

Министерство общего и профессионального образования
Российской Федерации
Научно-исследовательский радиофизический институт

ПРЕПРИНТ № 438

**ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОВОГО СИНТЕЗА СИГНАЛОВ В
ЗАДАЧАХ ГЕОАКУСТИКИ**

Е.Я. Бубнов,
В.В. Гушин,
В.А. Кудрявцев,
С.Н. Рубцов

Н. Новгород, 1997

Е.Я. Бубнов, В.В. Гущин, В.А. Кудрявцев, С.Н. Рубцов
Применение фазового синтеза сигналов в задачах геоакустики.//
Препринт № 438
- Нижний Новгород: НИРФИ, - 1997. -20 с.

УДК 550.834

Рассмотрена возможности применения в геоакустических исследованиях последовательного суммирования сигналов с разными начальными фазами (фазовый синтез). Наиболее перспективным представляется суммирование сигналов при излучении которых осуществлен поворот фазы на π , что позволяет в процессе приема выделить продукты нелинейного преобразования четных степеней. Метод фазового синтеза может быть использован при изучении реологии грунта и нелинейных преобразований сейсмических колебаний. Приводятся результаты лабораторных исследований проведенных в геобассейне НИРФИ.

Подписано в печать 9.12.97г.

Бумага писчая.

Заказ 5469

Тираж

Формат 60x84/16

Объем 1,25. п.л.

50.'экз.

Отпечатано в НИРФИ

Современные средства цифровой обработки сигналов, позволяющие запоминать большие массивы информации и оперировать с ними, допускают применение в экспериментальных исследованиях методов, которые недавно использовались только в теоретических расчетах. В работах [1-3] была рассмотрена возможность применения в геофизических исследованиях метода частотного синтеза зондирующего импульса, т.е. создания импульса по частям набором и суммированием его отдельных спектральных составляющих. Такой способ, при сохранении всех достоинств импульсного режима, позволяет исправлять АЧХ источников сейсмосигнала, избавляться от комбинационных спектральных составляющих, порожденных нелинейностью грунта и уменьшает степень воздействия излучения на среду.

При проведении частотного синтеза сигналов обычно, кроме изменения частоты излучаемых сигналов приходится, для введения коррекции, изменять их амплитуды и фазы. Рассмотрим частный случай, когда изменяются только фазы слагаемых. По аналогии с работами [1-3] назовем этот метод "фазовым синтезом". При этом, в отличие от предыдущего случая, суммируемые процессы могут быть как протяженными, так и импульсными.

Если целью операции частотного синтеза является создание зондирующего сигнала заданной формы, то фазовый синтез предназначен для проведения экспресс-обработки принятого сигнала. Фактически, фазовый синтез это метод фильтрации, позволяющий создавать систему режекторных фильтров на заданных частотах. Его целесообразно применять при изучении нелинейных искажений, вклад в энергетику сигнала которых мал по сравнению с энергией основного сигнала. Если источником сейсмосигнала излучается монохроматическое колебание, то о величине нелинейных эффектов судят по высшим гармоникам колебания грунта, измерение величины которых является в большинстве случаев аппаратно решаемой задачей [4-6]. При работе с импульсными процессами, позволяющими локализовать расположение неоднородностей, задача усложняется, особенно в тех случаях, когда спектр принятого импульса достаточно широк и гармоники его отдельных спектральных составляющих пере-

крываются со спектральными составляющими импульса [7]. В этих случаях вклад нелинейных процессов можно определить только после сложной вторичной обработки зарегистрированного колебания. В тоже время, в большинстве экспериментов необходимо иметь оперативную предварительную информацию о величине нелинейных эффектов.

Режекция составляющей на основной частоте и выделение нелинейной составляющей при проведении измерений с импульсными процессами позволяет определить форму нелинейной составляющей, что, как показала практика, дает дополнительную информацию о механизме нелинейного процесса.

Возможны несколько вариантов изменения фазы слагаемых. В первом варианте в сигнал перед суммированием вносится заданная задержка по времени и фазовый сдвиг на различных спектральных составляющих различен. Во втором варианте изменяется на заданную величину начальная фаза всех спектральных составляющих излучаемого или принятого сигнала. В этом варианте проще всего реализуется смена полярности сигнала, т.е. поворот всех его составляющих на π .

Рассмотрим возможности первого варианта. Метод реализуется по блок-схеме приведенной на рис. 1



Рис. 1

Реализация метода заключается в следующем: в начальный момент линия задержки замкнута и сигнал, излучаемый задающим генератором, поступает на сейсмоисточник, проходит изучаемую среду, принимается сейсмоприемником и запоминается в накопителе. Накопитель запоминает сигнал на интервале време-

ни от $t=0$ до $t=T$, где за время $t=0$ принимается время запуска источника импульсных колебаний при работе с импульсными процессами или фиксированная фаза колебания при работе с тональными сигналами. При записи следующих реализаций запуск накопителя задерживается на время $T_1 = \Delta_n$, где n - номер цикла записи. Поскольку целью синтеза является режекция основной составляющей процесса, то проще всего этого добиться поворотом ее фазы при повторной записи на 180° . При суммировании нескольких процессов для определения их амплитуд и фаз можно воспользоваться правилом замкнутых многоугольников. Соотношение амплитуд процессов будет определяться соотношением сторон треугольника, а фазовых сдвигов - дополнительными углами при соответствующих вершинах. В дальнейшем для упрощения примем амплитуды суммируемых процессов равными. Частотные характеристики при суммировании различного количества процессов существенно различаются. На рис.2 приведены АЧХ для нескольких вариантов суммирования.

