

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ДВУХОСЕВОМ ПОДВОДНОМ ЗВУКОВОМ КАНАЛЕ

© 2000 г. О. П. Галкин, С. Д. Панкова

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника, 4

E-mail: bvp@akin.ru

Поступила в редакцию 24.07.99 г.

В гидрологических условиях двухосевого звукового канала исследовалась взаимная корреляция между акустическими сигналами, принятыми в точках, пространственно разнесенных (от 10 до 63 км) вдоль трассы распространения звука. Прием осуществлялся с помощью остронаправленной в вертикальной плоскости антенны. Ширина диаграммы направленности на средней частоте псевдошумового сигнала (1 кГц) равнялась  $\sim 2^\circ$ . Отмечается, что снижение корреляции при увеличении расстояния между точками приема происходит не столько из-за изменения спектра "водных" сигналов, обусловленных затуханием, сколько из-за влияния многолучевости при неполном разрешении сигналов по углу прихода.

Изучение пространственной корреляции гидроакустических сигналов в реальном океане имеет как теоретическое, так и практическое значение. Оценка влияния разнообразных океанологических факторов на величину взаимной корреляции широкополосных сигналов, принятых на различных расстояниях от источника звука, позволяет выявить причины изменения корреляции и, следовательно, внести необходимые уточнения в модели акустического волновода. В практическом плане указанные работы особенно важны при оценке возможности создания широкоапертурных антенн, а также при определении эффективности совместной обработки принимаемой гидроакустической информации от разнесенных в пространстве гидроакустических систем. В последнее время опубликован ряд работ [1–5], в которых частично затрагиваются и вопросы пространственной корреляции. Однако описываемые в них исследования проводились с использованием ненаправленных приемников звука и в большинстве случаев – при небольших удалениях от акустического источника (до нескольких километров). В работе [1] при изучении влияния на пространственную когерентность рассеяния на морской поверхности эксперименты проводились при разнесении точек приема вдоль трассы распространения сигналов до 15 длин звуковых волн (частоты  $\geq 20$  кГц) на дистанциях от 500 до 1000 м. В [2] при изучении зависимости пространственной когерентности от центральной частоты распространяющихся в мелководном районе ( $H = 15$  м) широкополосных акустических сигналов отмечена высокая когерентность для частот от 0.6 до 7 кГц. Однако максимальное разнесение приемников не превышало 2 м, а расстояние до источника – 214 м. В [3] рассмотрена за-

дача определения трассы движения непрерывного широкополосного акустического источника в океаническом волноводе при хорошем разрешении лучей в многолучевом сигнале и большой пространственной корреляции сигналов, принятых горизонтально разнесенными приемниками. Эксперименты проводились с надводным источником, проходившим на дистанции 2 км от 2-х приемников, разнесенных на 438 м. В [4] приведены результаты рассмотрения влияния внутренних волн в мелком море на пространственную (и временную) когерентность сигналов с частотой 400 Гц. Статья [5] посвящена изучению возможности применения вертикальной цепочки гидрофонов для локализации неоднородностей в мелководных районах с использованием пространственно-временной взаимокорреляционной функции.

Настоящая работа является продолжением исследований пространственной корреляции акустических сигналов, распространяющихся в сложных гидрологических условиях глубокого океана [6]. Эксперименты проводились по традиционной методике: научно-исследовательские суда расходились на заданную дистанцию и ложились в дрейф с опущенными излучающей и приемной системами. В качестве источника звука использовался ненаправленный излучатель непрерывного псевдошумового сигнала со средней частотой спектра 1 кГц и шириной полосы 1 октава. Прием осуществлялся 40-метровой вертикальной антенной с раствором диаграммы направленности  $\sim 2^\circ$  на средней частоте сигнала.

