

В. В. Гушин, С. Н. Рубцов

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Научно-исследовательский радиофизический институт»,
Н. Новгород, ул. Б. Печерская, д. 25/12а, e-mail: guvladimir@nirfi.sci-nnov.ru*

Особенности модуляции звука звуком в гранулированной среде

Получена 12.03.2014, опубликована 15.04.2014

Представлены результаты лабораторного эксперимента по наблюдению модуляции непрерывной низкочастотной волны, распространяющейся в сухом речном песке под действием модулированного по амплитуде интенсивного высокочастотного сигнала. Приведены осциллограммы и спектрограммы акустических сигналов. Эффект связывается с параметрической модуляцией слабого низкочастотного сигнала, вызванной изменением характеристик среды под воздействием изменений амплитуды интенсивного высокочастотного сигнала.

Ключевые слова: модуляция звука звуком, плотность среды, амплитудная модуляция, фазовая модуляция.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования взаимодействия пересекающихся звуковых пучков в акустике начаты достаточно давно. Среди первых работ в этом направлении [1-3], появившихся практически одновременно, следует выделить работу А. Г. Горелика и В. А. Зверева [3]. Ее развитием явился цикл работ В. А. Зверева и А. И. Калачева [4-8], который наряду с работами [9-11] стал основой для создания параметрических приемников и излучателей звука, обширную литературу по которым мы здесь не приводим. Другим применением эффекта модуляции звука звуком в различных средах стало его использование для измерения нелинейных свойств среды [12-21]. Несмотря на разность объектов исследования, все вышеприведенные работы объединяет общий эффект – фазовая модуляция слабой высокочастотной акустической волны из-за периодического изменения ее скорости в поле интенсивной низкочастотной волны. Эффект обладает направленностью, и максимальная фазовая модуляция наблюдается при пересечении пучков под прямым углом [6]. В гранулированных средах, кроме вышеупомянутого эффекта, на взаимодействие акустических пучков влияют дополнительные условия.

Особенностью гранулированной среды, моделью которой может служить речной песок, является то, что в ней помимо нелинейно-упругого поведения контактов гранул важную роль играет переупаковка материала в процессе его деформирования. Наличие

межконтактного флюида (вода, воздух и т. п.) еще более усложняет процесс рассмотрения таких сред. В частности отмечено, что гранулированные среды изменяют свой объем под действием вибраций [22]. Увеличение объема происходит как из-за дилатансии, так и за счет переупаковки гранул и образования пустот между ними. Это приводит к изменению акустических характеристик среды, которое сохраняется некоторое время после окончания акустического воздействия на среду, что приводит как к фазовой, так и амплитудной модуляции слабой волны [23].

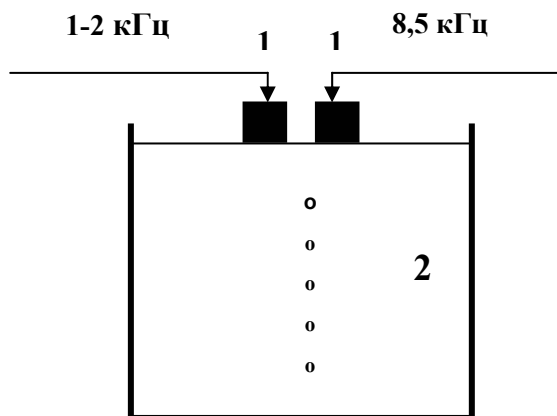


Рис. 1. Схема эксперимента.
1 – излучатели, 2- акселерометры

Для контроля влияния вибраций на акустические характеристики среды (скорость и затухание звука) была собрана установка, блок-схема которой приведена на рис. 1. Основой установки являлся цилиндрический бак высотой 0,7 м, диаметром 0,7 м, заполненный мелким сухим речным песком (размеры песчинок 0.075 – 0.425 мм). На поверхности бака на расстоянии 2-3 см от его оси устанавливались два стержневых пьезокерамических излучателя. Один из них был источником пробного непрерывного низкочастотного колебания (1-2 кГц) малой амплитуды, второй излучал интенсивные импульсные колебания с частотой заполнения 8.5-9 кГц или модулированное по амплитуде колебание с той же несущей частотой. Выбор рабочих частот определялся частотной характеристикой излучателей. Колебания принимались шестью акселерометрами, размещенными в песке на оси бака, на глубинах, начиная с 20 см с шагом 10 см. Регистрация и обработка принятых колебаний осуществлялась персональным компьютером. Таким образом, в наших экспериментах, в отличие от описанных в литературе, рассматривается модуляция низкочастотной волны высокочастотной волной переменной амплитуды при почти параллельных акустических пучках.

1. ФАЗОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ ЗВУКА ЗВУКОМ

Контроль за изменением скорости звука осуществлялся по изменению разности фаз колебания на частоте пробной волны принятого на разных уровнях заглубления. Эксперимент проводился следующим образом: одним из источников излучались импульсы с частотой заполнения 8.6 кГц, длительностью 3 с и скважностью ~17. Амплитуда ускорения, замеренного под мембраной источника, составляла примерно 1g. Одновременно второй источник излучал непрерывную пробную волну частотой 1.5 кГц и амплитудой под мембраной около 0.03g. В ходе эксперимента измерялась разность фаз колебаний пробной волны, принятых акселерометрами на разной глубине. Один из результатов фазовых измерений на участке грунта 0-30 см приведен на рис. 2,

и рис. 2а, где по горизонтальной оси отложено время в секундах, а по вертикальной – разность фаз в градусах.

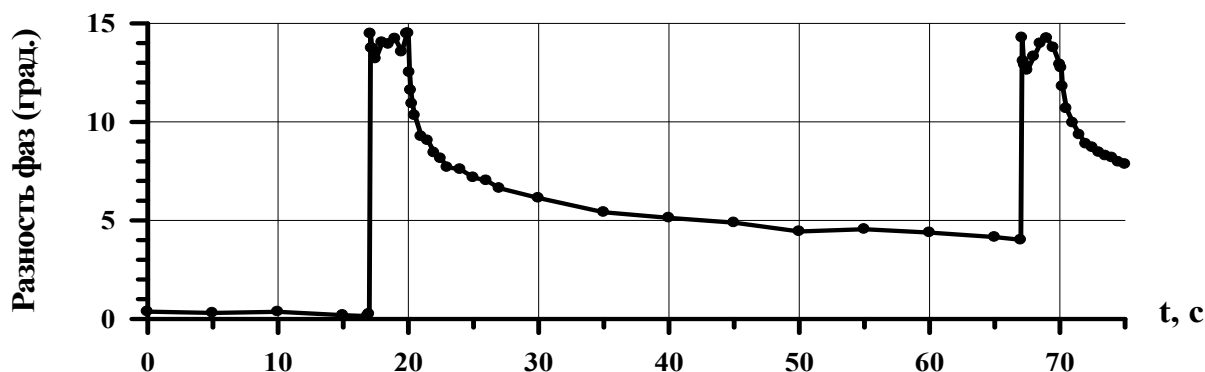


Рис. 2. Изменение разности фаз сигнала с частотой 1.5 кГц на участке 0-30 см при подаче импульсов с частотой заполнения 8.6 кГц. За нулевое значение выбрана разность фаз колебаний в начале измерения

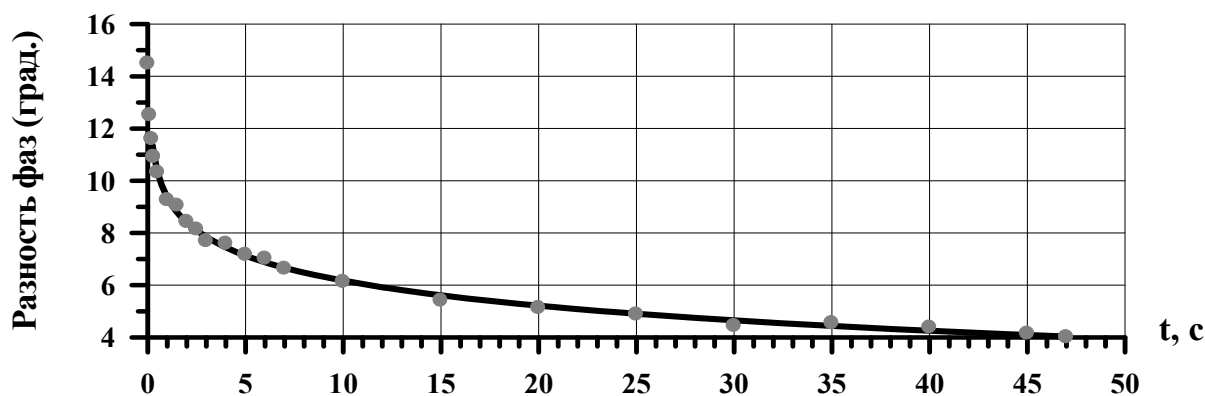


Рис. 2а. Релаксация среды после прекращения высокочастотного акустического воздействия (аппроксимация логарифмом)