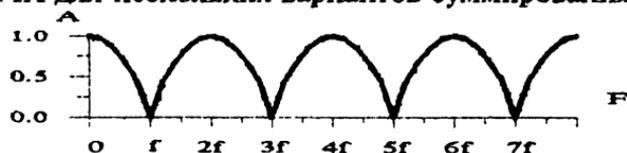


Рис 2а
Сложение двух составляющих. Сдвиг фаз на основной частоте - 180°

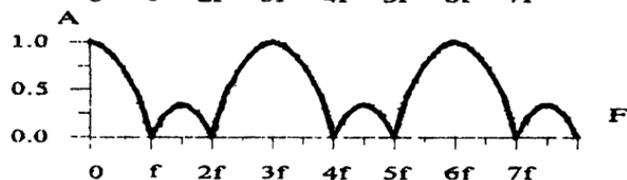


Рис2б
Сложение трех составляющих. Шаг сдвига фаз на основной частоте при суммировании - 120°

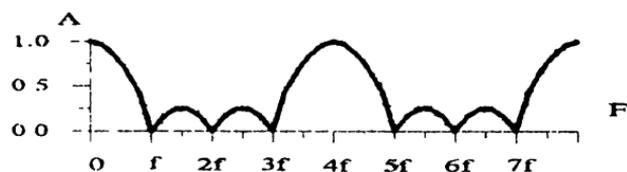


Рис2в
Сложение четырех составляющих. Шаг сдвига фаз на основной частоте при суммировании - 90°

На рисунке 3 б,в,г приведен результат обработки по описанной методике тестового сигнала, спектр которого представлен на рисунке 3а. Остаточные сигналы на частотах nf вызваны неточностью установки значения задержки.

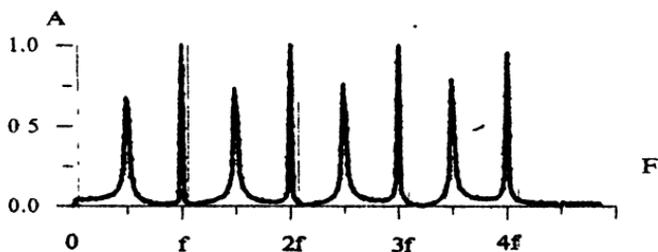


Рис.3а
Спектр
тестового
сигнала

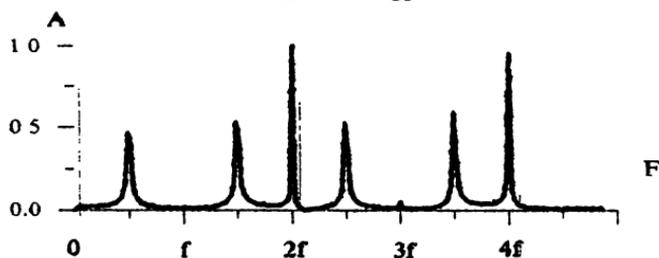


Рис.3б
Спектр суммы
двух тестовых
сигналов сло-
женных со
сдвигом фаз
 180° на частоте
 f



Рис.3в
Спектр суммы
трех тестовых
сигналов сло-
женных с ша-
гом сдвига фаз
 120° на частоте
 f

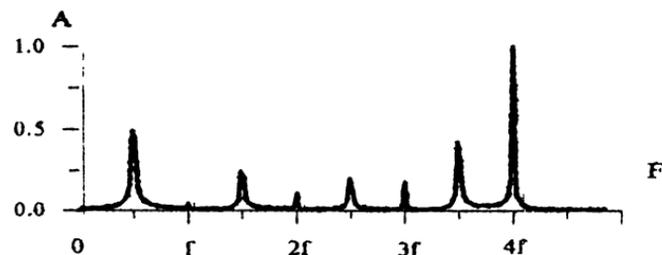


Рис.3г
Спектр суммы
четырех тесто-
вых сигналов
сложенных с
шагом сдвига
фаз 90°
на частоте f

Вариант с полным поворотом фазы сигнала при суммировании реализуется по блок-схеме приведенной на рис.4.



Рис.4

В начальный момент оба фазовращателя замкнуты и сигнал излучаемый задающим генератором поступает на сейсмоисточник, проходит изучаемую среду, принимается сейсμοприемником и запоминается в накопителе. Работа накопителя синхронизируется также, как в случае приведенном на рис.1. В ходе первого этапа накопителем фиксируется одна или несколько посылок сигнала. На втором этапе фаза сигнала одним из фазовращателей на π и принятый сейсμοприемником сигнал суммируется с накопленным в первом этапе измерений. Как видно, существуют два варианта реализации метода:

- 1 - на втором этапе разомкнут фазовращатель №2,
- 2 - на втором этапе разомкнут фазовращатель №1,

