АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 37 1991 Вып. 5

УДК 534.26
© 1991 г.

Н.В. Горская, С.М. Горский, С.Н. Гурбатов,
В.А. Зверев, Т.А. Краева, В.В. Курин, Т.Н. Николаев
А.И. Хилько

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ ВОЛН ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАССЕЯНИЯ В НЕОДНОРОДНЫХ ВОЛНОВОДАХ

В работе на основе экспериментов анализируются возможности использования частотно-модулированных сигналов в сочетании со спектральной обработкой для измерений полей в неоднородных модельных волноводах. Показано, что использованная методика позволяет осуществлять измерения на фоне слабых помех за счет повышения пространственного разрешения.

Экспериментальные исследования возмущений звуковых полей в волноводах неоднородностями различного рода проводятся, как правило, с использованием квазигармонических [1–3] или амплитудно (фазо)-модулированных [4–6] сигналов. Для первого типа сигналов информация о структуре рассеянных полей заключена в спектральной амплитуде принятого сигнала, для вторых – в его огибающей. При рассеянии на случайных неоднородностях как в первом, так и во втором случае рассеянный сигнал формируется ансамблем неоднородностей.

В случае детерминированных пространственно-локализованных неоднородностей информация о возмущении содержится в амплитуде или ее пространственной (угловой) зависимости [7, 8].

Использование квазигармонических либо модулированных узкополосных сигналов не дает возможности получить в ряде случаев необходимые при измерениях пространственно-временное разрешение и чувствительность. К таким задачам, в частности, можно отнести изучение рассеяния на уединенных вихрях [9, 10], фронтальных зонах и внутритермоклинных линзах [11, 12], локальных неоднородностях дна океана [13, 14], когда большая часть энергии рассеивается неоднородностями под малыми углами, и, следовательно, прямой и рассеянный сигналы во времени не разрешаются и значительно отличаются по величине.

Одной из возможностей, позволяющей повысить точностные характеристики дистанционной акустической диагностики вихрей, линз и других локализованных неоднородностей в волноводах, может стать, по-видимому, применение в качестве зондирующих широкополосных (ШП) и, в частности частотно-модулированных (ЧМ) импульсов.

В этом случае при использовании традиционных для ШП-сигналов алгоритмов сжатия эффективный импульсный объем может быть существенно уменьшен, что обеспечит повышение пространственного разрешения. Рост отношения сигнал/помеха дает возможность измерять поля, рассеянные слабыми возмущениями. Повышение разрешения в сочетании с повышением помехозащищенности обеспечит снижение влияния реверберационной помехи и дает возможность изучать эффекты, определяемые модовой структурой волноводов.