Эксперименты проводились в середине декабря 1991 года в Атлантическом океане, недалеко от Гибралтарского пролива. Геометрия опытов

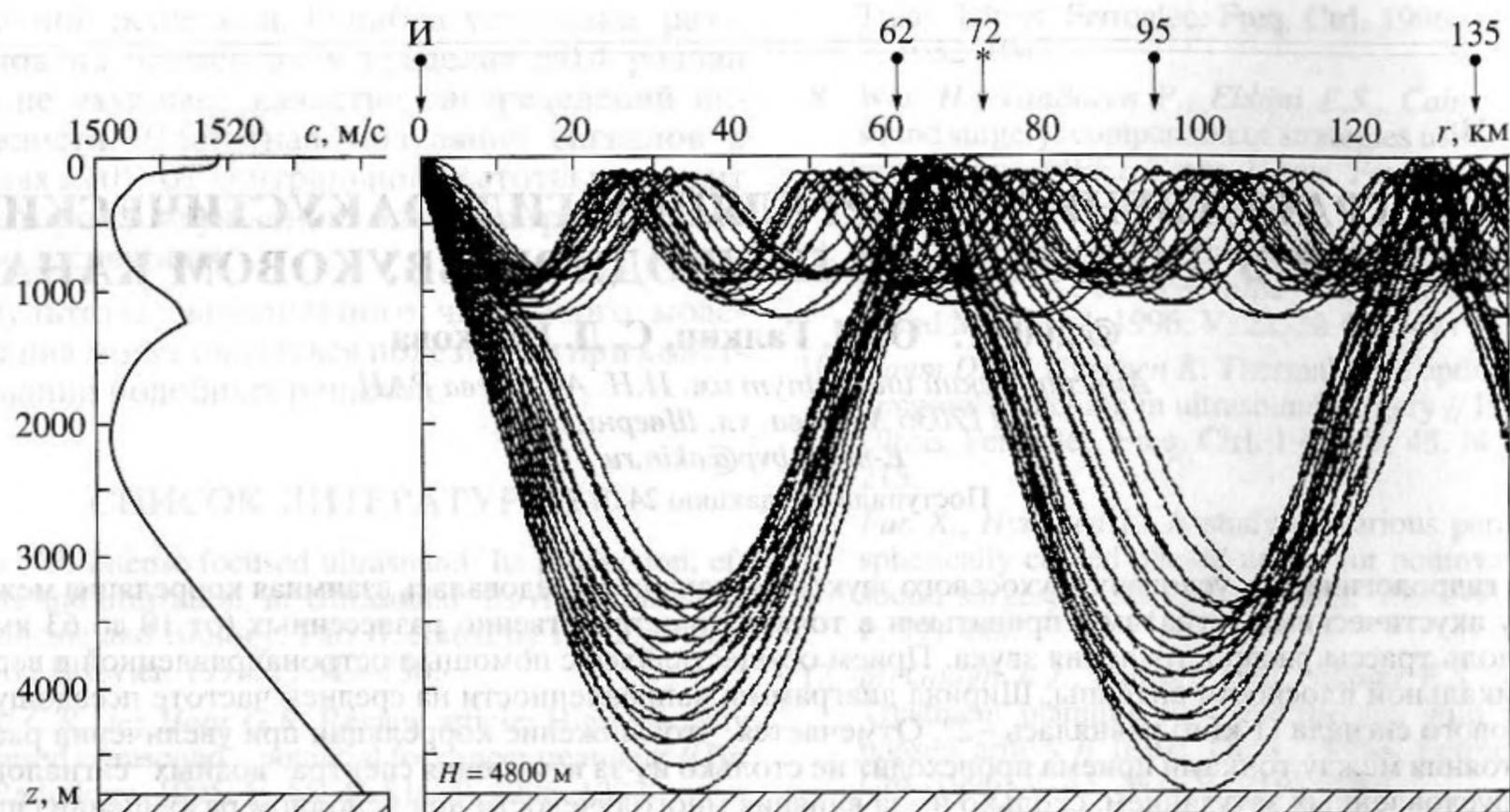