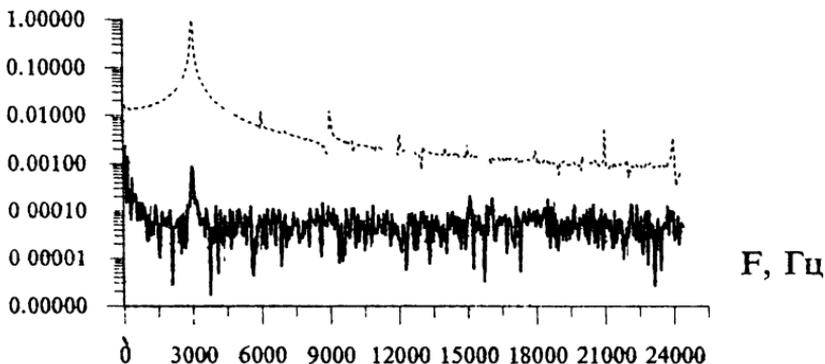
При распространении сигнала в линейной среде, параметры которой не меняются и стабильном задающем источнике, сигнал на выходе накопителя равен нулю во всех вариантах. Если же среда распространения нелинейная или нестабильна, выходные сигналы накопителя в при реализации вариантов 1 и 2 могут быть различны. На рисунке 5 приведены спектры сигнала звукового генератора прошедшего нелинейный элемент (делитель сопротивлений с диодом в одном из плеч) для первого варианта (рис.5а) и второго (рис.5б). Спектры нормированы на величину сигнала полученного в ходе первого этапа измерений. Его спектр обозначен на рисунках штриховой линией. Спектры сигналов на

рис.5а и рис.5б заметно различаются. Если спектр на рис.5а - это повторение с точностью до шумов спектра сигнала полученного в первом этапе измерений, то в спектре приведенном на рис.5б видно подчеркивание четных гармоник.

Рассмотрим подробнее оба варианта.

А, норм.

а)



А, норм.

б)

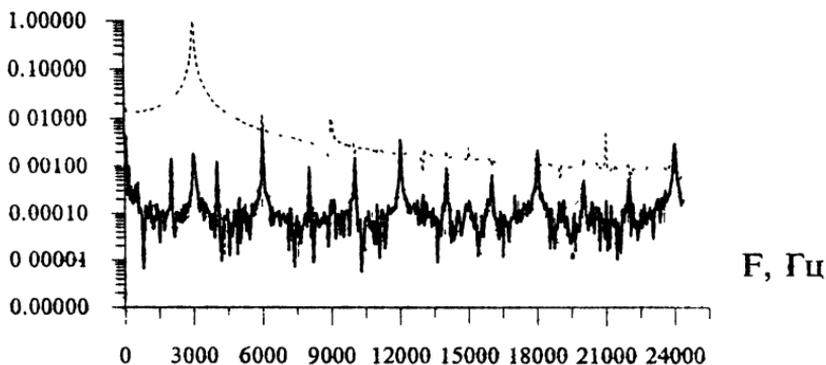


Рис.5

Вариант с разомкнутым фазовращателем 2 - это простое вычитание. Метод череспериодного вычитания широко применяется в радиолокации для подавления пассивных помех. При проведении геофизических исследований метод вычитания может быть использован для контроля за изменением состояния среды и изменением ее характеристик под воздействием излучения.

Опыт применения вычитания показывает, что точность метода зависит от стабильности источника зондирующего сигнала, динамического диапазона и стабильности накопителя. Характеристики накопителя в нашем случае (11^{ти} разрядный АЦП на входе и 24 разряда памяти) позволяют провести измерения с достаточно высокой точностью.

А, норм.

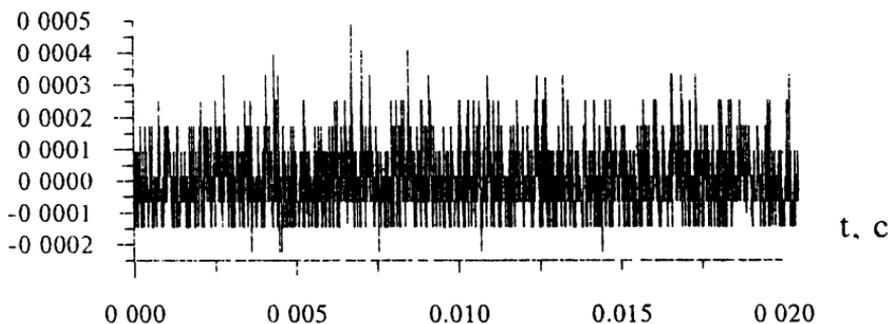


Рис.6

На рис.6 приведена запись шумов квантования накопителя нормированная на амплитуду сигнала звукового генератора с уровнем -3дБ по отношению к максимальному неограниченному сигналу. В обоих случаях рассматривается результат накопления 100 реализаций. Из рисунка видно, что динамический диапазон накопителя позволяет фиксировать изменения процесса находящиеся на уровне 0.01% его амплитуды.

Таким образом, основным источником ошибки при измерениях является нестабильность источника зондирующего сигнала.

Проведем оценку ошибки вычитания для случая, когда источником зондирующего сигнала является обычный (не кварцевый) генератор звуковых частот типа ГЗ-120.