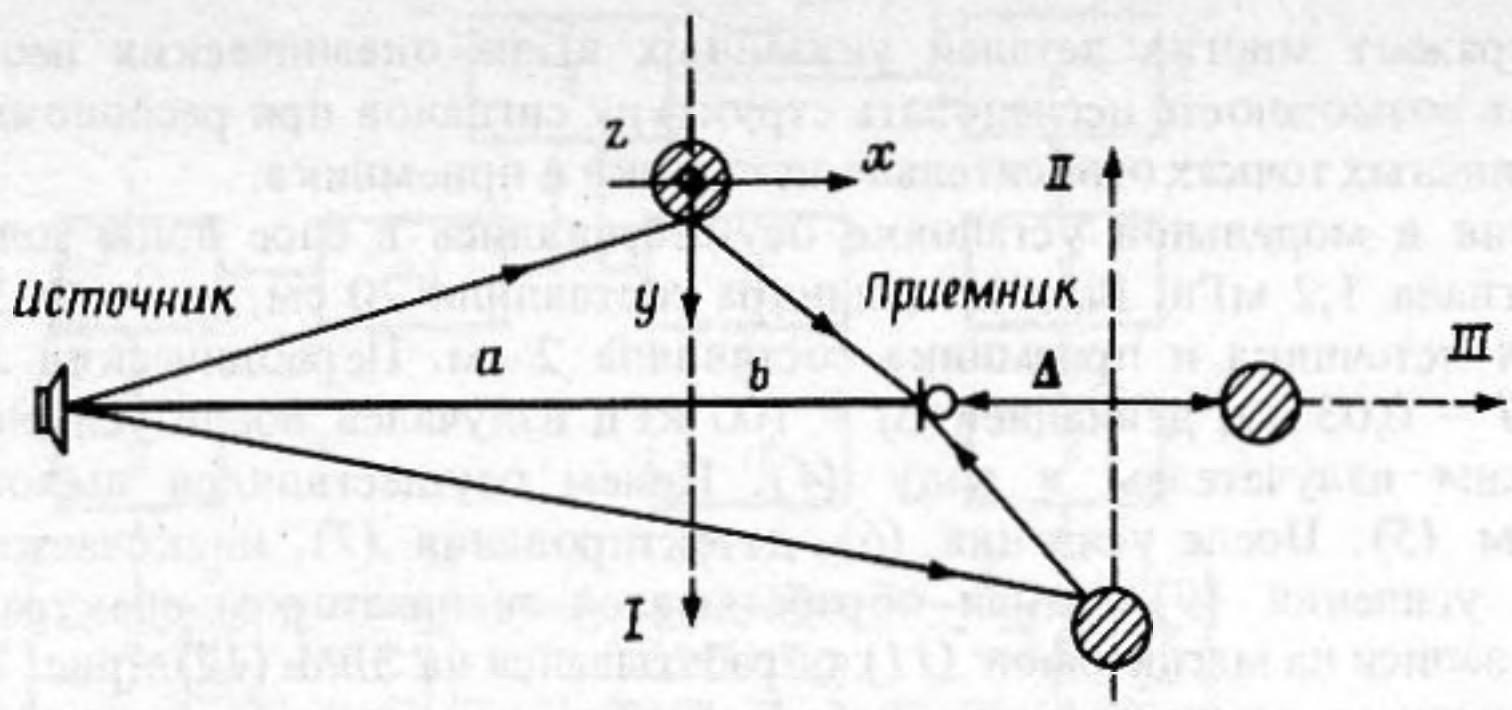

Рис. 1. Взаимное расположение основных элементов схемы измерения (вид сверху)

В настоящей работе методом физического моделирования изучается возможность использования импульсов с ЛЧМ-заполнением для акустической диагностики океанического волновода, содержащего локализованные уединенные неоднородности.

Точечные излучатель и приемник неподвижны и находятся в слоисто-неоднородном полупространстве. В различных его точках помещается рассеиватель (рис. 1). Интенсивность низкочастотной огибающей принятого сигнала представим в виде:

$$I(t) = I_0 + \sum_{i=1}^{N} A_0 A_i \cos[\Delta\omega T^{-1} \delta_i (t - nT)], \tag{1}$$

где $I_0 = ½(A_0^2 + \sum_{i=1}^{N} A_i^2)$, T – период модуляции, $r = \{x, y, z\}$, $\Omega_i = \Delta\omega\delta_i T^{-1}$, $\delta_i = \Delta r_i c^{-1}$, $\Delta\omega$ – девиация частоты, разность времен прихода прямого и рассеянного i-м рассеивателем сигналов, A_0 и A_i – соответственно амплитуды прямого и рассеянного сигналов. В (1) суммируются сигналы от рассеивателей, один из которых – наблюдаемая неоднородность, а остальные представляют собой помехи.

Полезный сигнал (рассеянный исследуемой неоднородностью) выделяется путем фурье-анализа $I(t)$. Информационным признаком полезного сигнала является изменение его частоты вследствие изменения Δr. Спектральные компоненты мешающих рассеивателей (помех) имеют постоянные частоты.

Наибольший по величине полезный рассеянный сигнал имеет место при "просветном" наблюдении [7]. Но в этом случае возможна и значительная помеха вследствие, например, флуктуаций прямого сигнала. Влияние помехи наибольшее при квазигармоническом сигнале. В случае ЧМ-сигнала полезный и прямой сигналы разрешаются при $\Delta\omega\delta_c >$ > 1, где δ_c – задержка во времени между прямым и рассеянным сигналами, что дает возможность провести измерение на фоне слабых помех.

Из соотношения (4), приведенного в [8], следует, что при всех положениях рассеивателя, смещенных от линии источник-приемник на величину, большую $y_0 = \bar{\lambda} ab[zd(a + b)]^{-1}$, где λ – средняя длина волны, d – горизонтальный размер рассеивателя, a и b – расстояния соответственно от источника до рассеивателя и от последнего до приемника (рис. 1), уровень рассеянного сигнала падает на порядок, и наблюдение на фоне флуктуаций сигнала прямой подсветки практически невозможно. Разрешение по Ω имеет место при $y' = (cab)^{½} [\Delta\omega(a + b)]^{-½}$. Таким образом, условие $y_0 = y'$ определяет область параметров, для которых измерения будут осуществляться на фоне относительно слабых помех.

Отмеченные методические соображения подтверждаются результатами измерений, проведенных в лабораторных условиях. В качестве рассеивателя использовался металлический цилиндр, расположенный вертикально. Взятый в качестве модели рассеива-

тель не отражает многих деталей указанных выше океанических неоднородностей, однако дает возможность исследовать структуру сигналов при расположении рассеивателей в различных точках относительно источника и приемника.

Измерения в модельной установке осуществлялись в слое воды толщиной 40 см. Частота сигнала 1,2 мГц. Высота цилиндра составляла 20 см, диаметр 3 см. Глубина погружения источника и приемника составляла 2 см. Периодический ЛЧМ сигнал с периодом $T = 0{,}03$ с и девиацией $\Delta f = 100$ кГц излучался после усиления (*2*) пьезокерамическим излучателем в воду (*4*). Прием осуществлялся пьезокерамическим приемником (*5*). После усиления (*6*), детектирования (*7*), низкочастотной фильтрации (*8*) и усиления (*9*) сигнал обрабатывался анализатором спектра СК4-72 (*10*) либо после записи на магнитофон (*11*) обрабатывался на ЭВМ (*12*) (рис. 2).