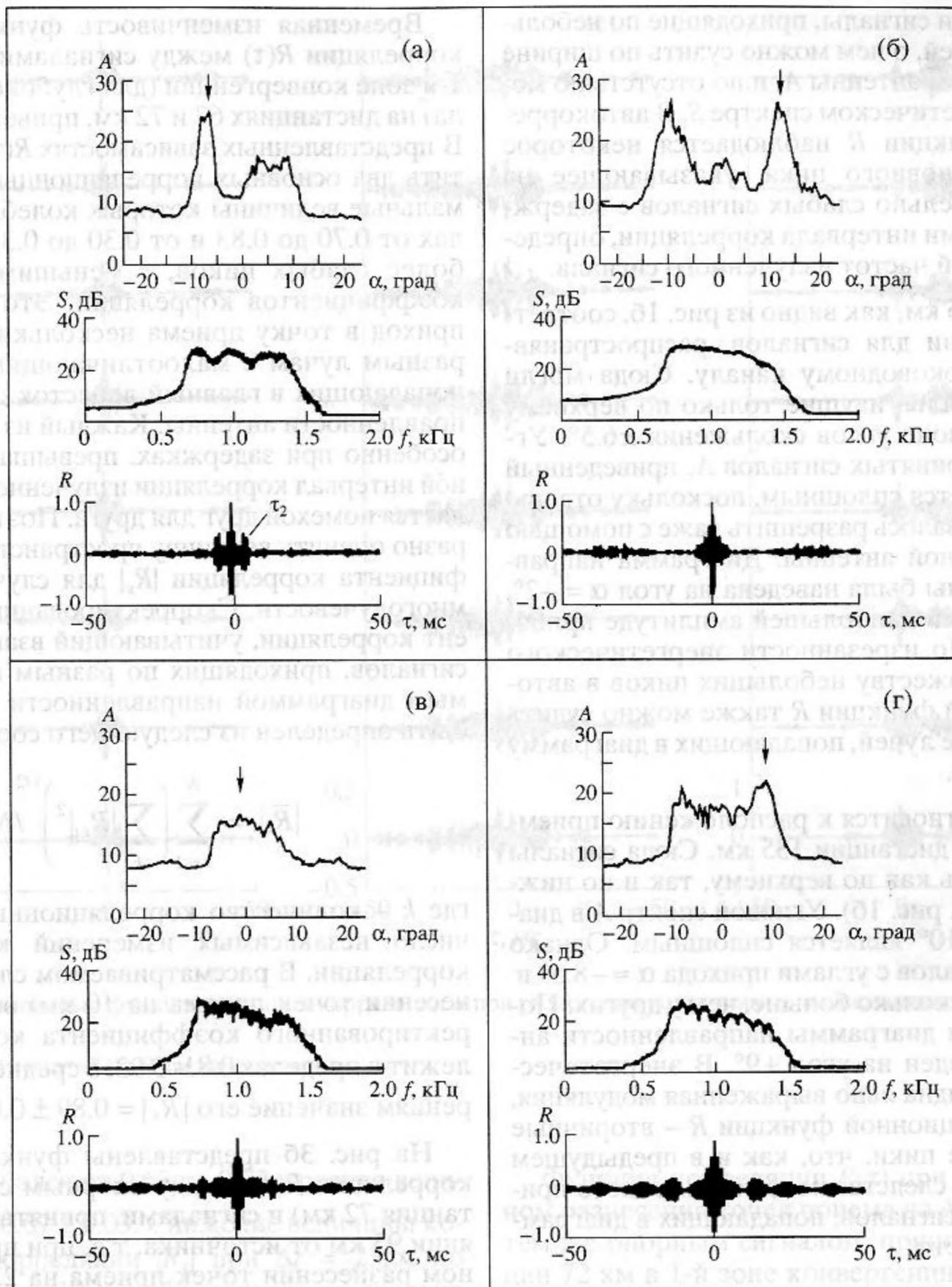
Рис. 1. Профиль скорости звука  $c(z)$  (слева) в районе эксперимента (Атлантический океан) и лучевая картина поля для глубины излучателя 150 м (справа).

