

УДК 534.222

© 1991 г.

Д.А. Дементьев, В.Д. Свет, Д.А. Федотов

### ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН МЕТОДОМ АПЕРТУРНОГО СИНТЕЗА В ОКЕАНИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

Приведены экспериментальные результаты по выделению и измерению параметров нормальных волн в условиях приповерхностного океанического канала. Для выделения нормальных волн использован метод апертурного синтеза при сканировании приемника в вертикальной плоскости. Отмечено хорошее совпадение расчетных и измеренных значений фаз первых десяти нормальных волн при достигнутой величине синтезированной апертуры 500 м на частоте 230 Гц.

Экспериментальные исследования многомодовой структуры звуковых полей в океане обычно осуществляются с помощью протяженных линейных антенн. В диапазоне низких частот необходимы большие волновые размеры антенн, создание и постановка которых в открытом океане сопряжена с серьезными техническими трудностями.

Альтернативным подходом, как известно, является метод искусственного синтеза апертуры, осуществляемый за счет движения одиночного приемника или излучателя по заданной траектории. Применимость этого метода в условиях открытого океана была апробирована в работах [1–3] для измерения пространственного спектра разности волновых чисел канальных мод, оценки горизонтальной изменчивости профиля скорости звука и акустических характеристик грунта в мелководных районах [4].

Метод апертурного синтеза может быть реализован в двух вариантах. В первом – регистрируемой величиной является мгновенное значение звукового давления, во втором – регистрируется интенсивность звукового поля. Результаты, полученные в работах [1–4], основаны на методе апертурного синтеза по интенсивности. Для измерения амплитуд и фаз нормальных волн необходимо использовать первый вариант апертурного синтеза. Экспериментальной проверке возможности применения этого метода в условиях открытого океана и посвящена данная работа.

Классический метод апертурного синтеза в свободном пространстве предполагает обязательным выполнение двух условий: длина пространственной когерентности сигнала  $ct$  должна быть больше длины синтезируемой апертуры  $L_a$  и любые случайные отклонения движущегося приемника  $\delta R$  от заданной траектории синтеза должны быть меньше длины волны в течение времени синтеза  $T$ . Предельные значения указанных параметров можно записать в виде:

$$ct \geq L_a \text{ или } \Delta f/f \leq \lambda/L_a, \quad (1)$$

$$\delta R \leq \lambda/8, \quad (2)$$

где  $f$  – частота сигнала,  $\lambda$  – длина волны,  $\Delta f$  – полоса частот,  $v_c$  – скорость синтеза,  $T$  – время синтеза,  $L_a = v_c T$  – длина синтезируемой апертуры. Более точные соотношения для тональных и сложных сигналов и различной геометрии синтеза можно найти в работах [5, 6]. Если условие (1) обычно можно реализовать и даже ослабить, ограничив сектор углов приема величиной  $\alpha$  (при этом  $\Delta f/f \leq 2\pi\lambda/\alpha L_a$ ), то условие (2), известное в голографии как условие Френеля, накладывает жесткие ограничения на

величину  $L_a$ , так как из-за подвижности верхней границы океана (а следовательно, и средств измерений) невозможно сколь угодно долго обеспечить выполнение указанного условия, особенно на высоких частотах.

Однако, как справедливо указывалось авторами работы [7], при синтезе апертуры в волноводе с горизонтальной стратификацией на низких и инфразвуковых частотах основную роль играет не длина волны звука, а пространственный период интерференции мод. В отличие от синтеза в свободном пространстве, при котором по принятому мгновенному значению сигнала необходимо искусственно образовать интерференционную картину путем перемножения этого сигнала с опорным, в волноводе интерференционная картина (голограмма) уже образована за счет интерференции распространяющихся нормальных волн, причем наименьший период этой картины определяется максимальным номером учитываемой моды. Именно по этой причине условие (2) можно значительно ослабить и за счет этого реализовать апертурный синтез в вертикальной плоскости не по интенсивности, а регистрируя мгновенные значения амплитуд сигналов.