В проведенных экспериментах исследовались три случая взаимного расположения приемно-излучающей системы и рассеивающего цилиндра (рис. 1). На рис. 3 представлен текущий спектр мощности огибающей сигнала в относительных единицах при последовательном расположении цилиндра в точках, лежащих вдоль прямой, перпендикулярной линии, соединяющей источник и приемник (случай 1 на рис. 1), при $a = 17$ см, $b = 50$ см, когда дно состояло из толстого слоя резины. В приведенном примере постоянная составляющая сигнала подавлена в интервале, лежащем вблизи нулевых частот. Стационарные максимумы в районе 30 и 60 Гц соответствуют реверберации в нулевом импульсном объеме. При различных положениях рассеивателя дифрагированный на нем сигнал располагался вдоль параболы в плоскости $\{y, \Omega\}$. При $y \sim 0$ дифрагированный сигнал интерферирует с сигналом прямой засветки, что проявляется в падении суммарного сигнала (провал в центре параболы). Этот эффект связан с тем, что поле подсветки находится в противофазе с дифрагированным, если межмодовая дисперсия мала и рассеиватель расположен недалеко от источника или приемника [7, 8].

Если бы измерения осуществлялись с помощью квазигармонических импульсов большой длины, то наблюдалась бы лишь модуляция сигнала по оси y [7]. В случае ЛЧМ дифрагированный сигнал проявляется в виде модуляции и разрешается по оси Ω на фоне поля прямой засветки [7]. В приведенных на рис. 3 результатах измерений рассматриваемая ситуация реализуется в интервале смещений $|y| \leqslant 5$ см. Заметим, что в случае отсутствия мультипликативных помех, являющихся следствием флуктуаций неоднородностей среды, измерения в указанном интервале с точки зрения их точности были бы выгодны, как это имеет место, например, в оптической голографии [17].

Однако, например, в гидроакустических волноводах из-за наличия в среде случайных распределенных неоднородностей, приводящих к флуктуациям прямого сигнала, измерения в широком пространственно-частотном интервале более выгодно осуществлять в зонах тени прямого сигнала засветки [15, 16]. Это и реализуется с помощью ЧМ-сигналов.

В измерениях, результаты которых приведены на рис. 3, цилиндр, используемый в качестве рассеивателя, имел большой поперечный волновой размер и перекрывал по горизонтали, находясь на линии источник-приемник, сразу несколько зон Френеля. По глубине он перекрывал большую часть волновода так, что закрывал и существенную часть площади зон Френеля в волноводе [7]. При этом дифрагированный сигнал был достаточно велик, что позволило наглядно продемонстрировать образование зон тени для сигнала прямой засветки за счет разрешения по модуляционной частоте. Для рассматриваемого случая погрешность измерений дифрагированного поля на параболе (для $|y| \geqslant 5$ см) на порядок меньше погрешности измерений на фоне сигнала прямой засветки.

На рис. 4 показана зависимость, аналогичная приведенной на рис. 3, однако в данном случае на расстоянии 12 см от линии источник-приемник располагался (всегда в одном месте) другой цилиндр, диаметром 6 см, имитирующий в наших измерениях помеху (мешающий рассеиватель). Видно, что участок модуляционных частот от 250 до 400 Гц имеет высокий уровень реверберационного фона, который маскирует измеряемый сигнал. Так как оба цилиндра при смещении $y \sim 15$ см находятся рядом,