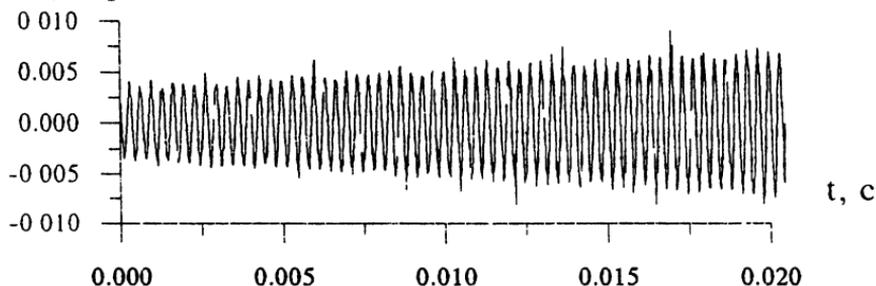
Нестабильность генератора значительно уменьшает возможности метода вычитания. На рис. 7 (а,б) приведены записи уровня остатка после вычитания сигнала звукового генератора. Записи нормированы на амплитуду сигнала звукового генератора. Рис.7а соответствует разнице во времени между вычитаемыми сигналами - 1 минута, рис.7б - 8 минут. Из рисунка видно, что основным источником ошибки при вычитании являются флуктуации частоты генератора. По периоду биений на рис.7б можно

установить, что частота генератора за время прошедшее между записями сигнала ЗГ изменилась на 3-4 Гц.

На рисунке 8 показаны зависимости относительной величины остатка при вычитании (кривая 1) и относительного колебания амплитуды генератора от времени (кривая 2). Графики показывают, что относительная ошибка измерения разности при вычитании равна 0.5% при временах 1 - 2 минуты и возрастает до 2% при разности времени между замерами в 10 минут.

А, норм.

а



А, норм.

б

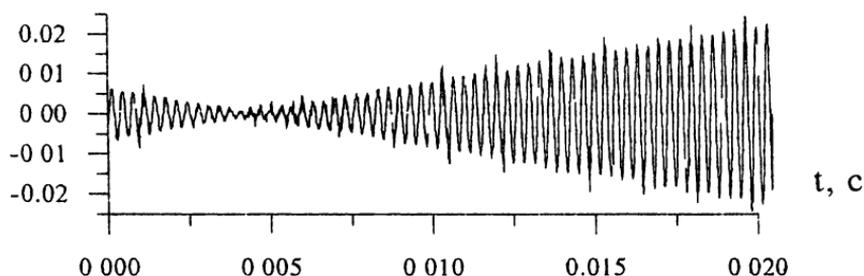


Рис.7 Запись остатка при вычитании сигнала звукового генератора а) - соответствует разнице во времени между вычитаемыми сигналами - 1 минута, б)- 8 минут.

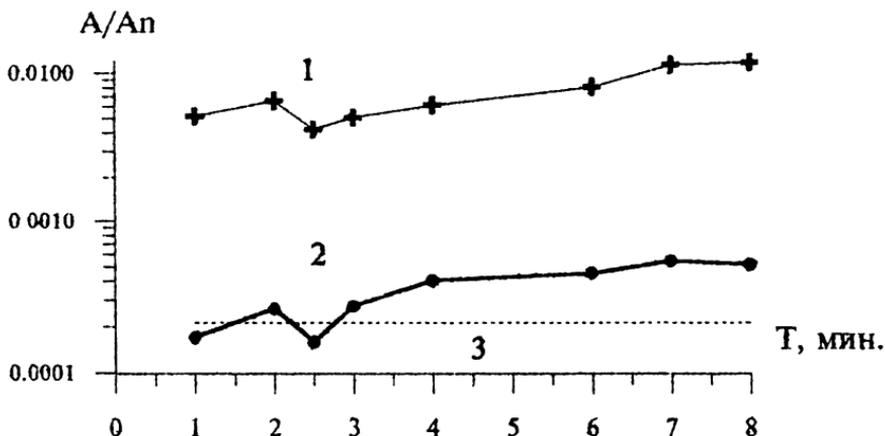


Рис.8 Временная зависимость относительной величины остатка при вычитании (кривая 1) и относительного колебания амплитуды генератора (кривая 2). Кривая 3 - относительный уровень шумов квантования.

При измерениях в геобассейне использовался кварцевый прецизионный генератор ГЗ-122. При использовании его в качестве источника зондирующего сигнала относительная ошибка измерения равна 0.05% при временном интервале между вычитаемыми процессами в 4 минуты и 0.1% при 10 минутах.

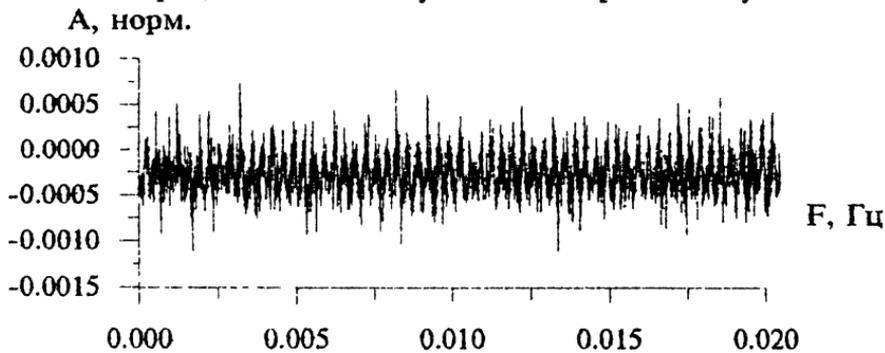


Рис. 9а

Остаток при вычитании сигналов кварцевого генератора. Время между записями процесса около 3 мин.