такова: ненаправленный источник располагался на глубине 150 м, центр вертикальной антенны – на глубине 180 м, глубина места вдоль всей трассы была равна  $\sim 4800$  м. Пространственная корреляция измерялась между сигналом, принятым антенной на дистанции 72 км от источника звука, и сигналами, принимавшимися (в другое время) на дистанциях 62 км, 95 км и 135 км. Профиль скорости звука  $c(z)$  соответствовал двухосевому подводному звуковому каналу, одна из осей которого находилась на глубине  $\sim 450$  м ( $c_{\min 1} = 1503.2$  м/с), а другая – на глубине  $\sim 2000$  м ( $c_{\min 2} = 1502.9$  м/с). На рис. 1 для измеренного профиля  $c(z)$  (слева) и источника на глубине 150 м приведена лучевая картина поля (справа). Вверху стрелками указано расположение источника и точек приема при проведении корреляционных измерений. Из лучевой картины видно, что между источником и приемной антенной сигналы могли распространяться двумя путями: либо по лучам, идущим только в верхнем канале, либо по лучам, охватывающим всю толщину волновода. Таким образом на зональную структуру поля с большой длиной циклов лучей ( $\sim 60$ – $80$  км), обусловленную глубинным каналом, накладывается зональная структура поля с меньшей длиной циклов лучей ( $\sim 30$  км), формируемая верхним каналом. Для глубоководного канала первая зона конвергенции начинается на расстоянии  $\sim 60$  км и заканчивается на  $\sim 75$  км; начало второй зоны находится в  $\sim 125$  км от источника. Поэтому (если ориентироваться только на глубоководный канал) пространственная корреляция измерялась между сигналом, принятым в середине 1-й зоны конвергенции (опорный сигнал), и сигналами,

принимавшимися в начале 1-й зоны конвергенции (62 км), в зоне тени (95 км) и во 2-й зоне конвергенции (135 км). Разнесения точек приема по дистанции составили, соответственно,  $\Delta r = 10$  км, 23 км и 63 км. Естественно, что во все указанные точки приема приходили сигналы, распространяющиеся и по верхнему каналу.

Рассмотрим результаты измерений, представленные на рис. 2. На всех рисунках вверху приведены угловые спектры (отклик антенны в зависимости от вертикального угла прихода сигналов), полученные при сканировании диаграммой направленности антенны в диапазоне углов прихода  $\pm 23^\circ$ . В центре показаны частотно-энергетические спектры сигнала, принятого с направления, отмеченного на верхнем графике стрелкой, а внизу – автокорреляционные функции, полученные в режиме наведения антенны на выбранный угол. По оси ординат в угловых спектрах отложены амплитуды принимаемых сигналов  $A$  (в линейном масштабе) в зависимости от углов скольжения  $\alpha$  (в градусах); в энергетических – спектральная плотность  $S$  в дБ в зависимости от частоты  $f$  (в килогерцах); в корреляционных функциях – коэффициент автокорреляции  $R$  в зависимости от задержки  $\tau$  (в миллисекундах). Приведенные угловые и энергетические спектры усреднены за 12 с, автокорреляционные функции вычислялись при усреднении 1.024 с.

Рисунок 2а характеризует распространявшийся без отражений от границ волновода опорный сигнал, принятый на дистанции 72 км. Угол прихода его равен  $\alpha = -6^\circ$  (см.  $A(\alpha)$ ). Знак “–” означает приход лучей в точку приема снизу, знак “+” –



**Рис. 2.** Угловые  $A$  (вверху), частотно-энергетические  $S$  (в центре) спектры и автокорреляционные функции  $R$  (внизу) сигналов в точках приема:

- а – в середине I-й зоны конвергенции, обусловленной нижним каналом (дистанция 72 км);
- б – в начале I-й зоны конвергенции (дистанция 62 км);
- в – в зоне тени (дистанция 95 км);
- г – в II-й зоне конвергенции (дистанция 135 км).