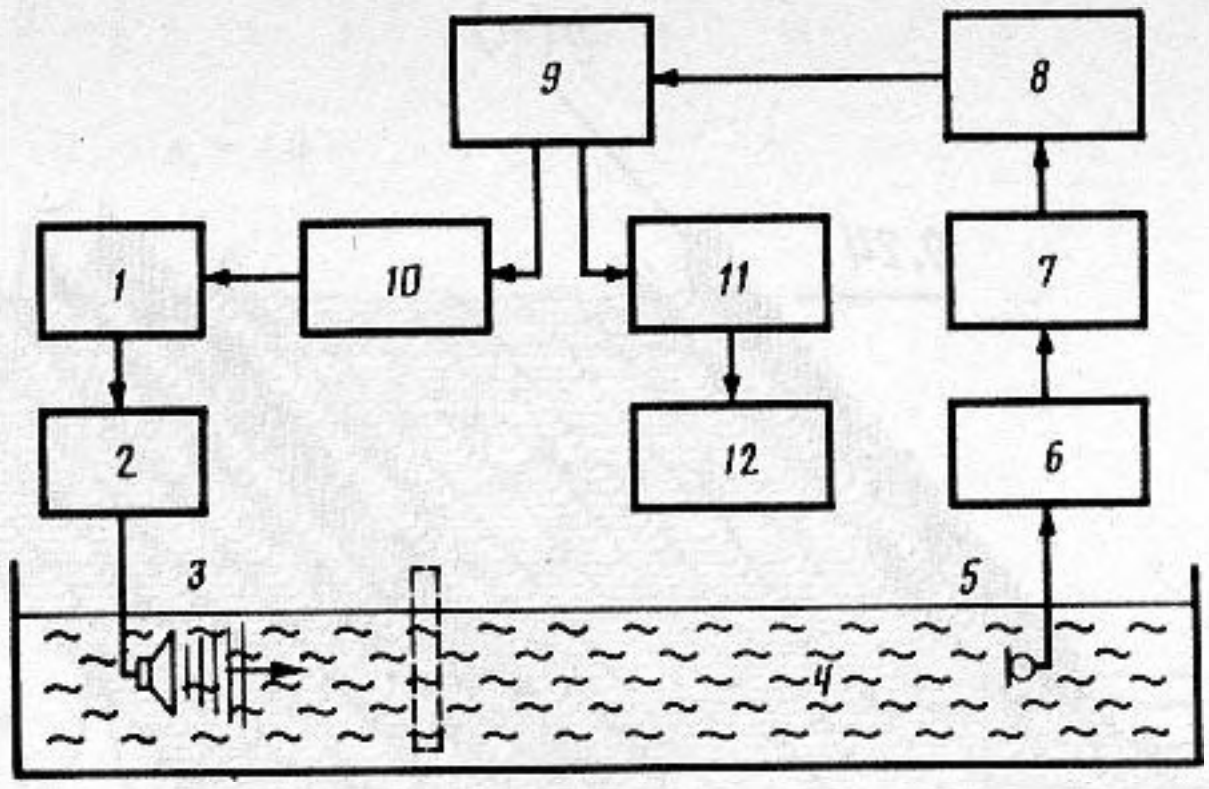

Рис. 2. Блок-схема измерительной электроакустической установки

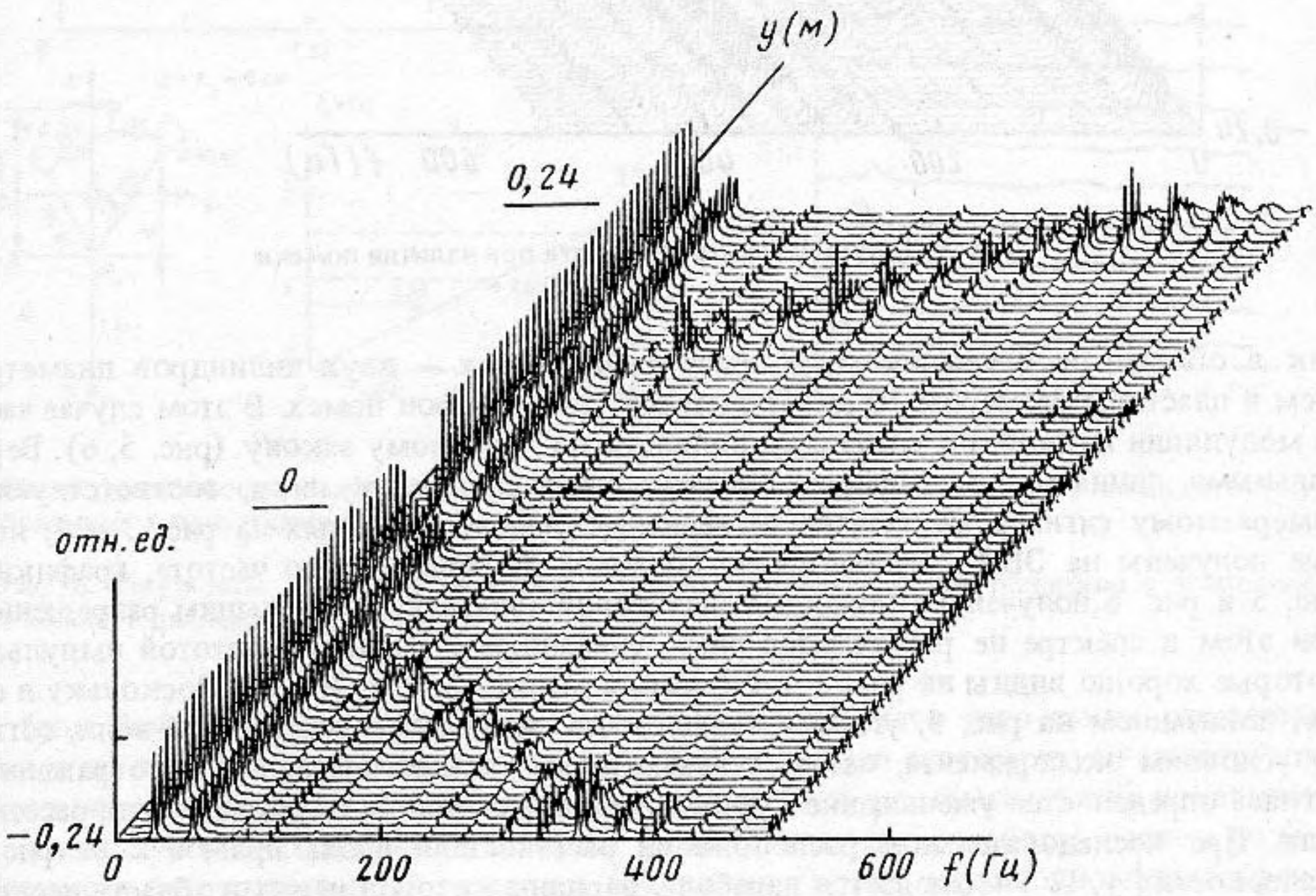

Рис. 3. Текущий спектр мощности огибающей сигнала в зависимости от положения рассеивателя (случай *1* на рис. 1)

то дифрагированные сигналы близки по фазе и интерферируют конструктивно (практически линия, вдоль которой располагался цилиндр диаметром 3 см, не была строго перпендикулярна прямой, соединяющей источник и приемник, что выразилось в некоторой несимметричности параболы). Аналогичное маскирование измеряемого сигнала наблюдалось и при приближении рассеивателя к стенкам ванны, в которой осуществлялись измерения, что проявлялось повышением реверберационного фона на модуляционных частотах свыше 500 Гц.