Согласно [8], поле гармонического источника на некотором расстоянии  $R$  равно:

$$P(R, z) = \frac{i}{4} \sum_{l=1}^N \psi_l(z) \psi_l(z_0) \exp(ika_l R) (\sqrt{ka_c R})^{-1} = \sum_{l=1}^N \psi_l(z) \hat{A}_l, \quad (3)$$

где

$$\hat{A}_l = \psi_l(z_0) \exp(ika_l R) (\sqrt{ka_l R})^{-1}, \quad (4)$$

$a_l$  – горизонтальные волновые числа,  $\psi_l$  – нормированные собственные функции волновода,  $N$  – максимальное число учитываемых однородных мод,  $z$  – вертикальная координата,  $z_0$  – глубина источника сигнала. Ввиду ортогональности мод на интервале  $(-H, 0)$ , где  $H$  – глубина волновода, комплексные коэффициенты возбуждения мод  $\hat{A}$  определяются как

$$\hat{A}_l = A_l \exp(2\pi i \varphi_l) = \int_{-H}^0 P(R, z) \psi_l(z) dz, \quad (5)$$

где  $A_l$ ,  $\varphi_l$  – амплитуда и фаза  $l$ -й моды соответственно. Для того чтобы измерить с достаточной точностью фазы мод  $\varphi_l$ , необходимо, чтобы за время синтеза апертуры разность фаз между 1-й и  $l$ -й модами изменялась за счет различных возмущающих факторов меньше чем на  $\pi$ , т.е.  $2\pi \Delta R (a_1 - a_l) / \lambda \ll \pi$ , где  $\Delta R$  – наименьший период интерференционной картины по расстоянию. Поэтому  $\Delta R \ll \lambda / 2 (a_1 - a_l)$ . И, следовательно, взаимные смещения точек приема и излучения  $\delta R$  за время  $T$  не должны превышать  $\Delta R$ ,  $\delta R \leq \Delta R$ . При волноводном распространении звука, когда излучатель и фазовый центр синтезированной антенны располагаются вблизи оси звукового канала, разность  $(a_1 - a_l) \ll 1$  и допустимые значения величины  $\delta R$  могут составлять десятки и сотни длин волн, а не доли длины волны  $\lambda$ . Аналогичные условия могут быть получены и для допустимых случайных перемещений по вертикали (это могут быть случайные отклонения излучателя по глубине) из анализа вертикальных волновых чисел  $\beta_l$ :  $\delta z < \lambda / 2 (\beta_1 - \beta_l)$ . Обычно эти величины могут составлять десятки метров для канальных мод.

Дополнительным источником ошибок в рассматриваемом методе являются погрешности измерения профиля скорости  $c(z)$ , из-за которых рассчитанные собственные функции волновода могут не совпадать с истинными собственными функциями. Пусть предполагаемой скорости звука  $c$  соответствуют горизонтальные и вертикальные волновые числа  $a_l$  и  $\beta_l$  соответственно, а измеренной (фактической) скорости звука  $c' = c + \Delta c$  –  $a'_l$  и  $\beta'_l$  соответственно. Для выделения  $l$  нормальных волн необходимо, чтобы выполнялись следующие условия:

$$\frac{2\pi R}{\lambda} [(a'_1 - a'_l) - (a_1 - a_l)] \ll \pi, \quad (6a)$$

$$\frac{2\pi L_a}{\lambda} [(\beta'_1 - \beta'_l) - (\beta_1 - \beta_l)] \ll \pi. \quad (6b)$$