Из рисунка видно, что излучение слабого пробного сигнала практически не меняет свойств грунта, т.к. изменение разности фаз при отсутствии ВЧ сигнала находится в пределах ошибки измерения. Начиная с семнадцатой секунды процесса, в момент прихода высокочастотного импульса, происходит резкое увеличение разности фаз принятых колебаний приблизительно на 15° . Рост разности фаз колебаний обычно продолжается в течение длительности импульса. После окончания импульса разность фаз уменьшается по логарифмическому закону (см. рис. 2а) и до прихода следующего импульса своего первоначального значения не достигает. После прекращения подачи высокочастотных импульсов разность фаз колебаний пробной волны в течение нескольких часов приближается к первоначальному значению.

Наблюдаемое изменение разности фаз связано с уменьшением фазовой скорости, вызванной увеличением зазоров между песчинками и заполнением их воздухом. Фактически при незначительном изменении объема происходит заметное уменьшение плотности грунта. При прекращении высокочастотного колебания начинается

медленное восстановление состояния грунта – его уплотнение, которое с приходом нового высокочастотного импульса опять сменяется уменьшением плотности.

Для оценки влияния амплитуды излучаемого колебания на изменение плотности среды было проведено измерение изменения разности фаз пробной волны при изменении амплитуды высокочастотного колебания. Прием колебаний проводился на участке 0-30 см. На рис. 3А приведен график изменения амплитуды высокочастотного колебания со временем, а на рис. 3Б – вызванное им изменение разности фаз колебания на частоте 2 кГц.

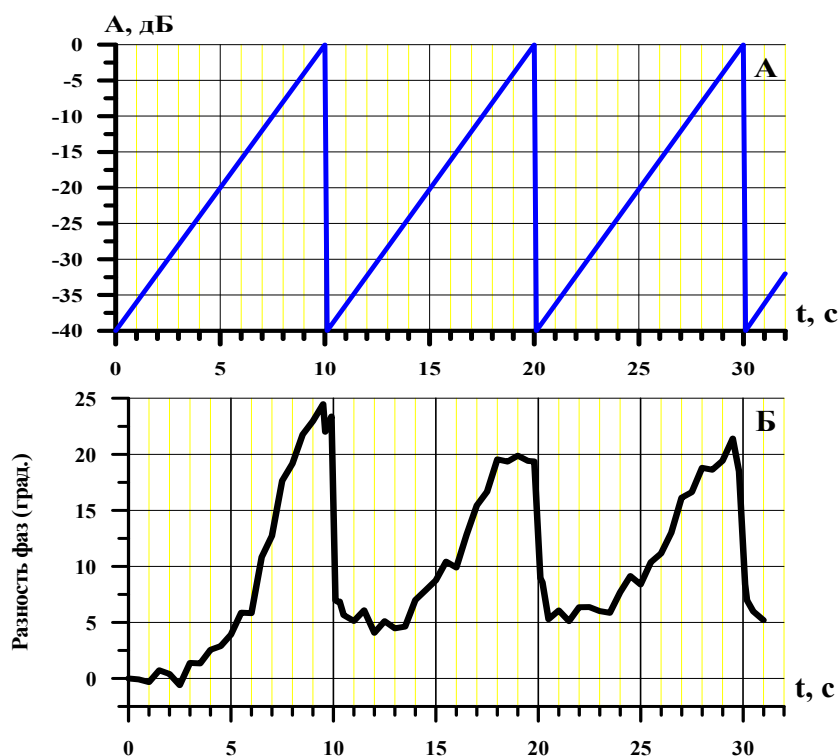


Рис. 3. Изменение со временем амплитуды колебания с частотой 8.5 кГц (А) и вызванное им изменение разности фаз пробной волны на участке 0-30 см (В). За нулевой уровень разности фаз выбрана разность фаз в начале измерения

Максимальное значение амплитуды на графике соответствует ускорению $1g$ под мембраной излучателя. На графике рис. 3Б видно, что колебание с амплитудой -30 дБ от максимального уровня не меняет акустических характеристик среды. Только при превышении этого уровня начинается рост разности фаз колебаний – уменьшение плотности среды. Рост разности фаз при увеличении амплитуды излучаемого колебания происходит до значения $\sim 25^\circ$, причем зависимость разности фаз от амплитуды излучаемого колебания близка к логарифмической. Новый цикл, начинающийся с резкого падения амплитуды колебания, сопровождается уменьшением разности фаз (почти на 20°). Это уменьшение продолжается пока амплитуда высокочастотного колебания не достигнет уровня -30 дБ от максимального, после чего опять начинается увеличение разности фаз колебаний пробной волны.