На рис. 5, *а* приведена зависимость интенсивности от частоты модуляции в случае, когда цилиндр диаметром 3 см удалялся от приемника вдоль прямой источник-прием-

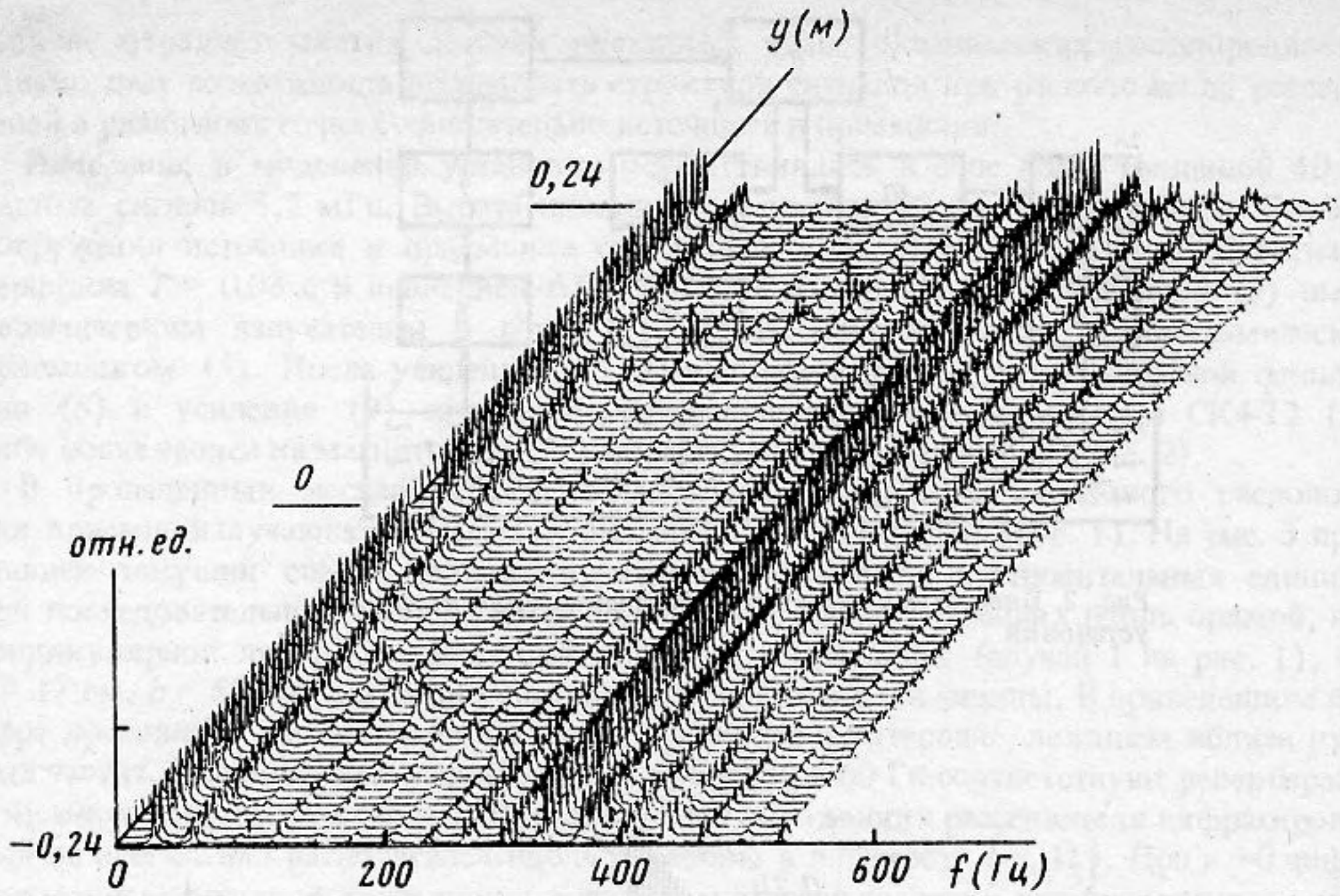

Рис. 4. Текущий спектр мощности при наличии помехи

ник в области за приемником, в присутствии помех – двух цилиндров диаметром 6 см и пластины размером 10 см. Пунктиром показан фон помех. В этом случае частота модуляции нарастает с удалением цилиндра по линейному закону (рис. 5, 6). Вертикальными линиями на графиках отмечены модуляционные пики, соответствующие измеряемому сигналу. В отличие от зависимостей, приведенных на рис. 3 и 4, которые получены на ЭВМ с относительно большим разрешением по частоте, графики на рис. 5 и рис. 6 получены с помощью аналоговой аппаратуры с меньшим разрешением, при этом в спектре не различаются пики, связанные с тактовой частотой импульсов, которые хорошо видны на рис. 3 и 4 (пики, кратные частоте 30 Гц). Поскольку в случае, показанном на рис. 5, угловая зависимость падающей и отраженной волн, согласно условиям эксперимента, остается неизменной, уменьшение величины отраженного сигнала определяется уменьшением поля с ростом расстояния от источника до рассеивателя. При последовательном расположении рассеивателя вдоль прямой *2* на рис. 1, в плоскости $\{y, \Omega\}$ наблюдается парабола, вершина которой лежит в области нескольких сотен герц (в зависимости от положения рассеивателя за приемником). В этом случае измерения рассеянного сигнала осуществляются на фоне относительно слабой реверберации, за исключением случаев приближения рассеивателя либо к стенкам ванны, либо к приемной системе.

