

УДК 681.7:534.883

ИЗМЕРЕНИЕ ФОРМЫ ВОЛНОВОГО ФРОНТА СИГНАЛОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В ГЛУБОКОМ ОКЕАНЕ, МЕТОДОМ АПЕРТУРНОГО СИНТЕЗА

© 1994 г. Д. А. Дементьев, В. Д. Свет

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 23.06.93 г.

Рассмотрен метод измерения формы волнового фронта сигналов, распространяющихся в океане, основанный на апертурном синтезе короткой антенной в вертикальной плоскости и оптической многоканальной регистрации сигналов. Длина синтезированной апертуры составляла 500 м, частота звуковой волны – 300 - 800 Гц. Оценены погрешности измерения формы фронта с учетом возможного дрейфа приемо-излучающих средств. Приведены экспериментальные результаты измерений формы волновых фронтов сигналов в ближней и первой зоне конвергенции.

Исследование и анализ формы волновых фронтов акустических сигналов, распространяющихся в океанических волноводах представляют большой интерес. В лучевой акустике принятое поле обычно описывается суммой плоских волн и анализ пространственной структуры поля осуществляется на основе его углового спектра.

Вместе с тем, в ряде работ [1 - 3] отмечалось, что форма волнового фронта сигналов в стратифицированных волноводах может существенно отличаться от плоских волн. Например, в области каустик, или когда длина вертикальной антенны соизмерима с глубиной волновода, а число распространяющихся мод невелико [3]. Аппроксимация формы волнового фронта суммой плоских волн может оказаться в таких случаях некорректной или трудно интерпретируемой.

В связи с этим большой интерес могут представить такие методы, которые позволяют непосредственно в эксперименте оценить и измерить

форму волнового фронта принимаемого сигнала. Одна из первых публикаций, посвященная этой проблеме представлена работой [1], в которой рассмотрена одна из возможных методик измерения формы волнового фронта, основанная на приеме сигналов на относительно короткую вертикальную антенну.

В настоящей работе рассмотрен метод оценки формы волнового фронта, основанный на апертурном синтезе в вертикальной плоскости.

При наличии приемной вертикальной антенны достаточно больших размеров с N приемниками, с шагом $\Delta = \lambda/2$, где λ – длина звуковой волны, регистрация формы волнового фронта сигнала не представляла бы особой сложности. Для этого достаточно было бы излучить короткий тональный импульсный сигнал с длительностью Δt на частоте f_0 и зарегистрировать его одновременно со всех N приемников антенны длиной L . Линия, соединяющая начала приходов всех импульсных сигналов, и описывала бы форму падающего волнового фронта на антенну. Поскольку создание и эксплуатация больших многоэлементных апертур являются весьма сложной технической задачей, то альтернативным способом может быть апертурный синтез [4]. Предположим, что точки “приема-излучения” жестко зафиксированы. Установим короткую вертикальную антенну длиной L_0 с k приемниками звука на заданной глубине z_1 и зарегистрируем k принятых тональных импульсных посылок. Для плоской волны такая запись будет иметь вид, показанный на рис. 1. Затем опустим антенну на глубину $z_2 = z_1 + L_0$ и снова зарегистрируем принятые импульсные сигналы. Поступая таким образом n раз, в результате получим n многоканальных записей по длине вертикального разреза $L = nL_0$. Далее, учитывая импульсный характер сигналов, “состыкуем” полу-