В том случае, когда высокочастотный источник излучает колебание, изменяющееся по амплитуде, происходит фазовая модуляция пробной волны огибающей высокочастотного колебания. Результат этого эксперимента приведен на рис. 4. Он подобен результату эксперимента с импульсными сигналами, разница только в отсутствии времени восстановления в паузах между импульсами, в результате чего процесс быстрее стабилизируется.

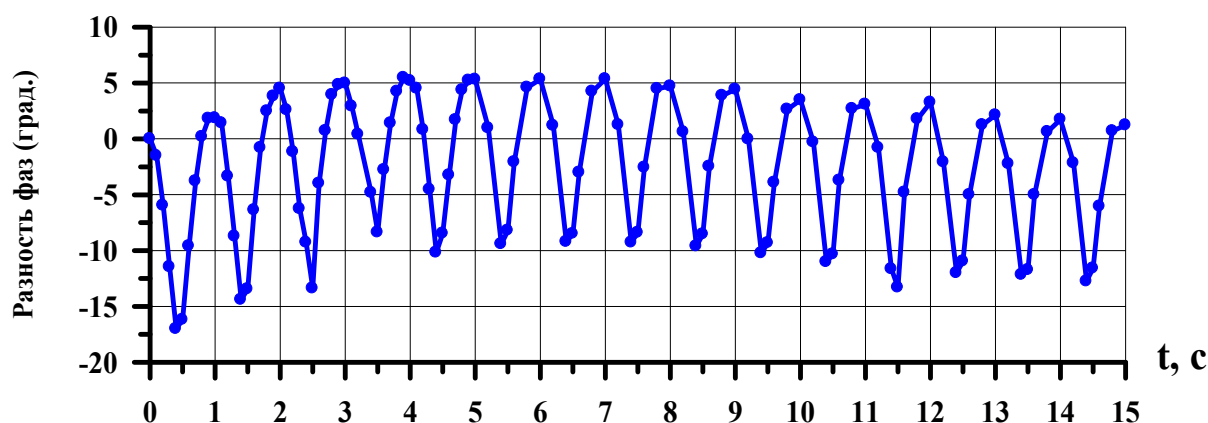


Рис. 4. Изменение разности фаз пробного сигнала с частотой 1.7 кГц на участке 0-30 см под воздействием модулированного по амплитуде сигнала с несущей частотой 8.5 кГц. За нулевой уровень разности фаз выбрана разность фаз в начале измерения

2. АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ЗВУКА ЗВУКОМ

Уменьшение плотности среды под воздействием вибраций, на что указывает уменьшение фазовой скорости звука, сопровождается также увеличением затухания звука. Возникает так называемая диссипативная нелинейность, рассматриваемая в работе [21], в которой представлены результаты лабораторного эксперимента по наблюдению амплитудной модуляции слабой непрерывной высокочастотной волны под действием последовательности сильных низкочастотных импульсов в сыром речном песке. Раньше мы проводили аналогичные эксперименты и получили похожие результаты, которые представлены на рис. 5 и рис. 6. Разница заключалась в том, что, как и в предыдущем случае, в экспериментах рассматривалось изменение амплитуды низкочастотной пробной волны из-за изменения амплитуды высокочастотной волны.

На рис. 5 показано изменение амплитуды пробной волны в момент прихода высокочастотного импульса. Здесь и на последующих рисунках уровень 0 дБ соответствует амплитуде сигнала 1 В ($\sim 1g$ под мембраной источника) на выходе усилителя. Также как при фазовых измерениях, после прекращения высокочастотного импульса амплитуда пробной волны меньше, чем перед началом воздействия.