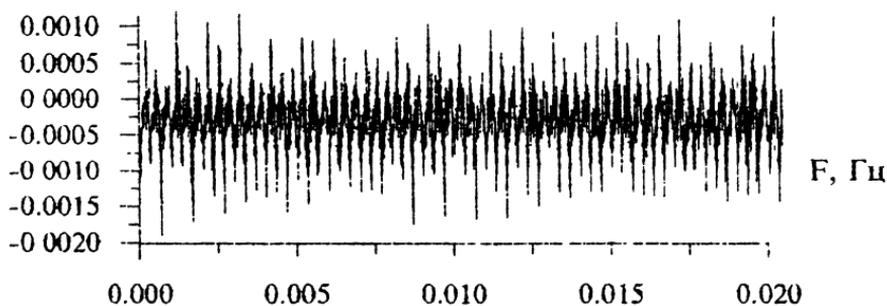


Рис. 96

Остаток при вычитании сигналов кварцевого генератора. Время между записями процесса около 10 мин

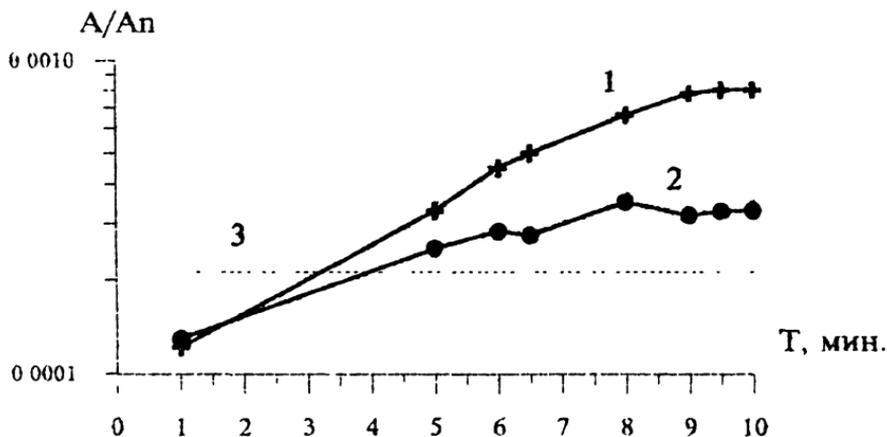


Рис.10 Временная зависимость относительной величины остатка при вычитании (кривая 1) и относительного колебания амплитуды кварцевого генератора (кривая 2). Кривая 3 - относительный уровень шумов квантования.

Метод вычитания применялся нами при изучении процессов "приработки" сейсмоисточника с грунтом. Известно, что излучаемые сейсмоисточником колебания меняют характеристики грунта, а изменение состояния грунта, в свою очередь, приводит к изменению режима излучения источника колебаний. Один из примеров такого взаимодействия приведен в работе [8]. Величина

времени приработки - одна из характеристик состояния грунта и, по-видимому, может быть использована в прогностических целях, кроме того, знание времени установления процесса необходимо при проведении частотного синтеза сейсмического сигнала, одним из необходимых условий которого является постоянство характеристик среды за время его проведения.

В качестве иллюстрации возможностей метода последовательного вычитания приводятся результаты эксперимента проведенного в геобассейне НИРФИ. Источником сигнала в эксперименте являлся пьезокерамический стержневой вибратор, который запитывался импульсным источником. Электрическая мощность в импульсе около 1 кВт. Регистрация сейсмического колебания производилась акселерометрами находящимися непосредственно под плитой вибратора и размещенными на различных глубинах по оси вибратора. В процессе работы в накопителе для контроля за состоянием грунта периодически проводилось вычитание принятого сигнала. Разница во времени между вычитаемыми посылками - 1 мин. \pm 20 сек. На рисунке рис.11а, приведен вид импульсного колебания принятого под вибратором, а на рис.11б, в результат вычитания проведенного в различные моменты после включения вибратора.

А, норм.

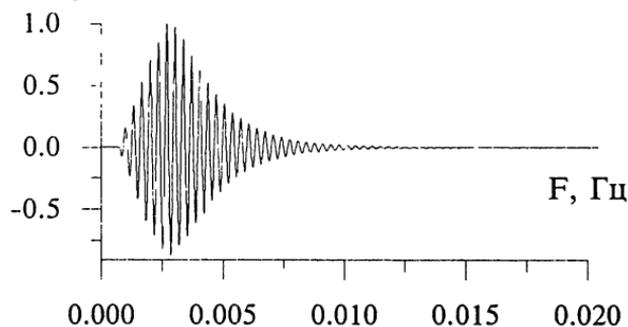


Рис. 11а

Импульсное колебание принятое акселерометром расположенным под плитой вибратора

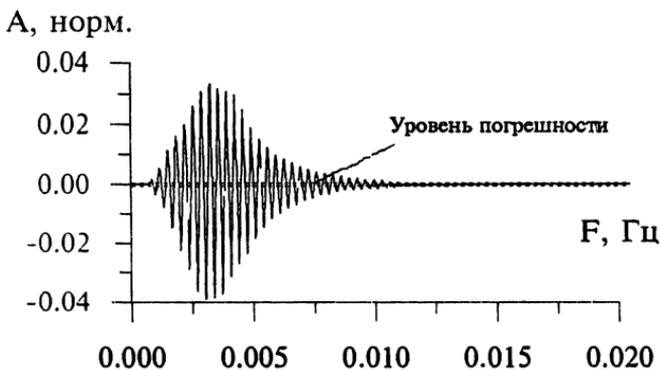


Рис.116
Остаток после вычитания. Измерение через мин. после начала работы вибратора.