Обсуждаемые выше измерения осуществлялись в волноводах с небольшой дисперсией. Поэтому разрушение импульсов подсветки из-за дисперсии на реализуемых интервалах пространственных задержек и для используемых значений девиации частоты сигналов не наблюдалось. Вместе с тем в волноводах с большой геометрической дисперсией следует ожидать разрушения формы импульсов [18], что должно проявляться, в частности, в распределении рассеянной энергии по большему интервалу модуляционных частот. На рис. 6 приведены результаты измерений спектров модуляционных частот для различных положений рассеивателя (взаимное расположение приемно-излучающей системы и рассеивателя те же, что и для случая, представленного на рис. 3), когда толщина волновода составляла 5 см, дно было упругим, а $z_0 = z = 2{,}5$ см. В этом слу-

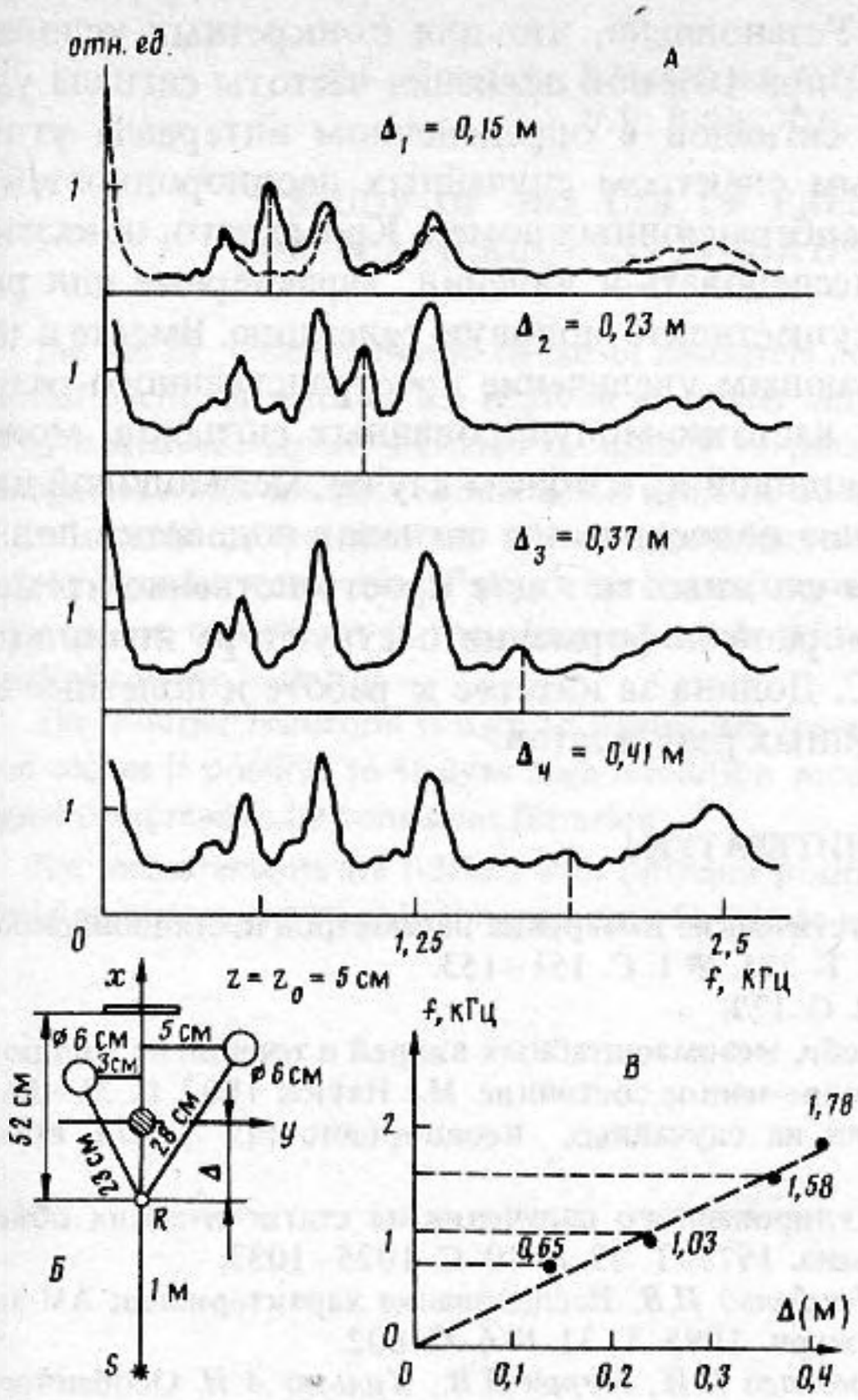

Рис. 5

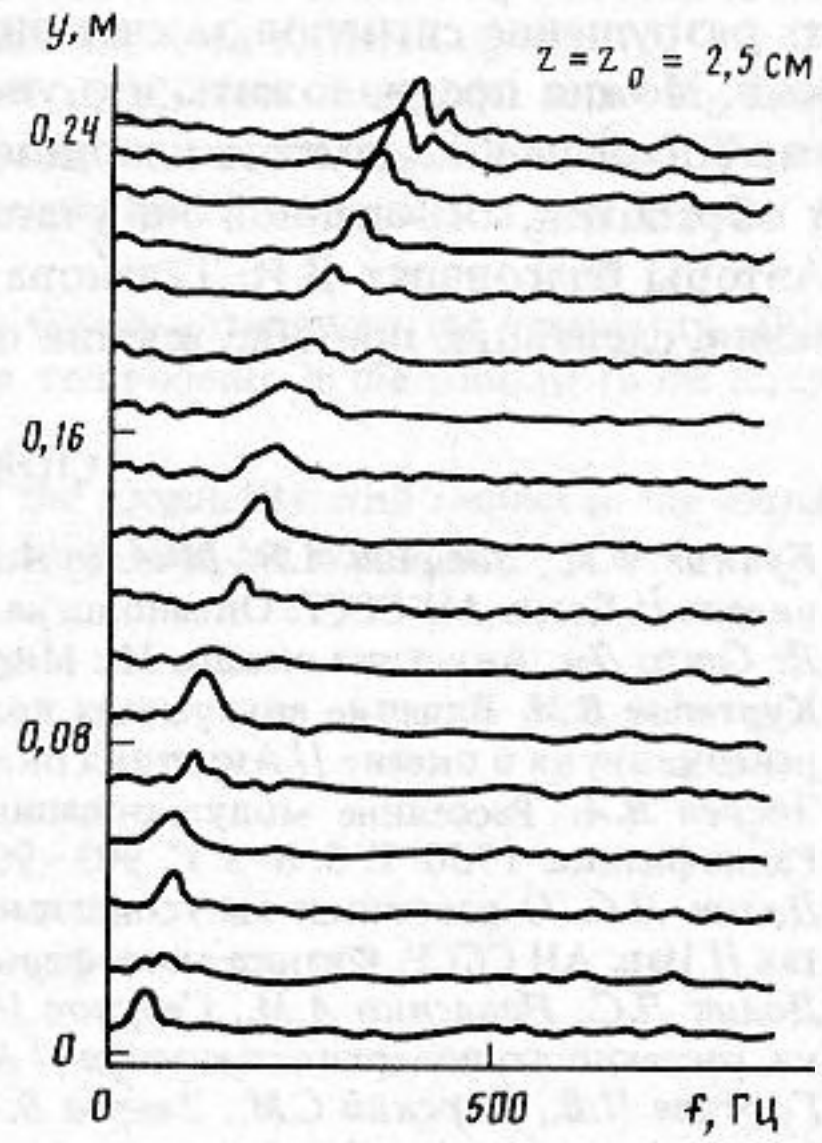

Рис. 6

Рис. 5. Зависимости, полученные при удалении рассеивателя от приемника по линии источник-приемник в присутствии помех (пунктиром показан спектр фона помех)

Рис. 6. Результаты измерений спектров модуляционных частот при рассеянии в волноводе с большой дисперсией

чае (для больших пространственных задержек) проявляется разрушение рассеянного сигнала по оси Ω, в частности формируются два пика. Они соответствуют конструктивно интерферирующим модам и частотам излучения. Результаты измерений показывают, что вследствие геометрической дисперсии формируются две параболы, причем по мере увеличения пространственной задержки (смещения y) этот, чисто волноводный эффект проявляется более ярко. Учитывая, что конструктивно для используемой модели волновода (изоскоростной слой жидкости на упругом полупространстве) интерферируют моды с низкими номерами и несколько хорошо возбуждающихся мод с высокими номерами (с критическими частотами, лежащими вблизи используемого интервала частот), анализ амплитуд разрешающихся по оси Ω пиков позволяет получить информацию о диаграмме рассеяния в вертикальной плоскости.