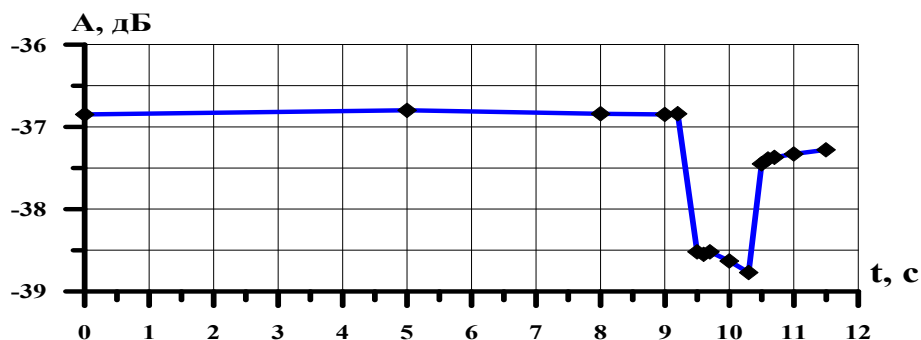


Рис. 5. Изменение амплитуды пробной волны (2.1 кГц) в момент прихода импульса с частотой заполнения 8.5 кГц. Амплитуда импульса (–4) дБ

Результат исследования поведения пробной волны под воздействием высокочастотного колебания, амплитуда которого изменяется по пилообразному закону, приведен на рис. 6 и рис. 6а. На рис. 6 показаны изменения амплитуды высокочастотной волны, а на рис. 6а – пробной волны в том же временном масштабе.

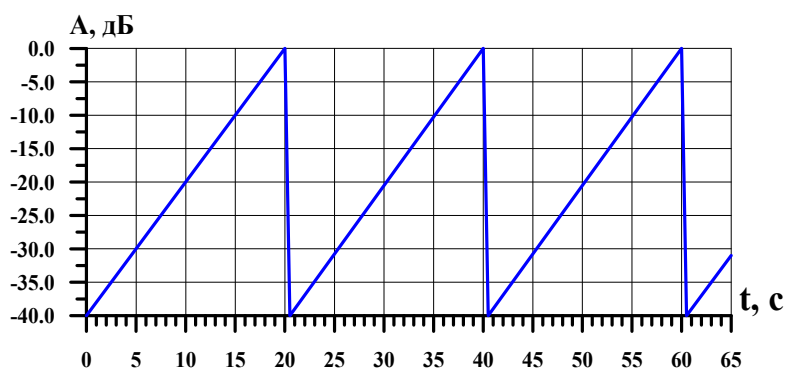


Рис. 6. Изменение амплитуды высокочастотной волны

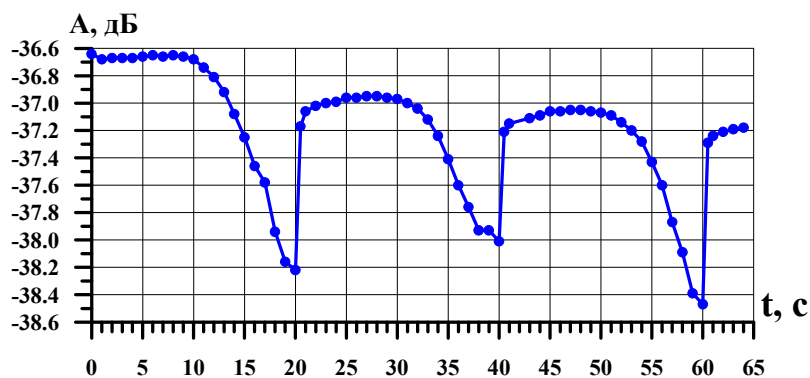


Рис. 6а. Изменение амплитуды пробной волны частотой 2 кГц под воздействием модулированной по пилообразному закону высокочастотной волны

Проведенные измерения показывают, что амплитуда пробной волны изменяется в противофазе с амплитудой волны высокочастотной. В то же время видно, что амплитудные изменения менее чувствительны к изменению акустических характеристик среды, чем фазовые, и наступают при достижении амплитуды высокочастотного колебания уровня (–20) дБ.

В завершение приведем результаты эксперимента по наблюдению амплитудной модуляции пробной волны огибающей биений двух высокочастотных волн (см. рис.7).