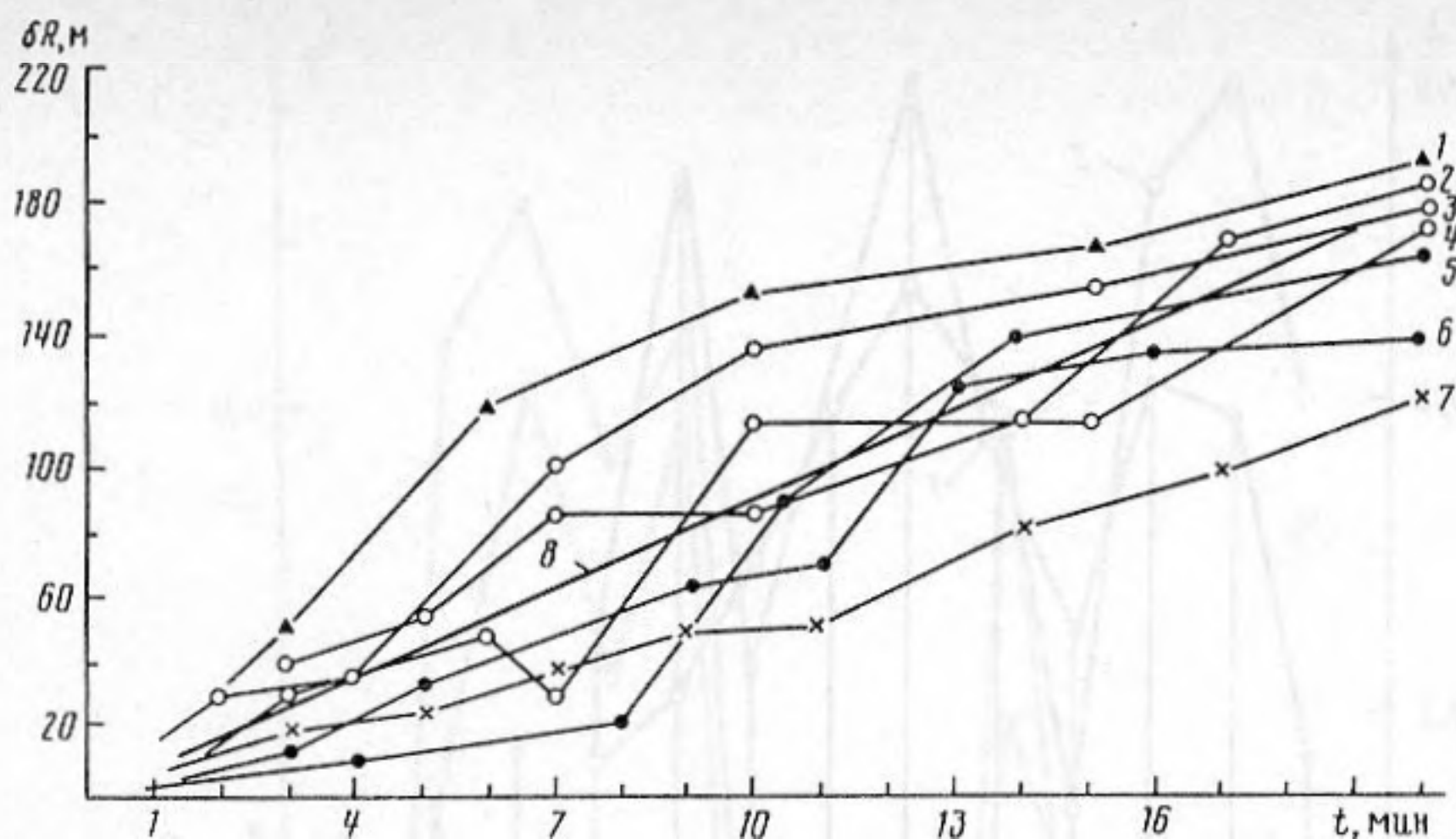


Рис. 1. Изменение расстояния между точками приема и излучения: 1-7 - отдельные измерения, 8 - усредненная зависимость

Дальнейшие оценки можно получить, в частности, для идеального волновода с мягкими границами, у которого

$$\beta_l = \left(l + \frac{1}{2}\right) c / 2fH, \quad a_l = \sqrt{1 - \beta_l^2} \quad [8].$$

Тогда, учитывая только первые члены разложения  $\beta_l'$  и  $a_l'$  по малому параметру  $\Delta c/c$ , можно получить

$$\frac{L_a \Delta c}{Hc} \ll \frac{2\pi}{\beta_l \left(l + \frac{1}{2}\right) \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_l^2}} + \frac{\beta_l}{2\sqrt{1 - \beta_l^2}} \right]}, \quad (7a)$$

$$\frac{R \Delta c}{Hc} \ll \frac{2\pi}{l+1}. \quad (7b)$$

Численные оценки, выполненные по полученным формулам (7a), (7b), показывают, что ошибки измерения скорости звука порядка 1-1,5% позволяют с достаточной точностью измерять комплексные амплитуды первых 10-20 нормальных волн.

Заметим, что получение каких-либо более точных аналитических выражений для оценки влияния погрешностей  $\Delta c$ ,  $\Delta R$  и  $\Delta z$  на качество измеренных параметров нормальных волн для волновода с произвольным профилем скорости звука  $c(z)$  сильно затруднено, и эта задача может быть решена методами численного моделирования.