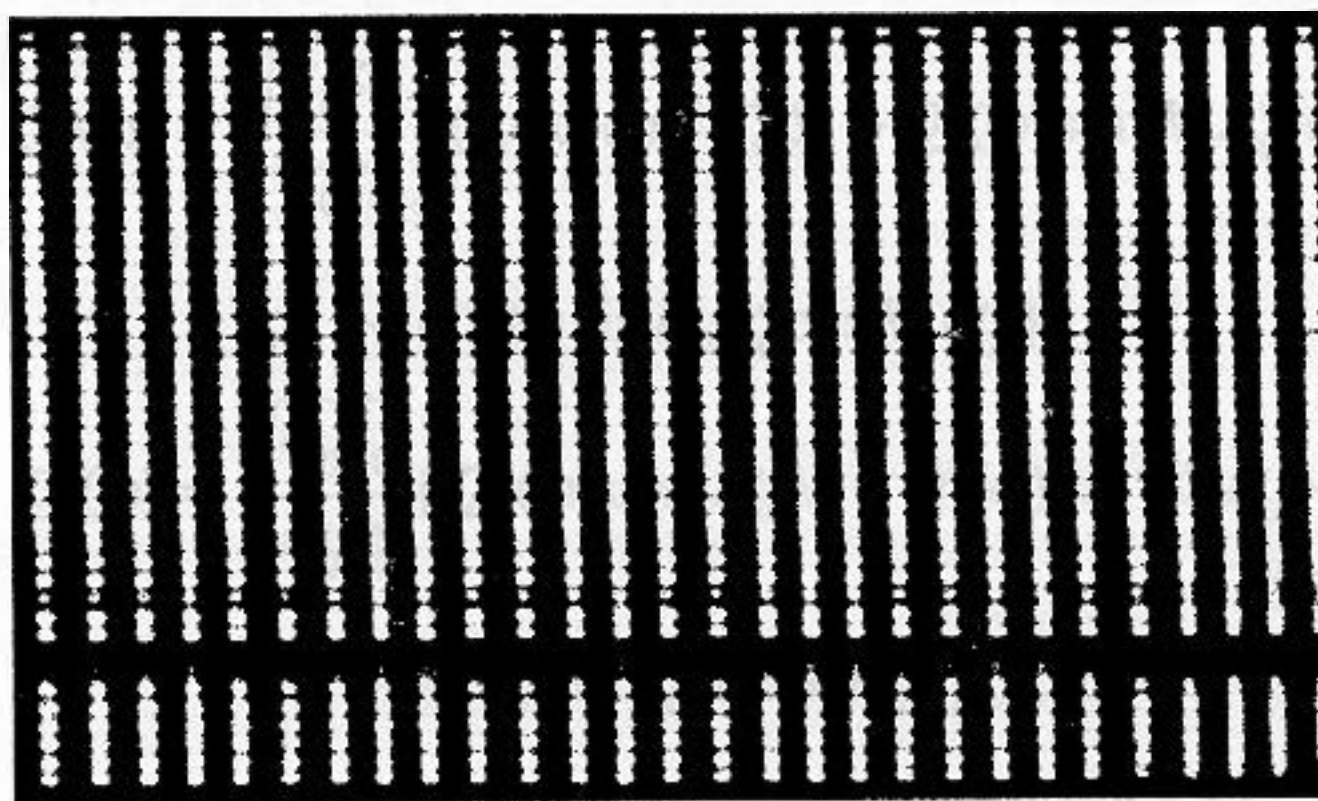


Рис. 1. Оптическая запись фронтов плоской волны с антенны, содержащей $k = 42$ приемника.