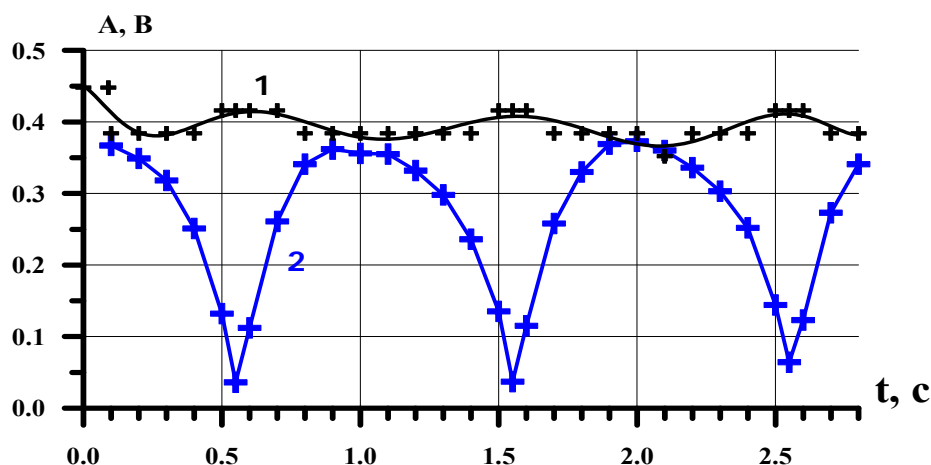


Рис. 7. Амплитудная модуляция пробной волны частотой 2 кГц (1) огибающей биений двух высокочастотных волн с частотами 8.5 и 8.501 кГц (2). Заглубление приемника 30 см. Амплитуда кривой 1 увеличена в 30 раз

3. АМПЛИТУДНО-ФАЗОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ ПРОБНОЙ ВОЛНЫ

Из сказанного выше следует, что пробная волна под воздействием изменения амплитуды высокочастотной волны модулируется как по фазе, так и по амплитуде. На рис. 8 и рис. 8а приведены спектры высокочастотного сигнала с амплитудной модуляцией (рис. 8) и низкочастотного (пробного) сигнала в отсутствии других процессов (рис. 8а).

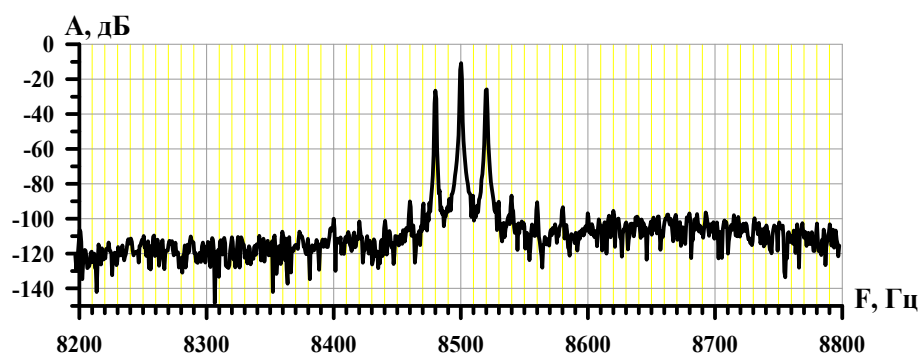


Рис. 8. Высокочастотный участок спектра процесса. Заглубление приемника 3 см

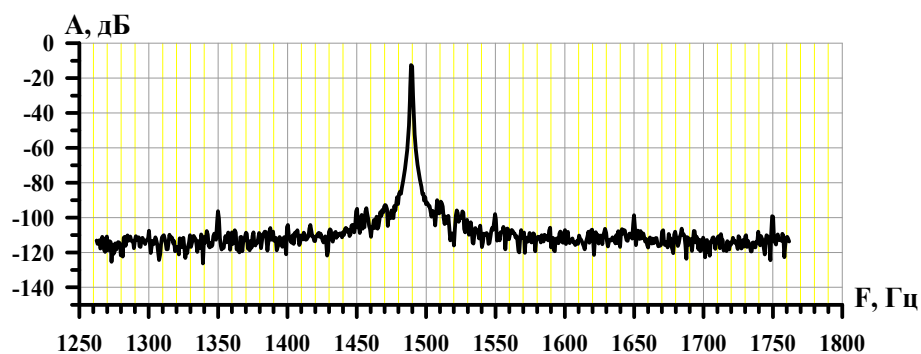


Рис. 8а. Спектр низкочастотной пробной волны при отсутствии высокочастотного модулированного колебания. Заглубление приемника 30 см

На рис. 9 показан спектр низкочастотной пробной волны при наличии высокочастотного модулированного колебания. Из приведенных рисунков видно, что модуляция интенсивного высокочастотного колебания переносится на низкочастотную пробную волну – аналог Люксембург-Горьковского эффекта.