Экспериментальные исследования проводились в северо-западной части Тихого океана в осенний период. В районе работ ось звукового канала находилась на глубине порядка 70 м при общей глубине места  $H = 2500$  м. Приемное и излучающее суда, находившиеся на расстоянии  $R$  друг от друга, располагались таким образом, чтобы их взаимный дрейф был минимален. Скорость ветра в районе составляла  $< 2$  м/с, а скорости дрейфа приемного и излучающего судов были в среднем равны  $\leq 0,5$  и  $\leq 0,4$  м/с, соответственно. Глубина излучателя составляла  $z_0 = 75$  м. Генерируемый сигнал - тон с частотой  $f = 230$ . Поскольку взаимный дрейф судов является основным источником ошибок, то для его оценки в течение всех серий экспериментов непрерывно измерялась дистанция между судами и их координаты. На рис. 1 показаны выборочные данные для одной из серий таких измерений, из которых следует, что суда расходились со средней скоростью  $\sim 0,16$  м/с.

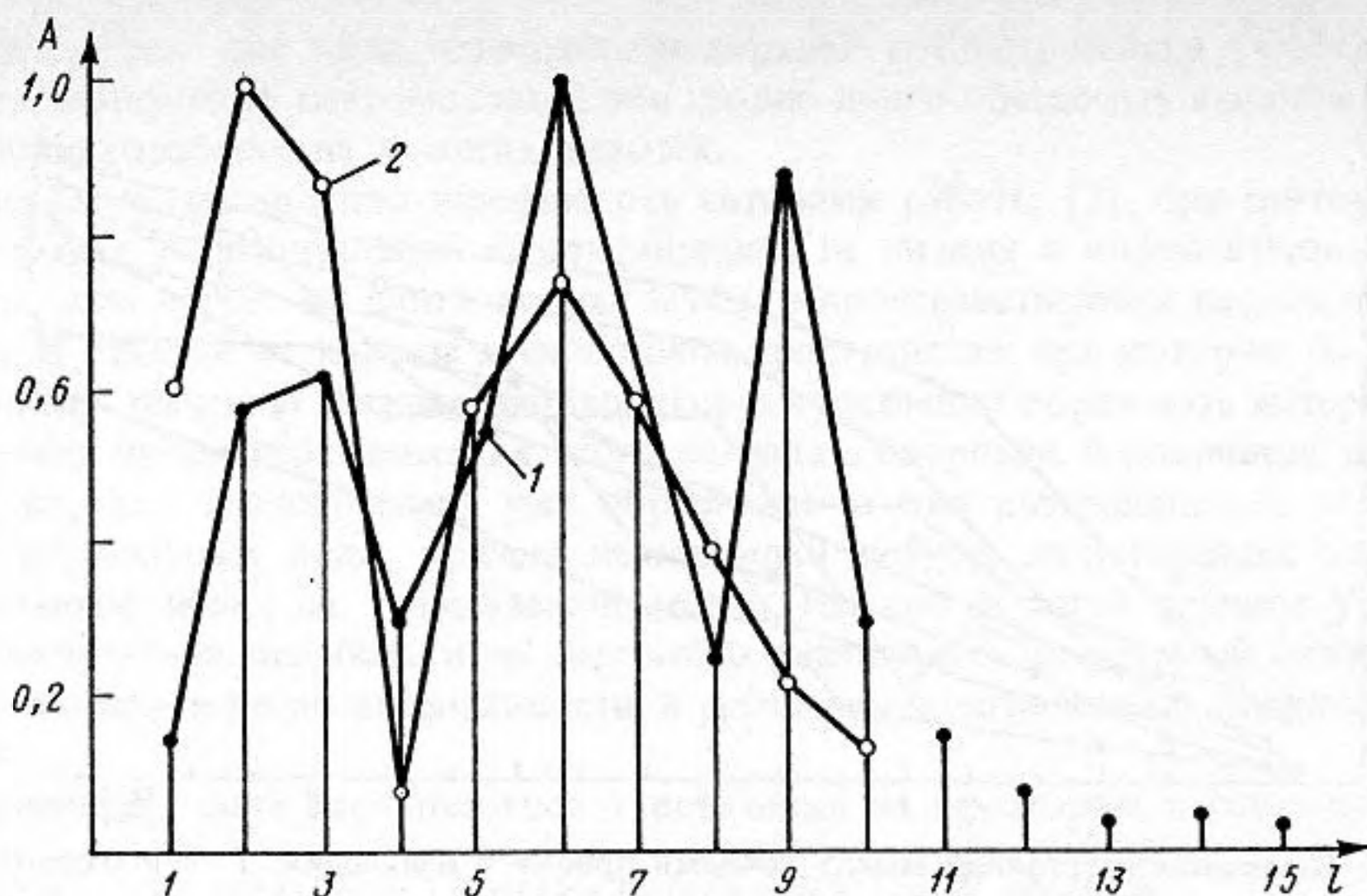


Рис. 2. Амплитуды нормальных волн: 1 – расчетные значения, 2 – измеренные значения

Контейнер с приемным гидрофоном сначала заглублялся на некоторую начальную глубину порядка 45–50 м, а затем осуществлялся его спуск на кабель-тросе со скоростью  $v_0 = 3$  м/с до заданной глубины порядка 450–500 м. Поскольку масса контейнера значительно больше массы вытравленного троса, то приближенно можно считать, что при дрейфе приемного судна гидрофон опускался по наклонной прямолинейной траектории. Контроль положения гидрофона во время опускания осуществлялся на основе измерений трех параметров: длины вытравленного троса, показаний глубиномера и текущего расстояния до контейнера по отраженным сигналам эхолота. Анализ совокупности этих данных показал, что угол отклонения в вертикальной плоскости не превышал  $8-12^\circ$ , а отклонения от прямолинейной траектории не превышали  $\pm 5,5$  м с учетом поправки на смещение приемного судна во время синтеза. Электрический сигнал с гидрофона после предварительной узкополосной фильтрации в 3%-ной полосе регистрировался на магнитной ленте, с которой потом вводился в ЭВМ. Отношение сигнал/шум после фильтрации составляло не менее 18–24 Дб.

По измеренной зависимости профиля скорости звука  $c(z)$  с помощью волновой программы "Мальва" [9] сначала рассчитывались собственные функции волновода  $\psi_l(z)$  горизонтальные и вертикальные волновые числа,  $a_l$  и  $\varphi_l$  соответственно, а также амплитуды и фазы мод  $A_l$ ,  $\varphi_l$  и само звуковое поле в вертикальном сечении волновода. Далее из полученных записей сигналов отбирались такие, для которых выполнялось условие  $\delta R \leq \Delta R$ .

Как оказалось, этому условию удовлетворяли первые 10–11 наиболее энергонесущих мод (рис. 2). Оценка величины  $a_l$  показала, что допустимые значения  $\Delta R$  могут составлять 350–365 м, в то время как измеренные значения величин  $\delta R$  составляли не более 100–110 м за время синтеза  $T = 10$  мин. Заметим, что в экспериментах значения поля  $P(R, z)$  измерены на интервале  $0 - L_a$ , причем  $L < H$ . Однако для выбранных канальных мод расчетные значения  $\psi_l(z)$  близки к нулю при  $z > L_a$ . Поэтому расчет по формуле (5) не должен вносить большие погрешности в комплексные коэффициенты возбуждения  $\hat{A}_l$ . При машинной обработке значения функций  $P(R, z)$  и  $\psi_l(z)$  представлялись дискретными отсчетами  $P_k$  и  $\psi_{lk}$  на интервале  $0 - L_a$  с шагом дискретизации  $d < 1/2\beta_N$ , где  $\beta_N$  – вертикальное волновое число  $N$ -й моды. Затем по отсчетам  $P_k$  формировался комплексный вектор отсчетов поля  $P(z_k)$  следующим образом. Сигнал с приемника можно записать как  $u(t) = A(t) \cos[2\pi ft + \varphi(t)]$ , где