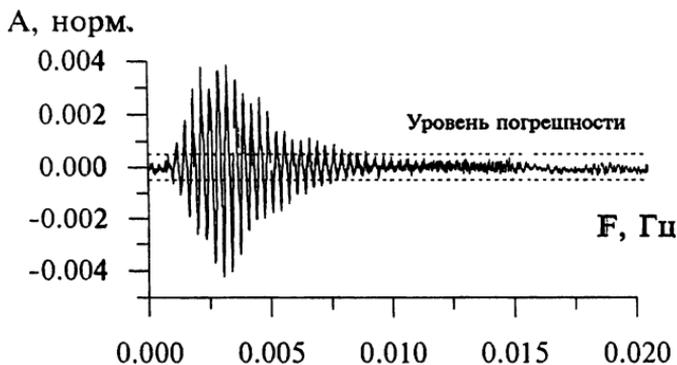


Рис.11в
Остаток после вычитания. Измерение через мин. после начала работы вибратора.

На рис. 12 представлен график зависимости времени установления колебаний вибратора от времени и амплитуды колебаний. Из графика видно, что состояние грунта (предположительно



Рис.12
Зависимость остатка после вычитания от времени и величины воздействия Штрихованная линия уровень ошибки измерения.

его плотность) отслеживает с временной постоянной около 5 минут все изменения амплитуды излучаемого процесса. Этот эффект может являться одной из причин появления постоянной составляющей, возникающей при работе источника сейсмических колебаний [9].

Рассмотрим вариант суммирования колебаний с поворотом фазы на 180° на входе сейсмоисточника (вариант 2 по блок-схеме рис.4). На наш взгляд - это наиболее практически интересный вариант фазового синтеза для измерения нелинейных искажений сейсмического сигнала при распространении его в грунте.

Эти измерения важны, поскольку нелинейные составляющие несут информацию о состоянии грунта, его плотности, наличии в нем пор, трещин и других неоднородных включений [10]. При высокочастотных акустических или механических воздействиях на грунт в ряде случаев разностные компоненты возникающие при нелинейных преобразованиях четных степеней на некотором удалении благодаря частотно-зависимому затуханию являются единственным источником информации о проведенном воздействии.

Суммирование с поворотом фазы на 180° на входе сейсмоисточника позволяет выделить нелинейные члены четных степеней. Покажем это на следующем примере.

Как указывалось выше на первом этапе измерений воздействие на грунт источника в некоторой точке пространства фиксируется и запоминается на интервале времени от $t=0$ до $t=T$, где за $t=0$ принимается время запуска источника импульсных колебаний при работе с импульсными процессами или фиксированная фаза колебания при работе с тональными сигналами. На втором этапе фаза сигнала подаваемого на источник меняется на π и принятый в этом же временном интервале в той же точке сигнал суммируется с предыдущим. Эту операцию можно описать следующим образом: пусть источник в процессе работы воздействует на среду знакопеременным давлением $P(t)$. В результате этого в точке приема на расстоянии L от источника будет принято смещение $\Delta L(t) = KP(t)$. Если среда линейна, $\Delta L_P = -\Delta L_P$ и суммарное смещение равно 0. При наличии нелинейности (K зависит от величины давления P) раскладываем K по степеням P

$$K = K_0 (1 + \alpha_1 P(t) + \alpha_2 P^2(t) + \alpha_3 P^3(t) + \dots)$$

$$\Delta L_P = K_0 (P(t) + \alpha_1 P^2(t) + \alpha_2 P^3(t) + \alpha_3 P^4(t) + \dots)$$

$$\Delta L_{-P} = K_0 (-P(t) + \alpha_1 P^2(t) - \alpha_2 P^3(t) + \alpha_3 P^4(t) - \dots)$$

В случае реализации предложенного алгоритма

$$\Delta L_2 = \Delta L_P + \Delta L_{-P} = K_0 (\alpha_1 P^2(t) + \alpha_3 P^4(t) + \dots) - \text{сумма}$$

вклада нелинейных эффектов четных степеней.

Недостатком в практической реализации предложенного алгоритма является то, что изменение фазы сигнала производится на входе источника колебаний. При этом возможные нелинейные преобразования в источнике также фиксируются наравне с нелинейностью грунта. Этот недостаток в методике связан с тем, что для большинства применяемых источников сигнала практически невозможно получить идентичные по частоте и амплитуде противофазные колебания без изменения фазы входного сигнала.

На первый взгляд этот случай не отличается от варианта приведенного на рис.2а, однако в нем происходит поворот фазы на π всех спектральных составляющих исследуемого процесса, что позволяет применять способ для выделения нелинейных составляющих широкополосных сигналов.