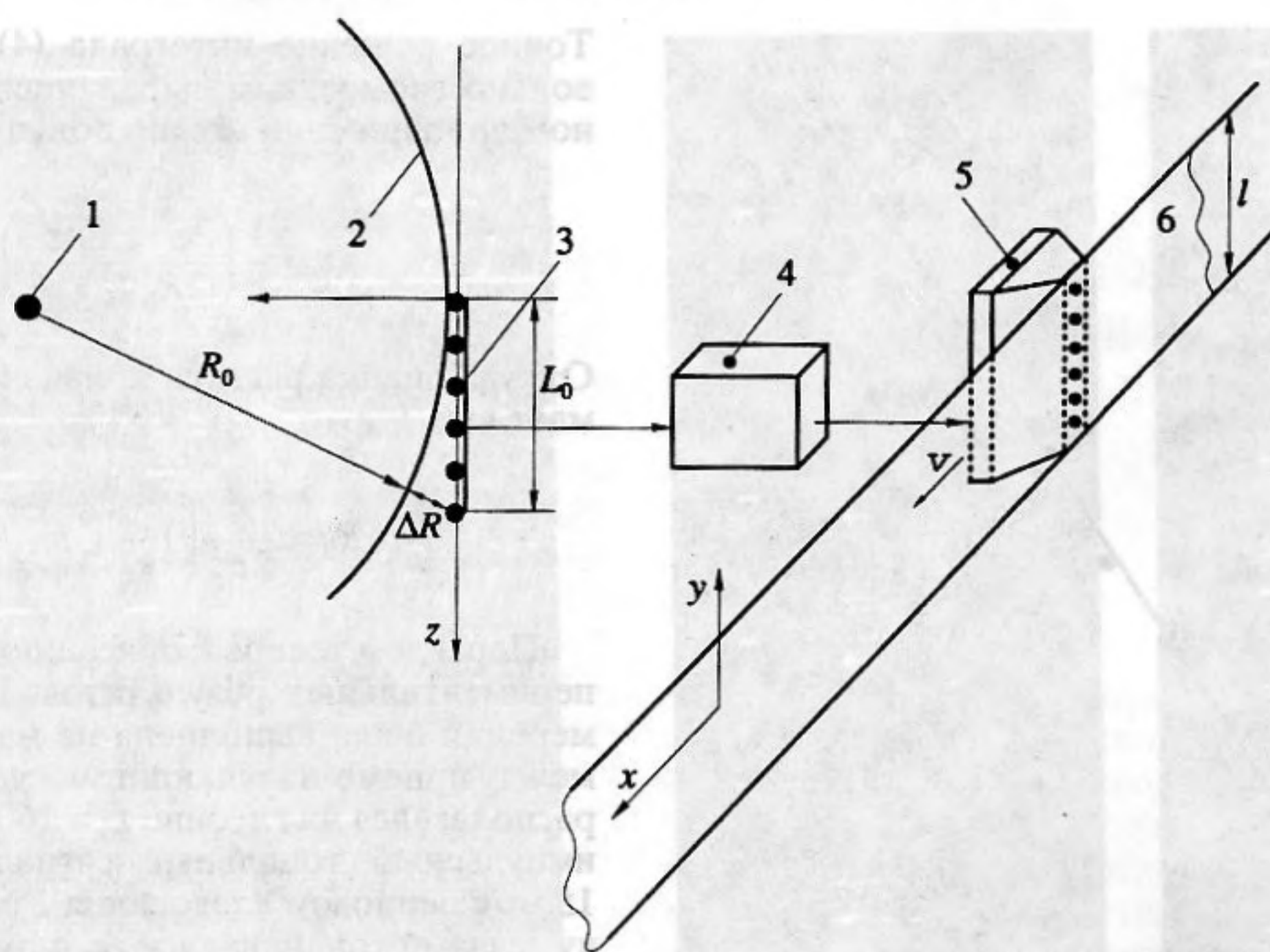


Рис. 2. Схема эксперимента при измерении волновых фронтов в ближней зоне. 1 – излучатель звука, 2 – фронт сферической волны, 3 – акустическая антенна, 4 – многоканальный усилитель, 5 – светодиодная матрица, 6 – движущаяся фотошленка.

ченные записи таким образом, чтобы в них совпадали начала приходов первых импульсных сигналов. Оказывается, что при некоторых условиях это можно сделать с точностью до долей λ . Синтезированная таким образом запись и будет описывать форму волнового фронта сигналов на всем вертикальном разрезе L . Для однородной среды, например, это будет запись, аналогичная рис. 1, но с вертикальным размером $L = nL_0$.

В открытом океане всегда существует возможный дрейф приемо-излучающих судов. Поэтому для того, чтобы предложенный способ апертурного синтеза был осуществим, необходимы дополнительные данные об изменении расстояния между судами, положении антенны в вертикальной плоскости, и ее глубине. Рассмотрим эти проблемы более подробно, на примере ближней зоны в однородном пространстве, когда фронт падающей волны является сферическим (рис. 2). Акустические сигналы, принятые k приемниками короткой антенны, после электрического преобразования, поступают на фоторегистратор, в котором осуществляется их плотностная запись на движущуюся со скоростью v фотошленку. В использованном типе фоторегистратора запись производится контактно с помощью многоканальной светодиодной матрицы, в которой число светодиодов равно числу приемных каналов k . Для того чтобы устранить амплитудные флуктуации, принятые сигналы до подачи на светодиодную матрицу подвергались глубокому двустороннему

ограничению, что обеспечивало высокий контраст оптического изображения.

Принятый в ближней зоне акустический сигнал на некоторой частоте ω можно представить в виде

$$S(z, t) = A \cos \left[\omega \left(\frac{\Delta R(z)}{c} - t \right) \right], \quad (1)$$

где c – скорость звука, а $\Delta R(z) = \sqrt{R_0^2 + z^2} - R_0$, R_0 – расстояние между точками “приема-излучения”, а глубина z отсчитывается от горизонта излучателя.