В результате анализа полученных экспериментальных данных можно сделать следующие выводы: точность измерений в экспериментальной ванне неодинакова в различных ситуациях, которые характеризуются конструкцией ванны, расположением основных элементов схемы измерений и структурой случайных распределенных неоднородностей среды.

Один из способов повышения точности измерений заключается в увеличении пространственного разрешения при измерениях (что, в частности, можно достичь применением пространственно-развитых приемно-передающих систем). Показано, что повысить точность измерений можно путем использования частотно-модулированных сигналов

в сочетании со специальной обработкой. Установлено, что для конкретных условий, реализованных в модельном эксперименте, при 10%-ной девиации частоты сигнала удается осуществить измерения рассеянных сигналов в определенном интервале углов (последний определяется пространственным спектром случайных неоднородностей и формой рассеивателя) на фоне слабых реверберационных помех. Кроме того, показано, что использованная методика позволяет исследовать и явления, характерные для рассеяния звука в волноводах, в частности осуществлять модовую селекцию. Вместе с тем установлено, что препятствием, ограничивающим увеличение пространственного разрешения при измерениях с использованием частотно-модулированных сигналов, может стать разрушение сигналов за счет внутримодовой и, в общем случае, межмодовой дисперсий. Можно предположить, что увеличение полосы частот сигналов подсветки повлечет за собой необходимость использования сложных методов пространственно-временной обработки, основанной на учете априорной информации о структуре волновода.