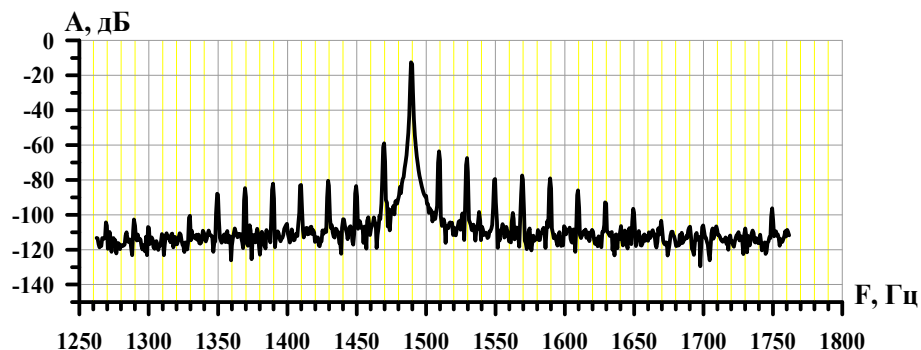


Рис. 9. Спектр низкочастотной пробной волны при наличии высокочастотного модулированного колебания. Заглубление приемника 30 см

Глубина модуляции пробной волны резко падает по сравнению с высокочастотным колебанием. Если высокочастотное колебание имеет почти 100% глубину модуляции, то глубина модуляции пробной волны не превышает -40 дБ. Асимметрия спектра модулированного низкочастотного колебания указывает на то, что модуляция – амплитудно-фазовая. Соотношение текущих значений амплитудной и фазовой модуляции пробной волны показано на рис. 10. Измерения проводились на участке $0 - 30$ см. Кривые нормированы на свое среднее значение.

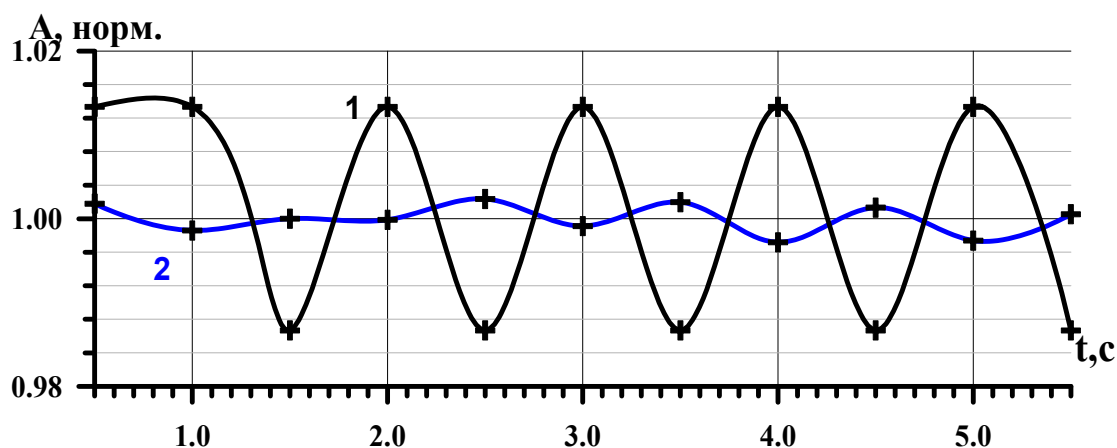


Рис. 10. Соотношение текущих значений амплитудной (1) и фазовой (2) модуляции пробной волны. Участок $0-30$ см. Кривые нормированы на свое среднее значение

Следует отметить, что приведенные на рис. 10 соотношения глубины модуляции АМ и ЧМ соответствуют только проведенному эксперименту. Многочисленные эксперименты показали, что это соотношение зависит от упаковки песчинок, которая меняется в зависимости от атмосферного давления, температуры и предыдущего вибровоздействия на песок. Особенно сильно от упаковки гранул зависит глубина амплитудной модуляции. В некоторых экспериментах амплитудная модуляция практически отсутствует. Подобные случаи отмечаются и в работе [23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных экспериментов могут быть учтены при исследовании поведения сыпучих грунтов под воздействием вибронагрузок и уточнении модели гранулированной среды. Полученные данные указывают на широкие возможности построения нелинейных приемников и излучателей в гранулированных средах.