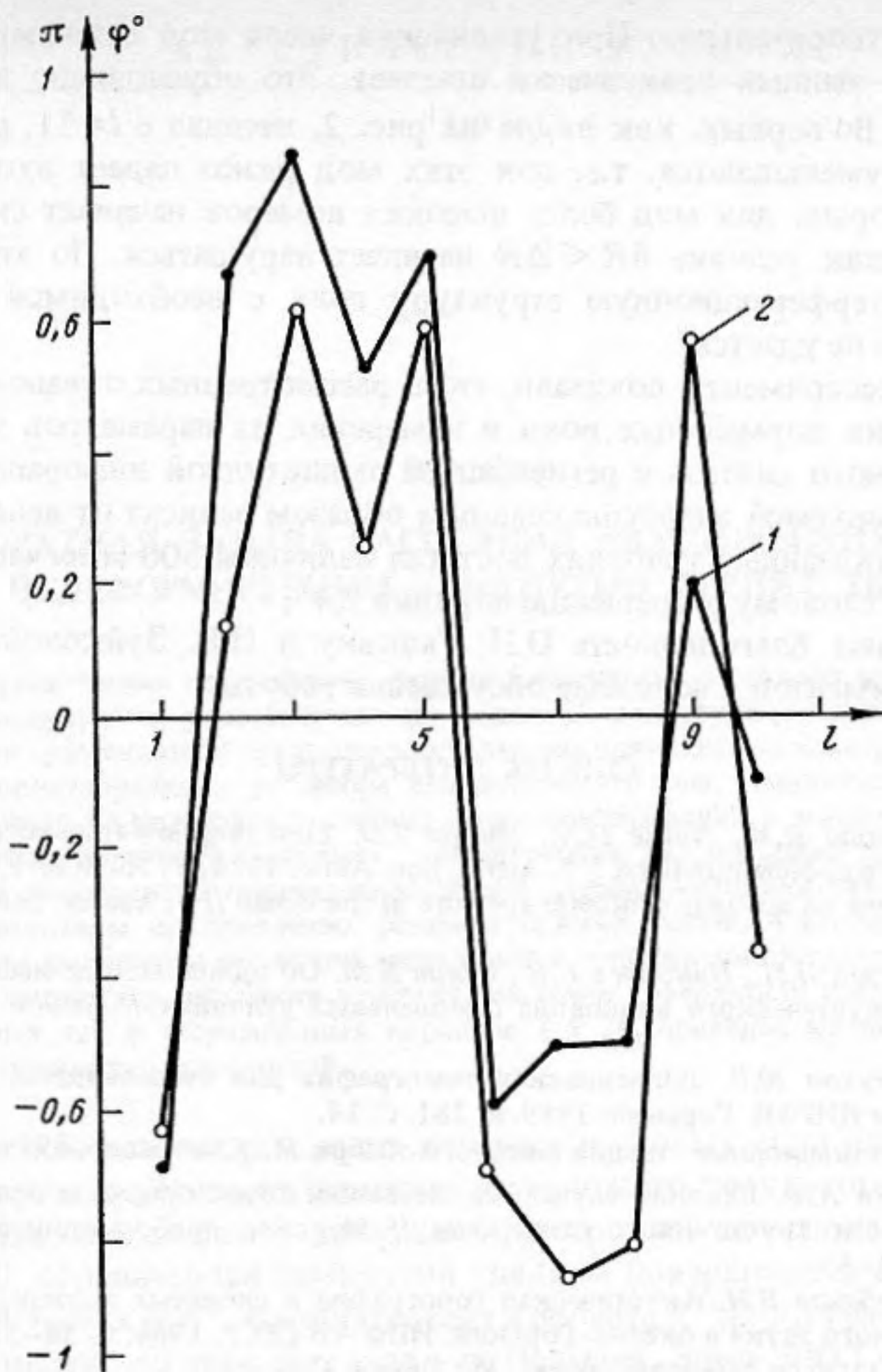


Рис. 3. Фазы нормальных волн: 1 — расчетные значения, 2 — измеренные значения

$A(t)$  и  $\varphi(t)$  — медленные функции времени по сравнению с сигналом несущей частоты  $f$ , причем минимальный период их изменения определяется величиной  $1/\beta_N v_c$ . Поскольку при синтезе  $t = z/v$ , то  $P(z) = A(z/v) \exp[2\pi i \varphi(z/v)]$ . Величины  $P(z_k)$  вычислялись как

$$\operatorname{Re} \{ P(z_k) \} = \int_{z/v - \Delta t}^{z/v + \Delta t} u(t) \cos(2\pi f t) dt,$$

$$\operatorname{Im} \{ P(z_k) \} = \int_{z/v - \Delta t}^{z/v + \Delta t} u(t) \sin(2\pi f t) dt.$$

Интервал временного интегрирования  $2\Delta t$  составил несколько периодов основной частоты при дискретизации сигнала 4 выборками на период. Для того чтобы за время  $\Delta t$  величина сигнала изменилась незначительно, необходимо, чтобы  $2\Delta t \ll 1/\beta_N v_c$ . По измеренным значениям  $P(z_k)$ , зная  $\psi_{I_k}$ , вычислялись амплитуды и фазы мод по выражению (5).