сверху. Этот сигнал был выбран в качестве опорного, как сигнал наибольшей интенсивности, отчетливо разрешаемый в вертикальной плоскости диаграммой направленности антенны. Однако в его энергетическом спектре  $S$  наблюдается модуляция с частотой  $f_m \approx 250$  Гц, обусловленная тем, что сигнал приходил в точку приема по двум лучам с разностью времен  $\tau = 1/f_m \approx 4$  мс, что соот-

ветствует положению на оси задержек  $\tau$  второго пика (отмечен стрелкой) в его автокорреляционной функции  $R$ .

На рис. 2б приведены характеристики сигнала, принятого в начале 1-й зоны конвергенции (для глубоководного канала) на дистанции 62 км. Максимум диаграммы направленности антенны был наведен на угол  $\alpha = +12^\circ$ . В данном случае в диа-

грамму попадали сигналы, приходящие по небольшому числу лучей, о чем можно судить по ширине углового отклика антенны  $A$ , и по отсутствию модуляции в энергетическом спектре  $S$ . В автокорреляционной функции  $R$  наблюдается некоторое расширение основного пика, указывающее на приход относительно слабых сигналов с задержками  $\tau$ , меньшими интервала корреляции, определяемого полосой частот излученного сигнала.

Дистанция 95 км, как видно из рис. 1б, соответствует зоне тени для сигналов, распространявшихся по глубоководному каналу. Сюда могли приходить сигналы, идущие только по верхнему каналу в диапазоне углов скольжения  $\pm 6.5^\circ$ . Угловой спектр принятых сигналов  $A$ , приведенный на рис. 2в, является сплошным, поскольку отдельные лучи не удавалось разрешить даже с помощью остронаправленной антенны. Диаграмма направленности антенны была наведена на угол  $\alpha = -2^\circ$ , соответствующий наибольшей амплитуде принятого сигнала. По изрезанности энергетического спектра  $S$  и множеству небольших пиков в автокорреляционной функции  $R$  также можно судить о большом числе лучей, попадающих в диаграмму направленности.

Рисунок 2г относится к расположению приемной антенны на дистанции 135 км. Сюда сигналы могли приходить как по верхнему, так и по нижнему каналу (см. рис. 1б). Угловой спектр  $A$  в диапазоне углов  $\pm 10^\circ$  является сплошным. Однако амплитуды сигналов с углами прихода  $\alpha \approx -8.5^\circ$  и  $\alpha \approx +9^\circ$  были несколько больше, чем у других. Поэтому максимум диаграммы направленности антенны был наведен на угол  $+9^\circ$ . В энергетическом спектре  $S$  видна явно выраженная модуляция, а в автокорреляционной функции  $R$  – вторичные корреляционные пики, что, как и в предыдущем случае, является следствием одновременного приема нескольких сигналов, попадающих в диаграмму направленности.