Зондирование среды в сейсмике обычно осуществляется низкочастотными колебаниями. Если эти колебания будут проходить через зоны, где имеются мощные высокочастотные источники с переменными амплитудами, то можно будет получать информацию о глубинных процессах по фазовой и амплитудной модуляции низкочастотного колебания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов Г.Д. О взаимодействии ультразвуковых волн в жидкости // ДАН СССР. 1953. Т.89. С. 663.
2. Ingard U., Pridmore-Brown D.C. Scattering of sound by sound // J. Acoust. Sos. Amer. 1956. V.28. №3. P.367-369.
3. Горелик А.Г., Зверев В.А. К вопросу о взаимодействии звуковых волн // Акуст. журн. 1955. Т.1. №4. С. 339-342.
4. Зверев В.А., Калачев А.И. Измерение взаимодействия звуковых волн в жидкостях // Акуст. журн. Т.4, 1958, №4, С.321 – 324.
5. Зверев В.А., Калачев А.И. Измерение рассеяния звука звуком при наложении параллельных пучков // Акуст. журн. 1968. Т.14. №2. С. 214-220.
6. Зверев В.А., Калачев А.И. Излучение звука из области пересечения двух звуковых пучков // Акуст. журн. 1969. Т.15. №3. С. 369-376.
7. Зверев В.А., Калачев А.И. Модуляция звука звуком при пересечении акустических волн // Акуст. журн. 1970. Т.16. №2. С. 245-251.
8. Есипов И.Б., Зверев В.А., Калачев А.И., Наугольных К.А. О низкочастотном параметрическом излучении звука // Акуст. журн. 1976. Т.22, №4. С. 606-608
9. Westervelt P.J. Scattering of sound by sound // J. Acoust. Sos. Amer. 1957. V.29. №2. P.199-203.
10. Westervelt P.J. Scattering of sound by sound // J. Acoust. Sos. Amer. 1957. V.29. №8. P.934-935.
11. Зверев В.А. Как зарождалась идея параметрической акустической антенны // Акуст. журн. 1999. Т.45. № 5. С. 685-692.
12. Гиц И.Д., Конюхов Б.А. Об оценке констант упругости третьего порядка изотропных твердых тел по модуляции звука звуком // Акуст. журн. 1973. Т.19. №2. С.150-155.
13. Конюхов Б.А., Шалашов Г.М О нерезонансных параметрических взаимодействиях поверхностных волн в изотропных твердых телах // Журнал прикладной механики и технической физики. 1973. №4. С. 163-172.

14. Гиц И.Д., Конюхов Б.А. Взаимодействие поверхностных и продольных волн в твердом теле // Акуст. журн. 1974. Т.20. №6. С.827-832.
15. Конюхов Б.А., Конюхова И.Д. Экспериментальные исследования нерезонансных взаимодействий упругих волн в твердых телах // ПМТФ. 1974. №5. С.154-156.
16. Конюхов Б.А., Шалашов Г.М. О нерезонансных параметрических взаимодействиях упругих волн в изотропной твердой среде // Изв. АН СССР. Сер. МТТ. 1976. №5. С. 178-183.
17. Гущин В.В. и др. Методика диагностирования конструкционных материалов. Определение констант упругости третьего порядка акустическим методом. Горький. ВНИИНМАШ Горьковский филиал. 1976. 28 с.
18. Шалашов Г.М. Модуляция звука звуком в акустических резонаторах // Акуст. журн. 1983. Т.29. №2. С. 268-273.
19. Шалашов Г.М. Кросс-модуляция акустических волн на кубической нелинейности твердых тел // Акуст. журн. 1984. Т.30. №3. С. 386-390.
20. Калимулин Р.Р., Касьянов Д.А., Шалашов Г.М. Измерение нелинейных упругих параметров методами нелинейного межскважинного прозвучивания и вертикального профилирования. // Физические основы сейсмического метода: Нетрадиционная геофизика. М. Наука. 1991. С.113-120.
21. Зименков С.В., Назаров В.Е. Модуляция звука звуком в металлических резонаторах// Акуст. журн. 1991. Т.37. №5. С. 1032-1036.
22. Гольдин С.В., Псахье С.Г., Дмитриев А.И., Юшин В.И. Переупаковка структуры и возникновение подъемной силы при динамическом нагружении сыпучих грунтов. // Физическая мезомеханика. 2001. Т.4. №3. С.97-103.
23. Назаров В.Е., Радостин А.В. Амплитудная модуляция звука звуком в водонасыщенном речном песке. // Акустический журнал. 2011. Т.57. №5. С. 596-599.