Данные одной серии обработанных измерений представлены на рис. 2, 3. Видно, что расчетные и экспериментальные значения фаз нормальных волн хорошо совпадают друг с другом. Разбросы амплитуд оказались несколько большими, но и здесь совпаде-

ние вполне удовлетворительное. При увеличении числа мод совпадение расчетных и экспериментальных данных практически исчезает. Это обусловлено по крайней мере двумя причинами. Во-первых, как видно из рис. 2, начиная с  $l=11$ , расчетные амплитуды мод резко уменьшаются, т.е. для этих мод резко падает входное отношение сигнал/шум. Во-вторых, для мод более высоких номеров начинает сказываться величина дрейфа, так как условие  $\delta R < \Delta R$  начинает нарушаться. По этим причинам зарегистрировать интерференционную структуру поля с необходимой для выделения этих мод точностью не удастся.

Приведенные эксперименты показали, что в рассмотренных океанологических условиях для выделения нормальных волн и измерения их параметров можно использовать метод апертурного синтеза с регистрацией амплитудной информации. Максимальный размер синтезируемой апертуры главным образом зависит от величины взаимного дрейфа судов и в указанных условиях достигал величины 500 м на частоте  $f_0 = 230$  Гц, что соответствует угловому разрешению порядка  $7,4^\circ$ .

Авторы выражают благодарность О.П. Галкину и Н.В. Зуйковой за помощь при постановке экспериментов и полезные обсуждения работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cuthrie A.N., Fitzgerald R.M., Nuttle D.A., Shaffer J.D.* Long-rangelow-frequency cw propagation in the deep ocean: Antigua-Newfoundland // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1974. V. 56. № 1. P. 58–69.
2. *Williams R.S.* Creating an acoustic synthetic aperture in the ocean // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1976. V. 60. № 1. P. 60–73.
3. *Горская Н.В., Кустов Л.М., Николаев Г.Н., Салин Б.М.* Об одном методе исследования модовой структуры поля акустического волновода в модельных условиях // *Акуст. журн.* 1981. Т. 27. № 1. С. 93–97.
4. *Лазарев В.А., Петухов Ю.В.* Доплеровская томография для мелководных океанических волноводов: Препринт НИРФИ. Горький: 1989. № 281. С. 14.
5. *Реутов А.П.* Радиолокационные станции бокового обзора. М.: Сов. радио, 1979. С. 275.
6. *Свет В.Д., Соболев А.Ф.* Влияние случайных смещений точек приема и излучения на коэффициент контрастности акустических голограмм // *Морское приборостроение. Сер. Акустика.* 1973. Вып. 3. С. 74–81.
7. *Шаронов Г.А., Лобанов В.Н.* Акустическая голография в слоистых волноводах // *Интерференция широкополосного звука в океане.* Горький: ИПФ АН СССР, 1984. С. 34–53.
8. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
9. *Вагин А.В., Мальцев Н.Е.* О расчетах низкочастотных полей в слоистом океане // *Вопросы судостроения. Сер. Акустика.* 1977. Вып. 9. С. 41–52.

Акустический институт  
им. Н.Н. Андреева  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
09.01.90

D.A. Dementiev, V.D. Svet, D.A. Fedotov

#### MEASUREMENT OF NORMAL MODE PARAMETERS BY MEANS OF APERTURE SYNTHESIS IN AN OCEANIC WAVEGUIDE

The method of acoustic synthetic apertures in the oceanic waveguide for a measurement of normal modes parameters such as an amplitude and a phase is discussed. The analysis of the experimental results shows that measured amplitudes and phases for low number modes are in a good agreement with numeric results for the reached size of the synthetic aperture up to 500 m for frequency of 230 Hz.