Приведем некоторые экспериментальные результаты по реализации предложенного алгоритма. На рис.13а показаны спектры мощности импульсного колебания имеющего длительность около 0.02 секунды принятого акселерометром расположенным под источником сигнала. Штриховая линия на рисунке - спектр импульса, сплошная - спектр сигнала полученного в результате сложения с поворотом фазы на входе.

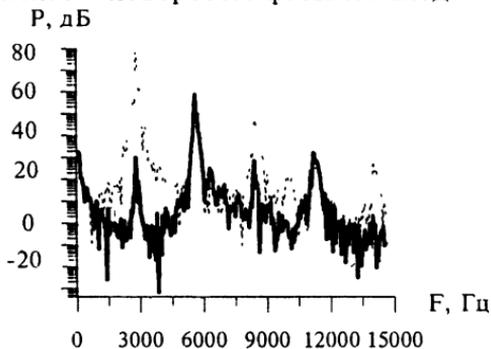
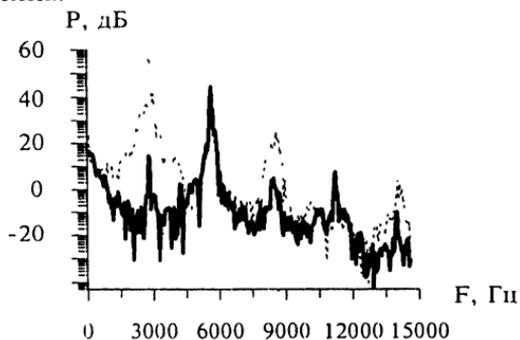
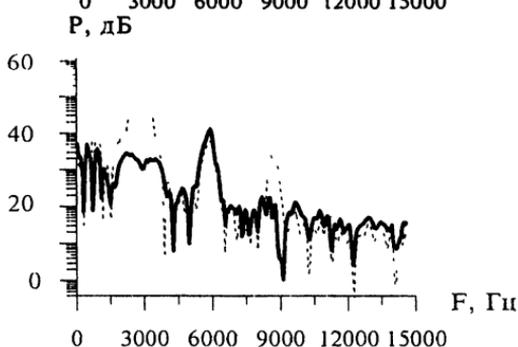
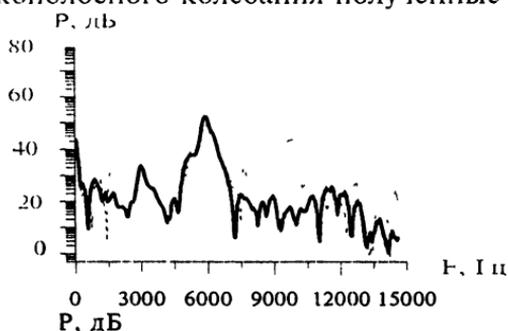


Рис.13а

Рис 13б - спектр этого же колебания принятого на глубине 30 см на оси источника.



В обоих случаях видно, что в результате вычитания практически исчезают спектральные составляющие на основной частоте и нечетных гармониках. На рис.13в,г приведены спектры более широкополосного колебания полученные в тех же условиях.



Эффективным оказалось применение предложенного алгоритма при изучении низкочастотных составляющих, возни-

кающих в спектре импульсного колебания при его распространении в рыхлом сухом грунте. Как показал эксперимент, относительный уровень этих составляющих в сухом грунте составляет единицы процента от уровня основного сигнала и при близких частотах (3 кГц и 1 кГц в нашем случае) простой фильтрацией они не разделяются. Выделение низкочастотных составляющих производилось по описанной выше методике с той разницей, что в схеме приема колебаний был установлен фильтр отсекающий высшие гармоники. На рис.14а приведен вид сейсмоимпульса принятого акселерометром на глубине 30 см, а на рис.14б - его низкочастотная составляющая. Амплитуды сигналов на рисунках приведены в условных единицах.

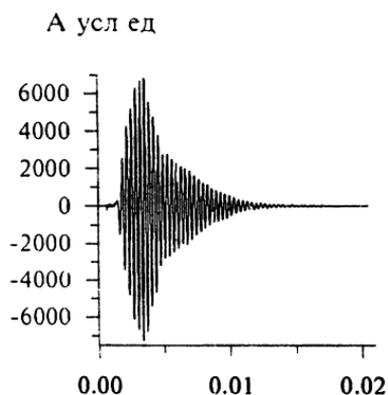


Рис.14а

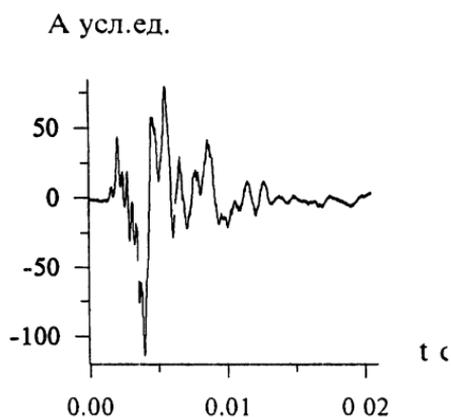


Рис.14б

Применение в исследованиях наряду со спектральным анализом сигналов метода вычитания позволило обнаружить ряд эффектов, которые при использовании только спектрального анализа замечены не были бы. В частности, на рис.15а изображены колебания принятые акселерометром вынесенным от оси источника (штриховая кривая) и их низкочастотная составляющая (сплошная кривая). В полном сигнале наряду с приходом Р-волн виден приход более медленной S-волны, в то время как низкочастотная составляющая образуется только в момент прихода Р-волны. Для сравнения на рис.15б приведены аналогичные кривые полученные на такой же глубине на оси источника, где присутствуют только Р-волны.