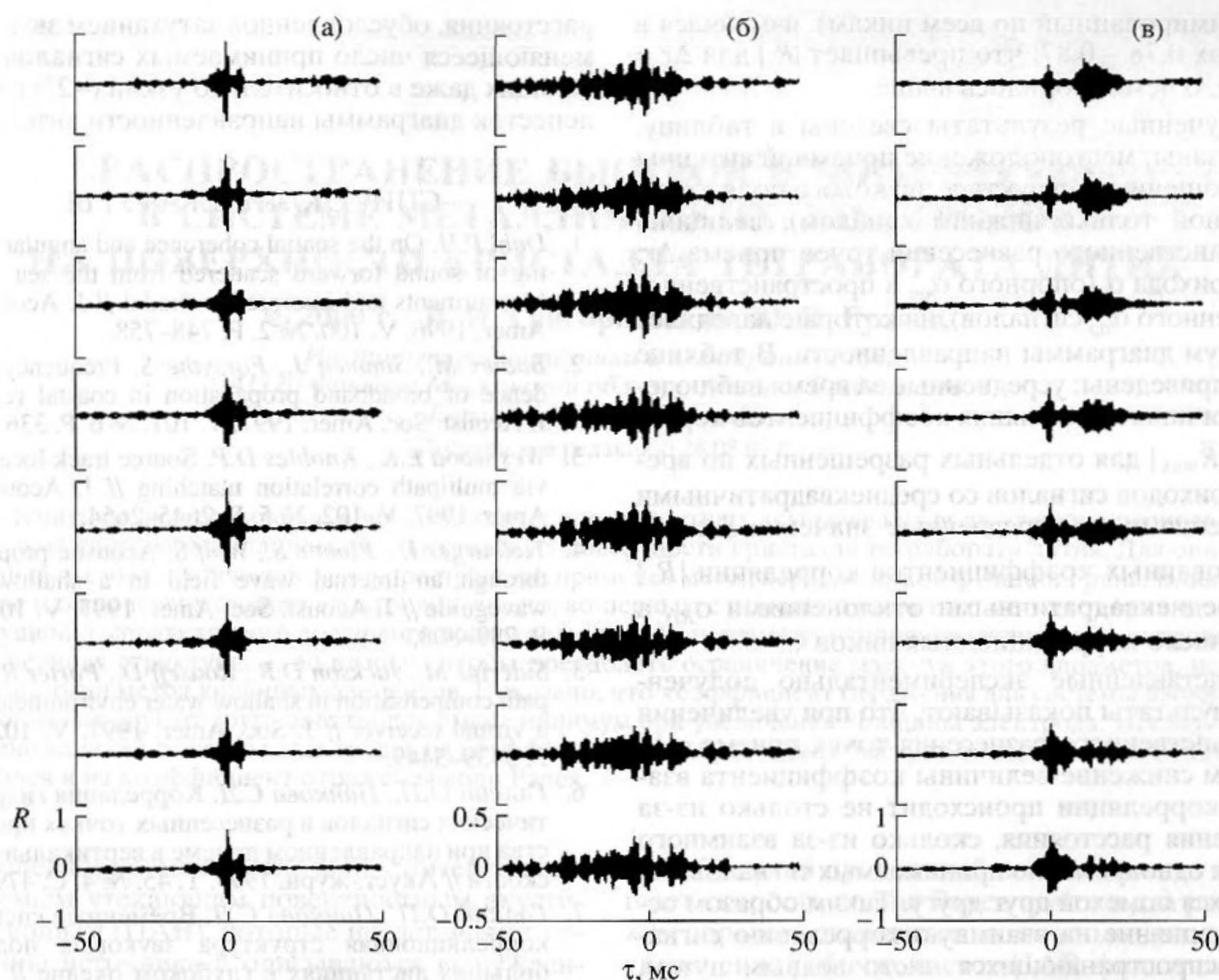
Проанализировав характеристики звуковых полей, зарегистрированных на выбранных дистанциях, перейдем к рассмотрению основного вопроса – взаимной корреляции принятых сигналов. Результаты измерений пространственной корреляции  $R(\tau)$  представлены на рис. 3. На нем показаны изменения нормированных взаимокорреляционных функций  $R$  в течение 3 мин при времени усреднения каждой реализации 1.024 с с интервалом между реализациями 25.5 с, равным периоду псевдошумового сигнала. Методика измерений подробно описана в [6]. Поскольку сигналы, между которыми вычислялись функции  $R(\tau)$ , были приняты в разных точках пространства и в разное время, то шкала задержек  $\tau$  на рисунке является условной. Нулевая задержка соответствует одному из корреляционных пиков, в большинстве случаев максимальному.

Временная изменчивость функции взаимной корреляции  $R(\tau)$  между сигналами, принятыми в 1-й зоне конвергенции (для глубоководного канала) на дистанциях 62 и 72 км, приведена на рис. 3а. В представленных зависимостях  $R(\tau)$  можно отметить два основных корреляционных пика, максимальные величины которых колеблются в пределах от 0.70 до 0.83 и от 0.30 до 0.36, и несколько более слабых пиков, с меньшими значениями коэффициентов корреляции. Это указывает на приход в точку приема нескольких сигналов по разным лучам с малоотличающимися углами и попадающих в главный лепесток диаграммы направленности антенны. Каждый из этих сигналов, особенно при задержках, превышающих временной интервал корреляции излученного сигнала, является помехой друг для друга. Поэтому целесообразно оценить величину пространственного коэффициента корреляции  $|R_s|$  для случая отсутствия многолучевости. Скорректированный коэффициент корреляции, учитывающий взаимное влияние сигналов, приходящих по разным и неразрешаемым диаграммой направленности лучам, может быть определен из следующего соотношения [7]:

$$|\bar{R}_s| = \sum_{i=1}^N \left( \sum_k |R_{ki}|^2 \right)^{1/2} / N,$$

где  $k$  – количество корреляционных пиков,  $N$  – число независимых измерений коэффициента корреляции. В рассматриваемом случае (при разнесении точек приема на 10 км) величина скорректированного коэффициента корреляции  $|R_s|$  лежит в пределах 0.81–0.93, а среднее по 8-и измерениям значение его  $|\bar{R}_s| = 0.89 \pm 0.05$ .

На рис. 3б представлены функции взаимной корреляции  $R(\tau)$  между опорным сигналом (дистанция 72 км) и сигналами, принятыми на расстоянии 95 км от источника, т.е. при пространственном разнесении точек приема на 23 км. На этой дистанции угловой спектр поля в диапазоне  $\pm 6.5^\circ$  (см. рис. 2в) был полностью “засвечен” сигналами, приходящими по лучам, которые не разрешались диаграммой направленности антенны. Все это привело к тому, что при выбранном угле  $\alpha = -2^\circ$  в функциях  $R(\tau)$ , приведенных на рис. 3б, появилось большое число (~12) корреляционных пиков с небольшими коэффициентами корреляции. По этой причине масштаб по оси ординат на рис. 3б увеличен вдвое. Из-за большого числа сигналов, попадающих в главный лепесток диаграммы направленности, и из-за временной изменчивости их амплитуд величины коэффициентов корреляции  $R_{ki}$  для отдельных пиков изменялись в пределах от 0.09 до 0.14 (у пиков с минимальными значениями коэффициента корреляции) и от 0.23 до 0.39 (для пиков с максимальными значениями). Скорректированный коэффициент пространственной корреляции



**Рис. 3.** Нормированные функции взаимной корреляции  $R$  при разнесении точек приема по дистанции на:  
 а –  $\Delta r = 10$  км;  
 б –  $\Delta r = 23$  км (масштаб по  $R$  увеличен вдвое);  
 в –  $\Delta r = 63$  км.

ляции  $|R_s|$  колебался от 0.63 до 0.72, средняя величина его  $|\bar{R}_s| = 0.67 \pm 0.03$ . Снижение величины коэффициента корреляции  $|R_s|$  при  $\Delta r = 23$  км по сравнению с  $\Delta r = 10$  км объясняется не столько увеличением разнесения точек приема в пространстве, сколько неполным учетом взаимного влияния большого числа сигналов, одновременно попадающих в диаграмму направленности приемной антенны. На это, в частности, указывают результаты, полученные при большем разнесении точек приема ( $\Delta r = 63$  км), но при меньшем числе лучей.

Функции корреляции  $R(\tau)$  при пространственном разнесении точек приема на  $\Delta r = 63$  км между тем же опорным сигналом, принятым на дистанции 72 км в 1-й зоне конвергенции (для глубоководного канала), и сигналами с углами прихода  $\alpha \approx +9^\circ$  (см. рис. 2г), зафиксированными во 2-й зоне конвергенции на дистанции 135 км, изображены на рис. 3в. В них можно наблюдать примерно 9 корреляционных пиков  $|R_{ki}|$ , величина минимального из которых колеблется от 0.07 до 0.13, а максимального – от 0.36 до 0.64. Скорректированный для каждой реализации коэффициент корреляции  $|R_s|$

**Таблица**

Местоположение приемной антенны	$\Delta r$ км	$\alpha_{оп}/\alpha_{пр}$	$ \bar{R}_{max} $	$\sigma_R$	$k$	$ \bar{R}_s $	$\sigma_{R_s}$
Внутри 1-й зоны конвергенции	10	$-6^\circ/+13^\circ$	0.77	0.05	3	0.89	0.05
1-я зона – зона тени	23	$-6^\circ/-2^\circ$	0.31	0.06	12	0.67	0.03
1-я зона – 2-я зона	63	$-6/+9^\circ$	0.54	0.10	9	0.84	0.03

(просуммированный по всем пикам), изменялся в пределах 0.78 – 0.87, что превышает  $|R_s|$  для  $\Delta r = 23$  км, о чем говорилось выше.