Пренебрегая дискретностью записи приемных каналов на фотошленке от отдельных светодиодов, ее коэффициент пропускания можно записать в виде:

$$T(x, y) = B + A \cos \left[\omega \left(\frac{\Delta R(my)}{c} - \frac{x}{v} \right) \right], \quad (2)$$

где A, B – const, $m = L_0/l$, l – размер светодиодной матрицы ось “ x ” – направлена вдоль фотошленки (временная координата $x = vt$), ось “ y ” – поперек фотошленки.

Из выражений (1) и (2) следует, что в ближней зоне (зоне Френеля) зарегистрированный исход-

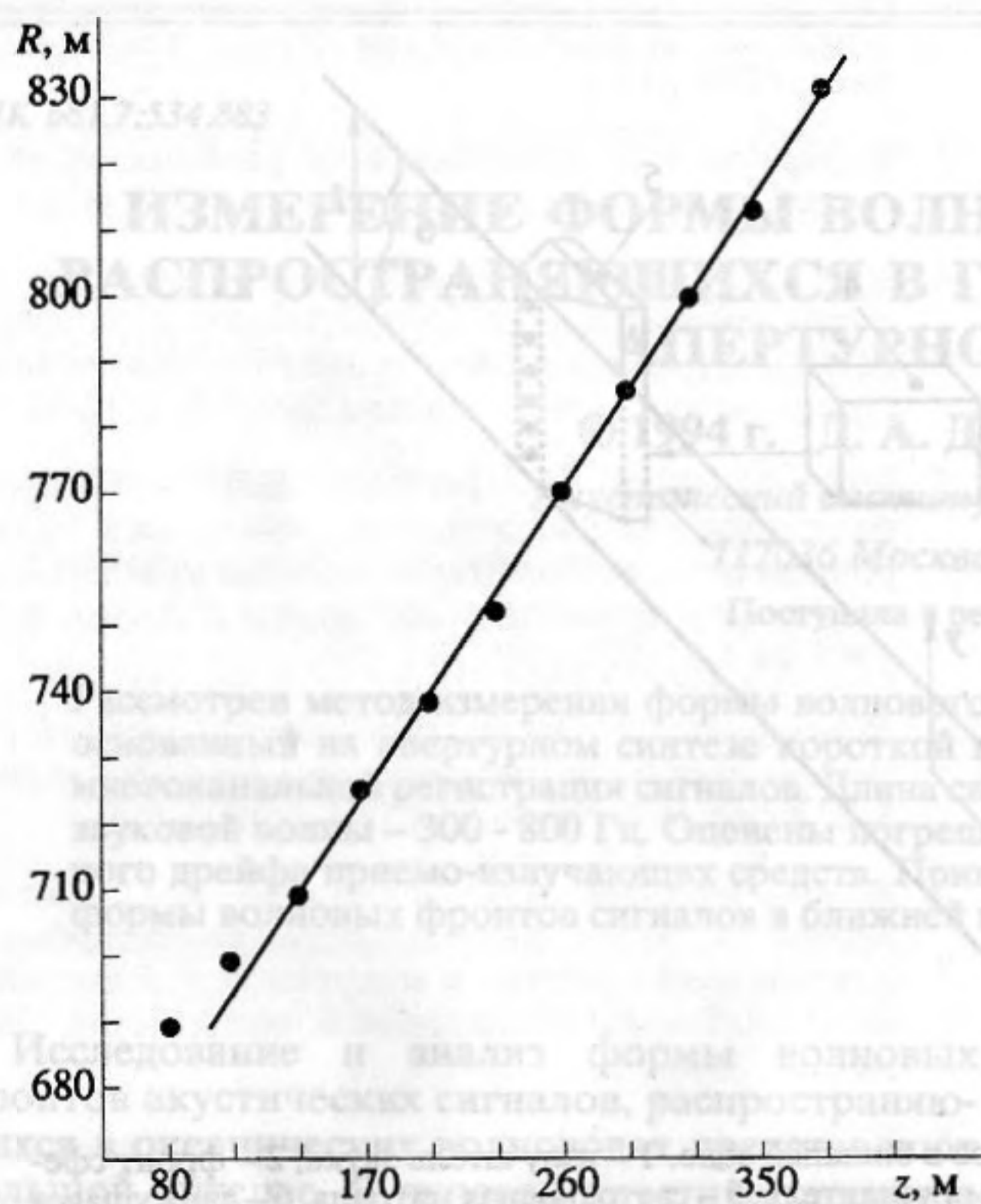


Рис. 3. График измерения взаимного расстояния между судами в процессе опускания антенны.