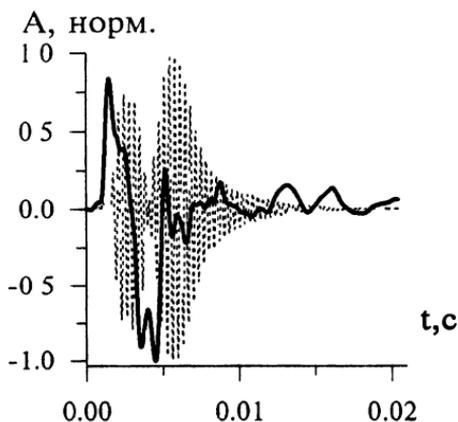


Рис. 15а

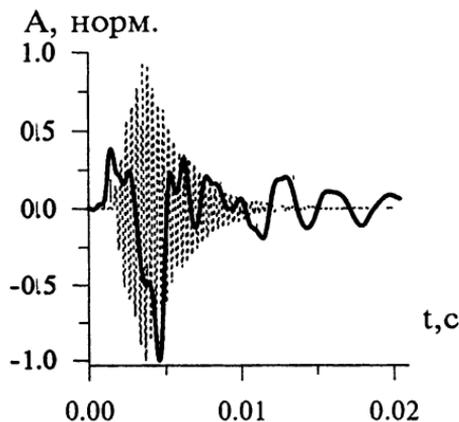


Рис. 15б

Кроме того, конкретная форма нелинейной составляющей позволила провести разделение нелинейных составляющих возникающих из-за контактной и объемной нелинейности и по моментам прихода оценить дисперсию в среде.

Следует заметить, что также как в методе вычитания, некомпенсированный остаток нечетных составляющих при суммировании несет информацию о реологии грунта, в котором под воздействием колебаний источника происходят остаточные деформации, что меняет условия излучения каждого последующего колебания.

Если рассмотреть с этой точки зрения спектры процессов изображенные на рис.13а,б, то видно, что относительная величина некомпенсированного остатка в спектре колебания снятого **ной** источником (а) на порядок меньше, чем на глубине (б), где вклад среды больше. Для колебания с меньшей энергией (рис.13в,г) эта разница менее заметна.

В настоящей работе подведены итоги лабораторной проверки метода фазового синтеза. Эксперименты показали, что наиболее интересно применение метода вычитания для изучения реологии грунта и суммирования с поворотом фазы для измерения комбинационных членов нелинейного преобразования. В развитие работы планируется в дальнейшем применить предложенные методы при исследовании возбуждения сейсмического поля акустическими источниками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Е.Я. Бубнов В.В. Гушин, Ю.М. Заславский, Б.В. Новиков, С.Н. Рубцов "Использование метода частотного синтеза сигнала при геолокации тональными источниками"// Препринт №394, НИРФИ, Н.Новгород, 1994, 15 с.
2. Е.Я. Бубнов В.В. Гушин, Ю.М. Заславский, Б.В. Новиков, С.Н. Рубцов "Частотный синтез сигнала при сейсмическом зондировании грунта."// Физика Земли, 1997, №5, с.73-77.
3. Е.Я. Бубнов, В.В. Гушин, С.Н. Рубцов "Частотный синтез сигналов сейсмических излучателей."// Сб. "Развитие методов и средств экспериментальной геофизики", т.2, Изд. ОИФЗ РАН, М., 1997, с.302-313.
4. Гушин В.В., Шалашов Г.М. О возможности использования нелинейных сейсмических эффектов в задачах вибрационного просвечивания Земли.// Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками М, Наука. 1981. с. 144-155.
5. Беляева И.Ю., Зайцев В.Ю., Островский Л.А. Нелинейные акусто-упругие свойства зернистых сред.// Акустический журнал, 1993, т 39, вып 1, с 25-32
6. Грошков А.Л., Калимулин Р.Р., Шалашов Г.М., Шемагин В.А. Нелинейное межскважинное прозвучивание методом модуляции акустических волн сейсмическими полями.// Докл. АН СССР, 1990, т.313, №1, с.63-65.
7. Гик Л.Д. Физическое моделирование при оценке прогнозов нефтегазоносности по данным акустического каротажа. // Геофизика, 1997, №1, с.24-32
8. Ю.М. Заславский, С.Н. Рубцов "О перераспределении энергии излучения по типам упругих волн при изменении интенсивности возбуждения источника" // Акустический журнал, 1996, т.42, №6, с.869-870.
9. Николаев А.В., Павленко О.В., Яковлев А.П. "Квазистатические деформации земной поверхности, вызванные вибровоздействием, и нелинейные свойства земных пород" // Физика Земли, 1994, №12, с.3 - 11.
10. Наугольных К.А., Островский Л.А. Нелинейные волновые процессы в акустике. М., Наука, 1990, 237 с.