Авторы благодарят В.И. Таланова и Л.С. Долина за интерес к работе и полезные замечания, сделанные при обсуждении полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бункин Ф.М., Вавилин А.В., Шмелев А.Ю.* Акустические измерения параметров нестационарности океана // Докл. АН СССР. Океанология. 1985. Т. 281. № 1. С. 151–153.
2. *Де Санто Дж.* Акустика океана. М.: Мир, 1982. С. 177.
3. *Куртепов В.М.* Влияние внутренних волн Россби, мезомасштабных вихрей и течений на распространение звука в океане // Акустика океана. Современное состояние. М.: Наука, 1982. С. 36–52.
4. *Зверев В.А.* Рассеяние модулированных волн на случайных неоднородностях // Изв. вузов. Радиофизика. 1960. Т. 3. № 5. С. 903–904.
5. *Долин Л.С.* О рассеянии синусоидально модулированного излучения на статистических объектах // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1977. Т. 13. № 10. С. 1025–1033.
6. *Долин Л.С., Павленко А.М., Седунов Н.А., Шенфельд И.В.* Исследование характеристик АМ-звука, рассеянного поверхностью моря // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 6. С. 802.
7. *Горская Н.В., Горский С.М., Зверев В.А., Николаев Г.И., Курин В.В., Хилько А.И.* Особенности коротковолновой дифракции звука в многомодовых слоистонеоднородных волноводах // Акустика океана. М.: Наука, 1991. С. 98–107.
8. *Горская Н.В., Горский С.М., Зверев В.А., Николаев Г.И., Курин В.В., Хилько А.И.* Коротковолновая дифракция в многомодовом слоистом волноводе // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 1. С. 55–59.
9. *Bacz R.N.* Propagation through a theree-dimensional addy including effects on an array // J. Acoust Soc. Amer. 1981. V. 69. № 1. P. 70–75.
10. *Полянская В.А.* Горизонтальная рефракция и фокусировка звука в области фронтальных мезомасштабных вихрей океана // Вопросы судостроения. Сер. Акустика. 1982. № 15. С. 98–108.
11. *Лысанов Ю.П., Плоткин А.М., Шапиро Г.И.* Влияние внутритермоклинных линз на акустические поля в океане // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25. № 12. С. 1272–1280.
12. *Nusen P.A., Scully–Powez.* Saund propagation through an East Australian Carrent eddy // J. Acoust. Soc. Amer. 1978. V. 63. № 5. P. 1381–1388.
13. *Медвин Г., Сполдинг Р.П.* Подводная гора как объект, вызывающий дифракцию. Акустика дна океана / Под ред. Купермана У., Енсена Ф. М.: Мир. С. 261–276.
14. *Кравцов Ю.А., Кузькин В.М., Петников В.Г.* Дифракция волн на регулярных рассеивателях в многомодовых волноводах // Акуст. журн. 1984. Т. 30. № 3. С. 339–343.
15. *Нечаев А.Г., Хилько А.И.* Определение локальных характеристик распределенных вдоль акустической трассы океанических неоднородностей // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 4. С. 694–699.
16. *Нечаев А.Г., Хилько А.И.* Дифференциальная акустическая диагностика случайных неоднородностей океана // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 2. С. 285–289.
17. *Зверев В.А.* Радиооптика. М.: Сов. радио, 1975. С. 302.
18. *Петухов Ю.В., Хилько А.И.* О возможности оценки размеров очагов цунами по пространственной когерентности сейсмических и гидроакустических волн // Теоретические и экспериментальные исследования длинноволновых процессов. Владивосток: ИМГиГ ДВНЦ СССР, 1985. С. 37–50.

Институт прикладной физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
08.02.90

N.V. Gorskaya, S.M. Gorskii, S.N. Gurbatov, V.A. Zverev, T.A. Kraeva,
V.V. Kurin, T.N. Nikolaev, A.I. Khilko

STUDY OF THE USE OF FREQUENCY-MODULATED WAVES FOR SCATTERING INVESTIGATION IN IRREGULAR WAVEGUIDES

The use of quasi-harmonic signals in measuring acoustic fields scattered at low angles by weak scatterers is insufficient for reaching the required sensitivity and space resolution. Such situation occurs in measuring of hydroacoustic signals scattered by solitary vortices, frontal zones and intrathermocline lenses in oceanic waveguides where the direct illumination signal fluctuations mask the weak scattered signals.

It is studied experimentally whether frequency-modulated signals can be used for scattering investigation in irregular waveguides. Pulses with linear frequency modulation are used for this purpose. The measurements are carried out in the ultrasonic range with the irregularity in the form of a steel cylinder placed vertically in the basin.

The Fourier transform is used to distinguish the acoustic signals scattered by the irregularity. This method makes it possible to analyze high-resolution modulation components in the contrast to the traditional signal compression by consistent filtration.

The measurements are fulfiled with different positions of the irregulatity with respect to the source and receiving system as well as in the presence of obstacle in the form of largesize cylinders.