Точное решение интеграла (4) приводит к довольно громоздким выражениям. В параксиальном приближении можно получить, что

$$\tau = \frac{1}{c} \left(\frac{z^2}{2R_0} - \frac{pz^3}{3R_0^2} \right). \quad (5)$$

Откуда оценка радиуса кривизны фронта принимает вид

$$R_0 \approx \frac{z^2}{2c\tau} \left(1 - \frac{4}{3} p \frac{c\tau}{z} \right). \quad (6)$$

Перейдем теперь к описанию полученных экспериментальных результатов. Первая серия измерений была выполнена на малых расстояниях между приемо-излучающими судами. Излучатель располагался на глубине $z_n = 160$ м и генерировал импульсный тональный сигнал длительностью 15 мс с периодом следования 1 с. Дистанция между судами оценивалась с помощью штатных радиолокационных средств (РЛС). Измерения выполнялись в тихую погоду при волнении не выше 1 - 2 балла. Направления дрейфа судов были примерно одинаковы. Для апертурного синтеза использовалась штатная вертикальная антенна общей длиной 40 м с 42 приемными элементами. Фазовый центр антенны располагался на начальной глубине 80 м, а далее по команде оператора антенна опускалась на глубину до 500 м с шагом 30 м. На каждой глубине выполнялась многоканальная запись, а затем по рассмотренной методике строился общий разрез. Благодаря тому, что контраст записей был высоким и можно было использовать большое увеличение оптического изображения "стыковку" фрагментов можно было осуществить с точностью до долей периода сигнала на всех используемых частотах от 300 до 800 Гц.

На рис. 3 показан график изменения взаимного расстояния между судами, во время одного из опытов, из которого следует, что изменение расстояния можно аппроксимировать линейной зависимостью $R = R_0 + pz$. Для приведенного примера $p = 0.4$. В ряде опытов взаимное смещение судов за полное время опускания антенны было пренебрежимо мало.

На рис. 4 приведено изображение синтезированного волнового фронта. Первый волновой фронт (он расположен справа) соответствует прямой сферической волне от излучателя до антенны, а второй — описывает волну, отраженную от поверхности океана. Хорошо видны фронты узкополосных сигналов (помех), создаваемых различными механизмами приемного судна, распространяющихся вдоль антенны "сверху-вниз".

В таблице 1 приведены сводные данные измерений, подтверждающие возможности оценки

ный сферический фронт сигнала описывается гиперболой:

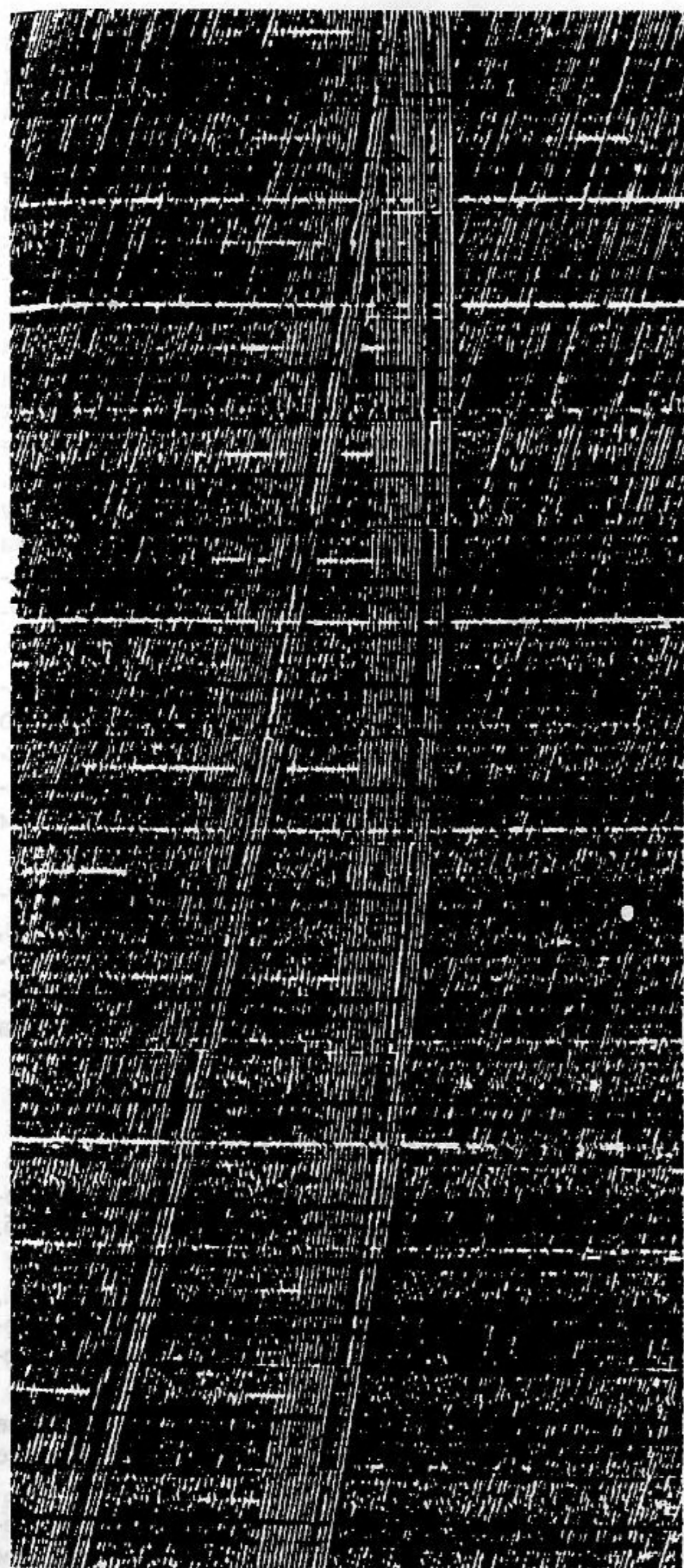
$$\left(R_0 + \frac{cx}{v} \right)^2 - m^2 y^2 = R_0^2.$$

Основание данной гиперболы соответствует лучу, распространяющемуся горизонтально. Измеряя задержку τ прихода фронта на приемник, находящийся на глубине z по сравнению с приемником, находящимся на горизонте излучателя (основание параболы), можно определить радиус кривизны фронта волны R_0 по выражению:

$$R_0 = \frac{z^2}{2c\tau} \left[1 - \left(\frac{\tau c}{z} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

В параксиальном приближении, когда $z/R_0 \ll 1$ и $\Delta R(z) \approx z^2/2R_0$, величина $R_0 \approx z^2/2c\tau$. Оценим теперь влияние дрейфа. Пусть расстояние между судами R изменяется линейно по мере опускания приемной антенны, т.е. $R = R_0 + pz$, где $p = v_{др}/v_0$, $v_{др}$ — скорость дрейфа, v_0 — скорость опускания антенны. Можно показать, что в этом случае задержка τ , измеренная методом апертурного синтеза, описывается выражением

$$\tau = \frac{1}{c} \int_0^z \frac{s ds}{\sqrt{(R_0 + ps)^2 + s^2}}. \quad (4)$$



← $t, \text{мс}$ 80 20

Рис. 4. Изображение волновых фронтов в ближней зоне, полученные методом апертурного синтеза.



← $t, \text{мс}$ 80 20 (a)



← $t, \text{мс}$ 80 20 (б)

Рис. 5. Характерные изображения синтезированных волновых фронтов, полученных в первой зоне конвергенции. а - $R_0 = 59.7 \text{ км}$, б - $R_0 = 61.8 \text{ км}$.

радиуса кривизны волнового фронта по предложенной методике.

Как следует из приведенных данных, расстояния между судами по данным РЛС во всех опытах оказались большими, чем оценки дистанции, измеренные по кривизне фронта, причем ошибка

имеет одинаковую величину (13 - 15)% и знак. Одной из причин подобной систематической погрешности может быть несовпадение центра отражения радиосигнала РЛС относительно центра расположения излучателя. РЛС сигнал в основном отражается от рубки, а центр опускания из-

Таблица 1

Номер опыта	1	2	3
Частота излучения, Гц	300	500	800
Расстояние между судами по данным РЛС, R_p , м	670	600	720
Оценка расстояния по кривизне фронта, R_0 , м	575	520	612
p	0.1	0	0.4
$\delta R = \left(\frac{R_p - R_0}{R_p} \right) 100\%$	14	13	15

лучателя смещен относительно нее на 20 - 25 м. Такая же погрешность характерна и для приемного судна. Поэтому суммарная систематическая погрешность может составлять около +50 м. Иными словами, полученные данные расстояний по РЛС нужно уменьшить на 50 м. В этом случае ошибки измерения дистанции составят не 15%, а меньше: не более 10%.

