler J. C., Waters K. H. Deep Crustal Reflection Recording Using "Vibroseis" Methods. A Feasibility Study. Geophysics, 40, N3, 399-410, 1975.
2. Krey T. Remarks on the Signal to Noise Ratio in the Vibroseis System. Geophysical Prospecting. 17, N3, 206-218, 1979.
3. К. Уотерс Отражательная сейсмология. "Мир", М. 1981.
4. Шнаерсон М. Б., Кайоров В. В. Наземная невзрывная сейморазведка. М. Недра. 1988.
5. Харкевич А. А. Спектры и анализ. Гос. издательство технической и теоретической литературы М. 1957, с. 129-137.