Вместе с тем, если внимательно посмотреть на рис. 4, то можно обнаружить, что длительность прямого сигнала примерно в два раза больше, чем исходная, т.е. даже на таких малых расстояниях имеется не один прямой сигнал, а по крайней мере два, хотя и почти с одинаковых направлений. Иными словами, наличие градиента скорости звука оказывает существенное влияние на структуру ближнего поля и, строго говоря, при этом фиксируется не одна сферическая волна. Полученный результат частично коррелирует с данными работы [2], в которой также наблюдались расхождения в численных и экспериментальных результатах на малых расстояниях.

Следующая серия измерений была проведена в 1-й зоне конвергенции, в районе Центральной Атлантики, с осью залегания подводного звукового канала на глубине ~1000 м. Судна располагались на начальном расстоянии друг от друга $R_0 = 59$ км и раздрейфовывали с относительной средней скоростью ~0.1 м/с. Излучатель располагался на постоянной глубине 200 м и генерировал тональные сигналы с длительностью 10 мс, периодом следования 5 с и частотой 700 Гц. Было выполнено 12 вертикальных разрезов на глуби-

нах от 100 до 520 м. На рис. 5а, 5б приведены характерные изображения измеренных волновых фронтов. Рис. 5а соответствует случаю, когда на синтезированную антенну приходят пять волновых фронтов, причем второй и четвертый фронты имеют кривизну разного знака. Вторым пришедшим на антенну фронт является сходящимся, и он образован лучами, еще не дошедшими до каустики, а четвертый фронт – расходящимся, т.е. он соответствует лучам, отраженным от каустики. Рис. 5б соответствует случаю, когда на антенну приходят три расходящихся волновых фронта. Радиус кривизны первого фронта $R_{кр} \approx 1.1$ км, а для второго и третьего – $R_{кр} \approx 1.8$ км. Видно, что соответствующий второму фронту импульс имеет длительность примерно в 2 раза большую, чем у излученного (“затягивание” сигнала наблюдается и для второго и третьего фронтов на рис. 5а).

Как следует из полученных экспериментальных данных, предложенная методика апертурного синтеза позволяет получать изображения и оценивать форму волновых фронтов сигналов на достаточно длинных вертикальных разрезах с учетом взаимного дрейфа приемно-излучающих судов.

Вместе с тем проблемы, связанные с действительной формой волнового фронта сигналов, распространяющихся в волноводах требуют отдельного специального рассмотрения с привлечением не только лучевых, но и волновых методов расчета полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комиссарова Н.Н. Об отклике антенны на звуковом поле вблизи каустики // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 6. С. 809 - 813.
2. Галкин О.П., Комиссарова Н.Н., Лютаревич Б.Л., Миронов М.А., Харченко Е.А. Исследование формы фронта звуковой волны в океане // Океаническая акустика. М.: Наука, 1993. С. 77 - 85.
3. Свет В.Д. Экспериментальное восстановление звукового поля точечного источника в волноводе // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 4. С. 733 - 739.
4. Дементьев Д.А., Свет В.Д., Федотов Д.А. Измерение параметров нормальных волн методом апертурного синтеза в океаническом волноводе // Акуст. журн. 1991. Т. 37. № 3. С. 463 - 468.

Deep-Sea Signal Wavefront Reconstruction by the Synthetic Aperture Technique

D. A. Dement'ev and V. D. Svet

A method for reconstructing wavefront profiles of signals propagating in the ocean is discussed. It is based on aperture synthesis with a short vertical-plane antenna and optical multichannel signal recording. Synthesized aperture length was 500 m, and sound wave frequencies were 300 - 800 Hz. Wavefront shape measurement errors are estimated with regard to possible drift of the transmitter-receiver system. Experimental data on signal wavefront shapes measured in the near and first convergence zones is presented.