Полученные результаты сведены в таблицу, где указаны: местоположение приемной антенны (по отношению к структуре звукового поля, обусловленной только нижним каналом); величина пространственного разнесения точек приема  $\Delta r$ ; углы прихода  $\alpha$  (опорного  $\alpha_{оп}$  и пространственно-разнесенного  $\alpha_{пр}$  сигналов), на которые наводился максимум диаграммы направленности. В таблице также приведены: усредненные за время наблюдения величины наибольших коэффициентов корреляции  $|\bar{R}_{max}|$  для отдельных разрешенных по времени приходов сигналов со среднеквадратичными отклонениями  $\sigma_R$ ; усредненные значения  $S$  скорректированных коэффициентов корреляции  $|\bar{R}_s|$  с их среднеквадратичными отклонениями  $\sigma_{R_s}$ , а также число корреляционных пиков  $k$ .

Представленные экспериментально полученные результаты показывают, что при увеличении пространственного разнесения точек приема с 10 до 63 км снижение величины коэффициента взаимной корреляции происходит не столько из-за увеличения расстояния, сколько из-за взаимного влияния одновременно принимаемых сигналов, являющихся помехой друг другу. Таким образом основное влияние на взаимную корреляцию сигналов, распространяющихся чисто водным путем, оказывает не изменение спектра при увеличении

расстояния, обусловленное затуханием звука, а изменяющееся число принимаемых сигналов, попадающих даже в относительно узкий ( $\sim 2^\circ$ ) главный лепесток диаграммы направленности антенны.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dahl P.H.* On the spatial coherence and angular spreading of sound forward scattered from the sea surface: Measurements and interpretive model // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1996. V. 100. № 2. P. 748–758.
2. *Badiey M., Simmen J., Forsythe S.* Frequency dependence of broadband propagation in coastal regions // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1997. V. 101. № 6. P. 3361–3370.
3. *Westwood E.K., Knobles D.P.* Source track localization via multipath correlation matching // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1997. V. 102. № 5. P. 2645–2654.
4. *Tielburger D., Finette S., Wolf S.* Acoustic propagation through an internal wave field in a shallow water waveguide // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1997. V. 101. № 2. P. 789–808.
5. *Siderius M., Jackson D.R., Rouseff D., Porter R.* Multipath compensation in shallow water environments using a virtual receiver // *J. Soc. Amer.* 1997. V. 102. № 6. P. 3439–3449.
6. *Галкин О.П., Панкова С.Д.* Корреляция гидроакустических сигналов в разнесенных точках пространства при направленном приеме в вертикальной плоскости // *Акуст. журн.* 1999. Т. 45. № 4. С. 479–486.
7. *Галкин О.П., Панкова С.Д.* Временные спектры и корреляционная структура звуковых полей на больших дистанциях в глубоком океане // *Акуст. журн.* 1998. Т. 44. № 1. С. 57–63.

## Spatial Correlation of Hydroacoustic Signals in a Biaxial Underwater Sound Channel

O. P. Galkin and S. D. Pankova

In the hydrological conditions of a biaxial sound channel, the cross-correlation between acoustic signals received at points spatially separated (from 10 to 63 km) along the sound propagation track is investigated. The signals are received by a narrow-beam array scanning in the vertical plane. The beam width is  $\sim 2^\circ$  at the mean frequency (1 kHz) of a pseudo-noise signal. It is noted that, as the distance between the points of reception increases, the correlation decreases, which is mainly caused by the effect of the multipath propagation with an incomplete resolution of signals in arrival angles, rather than by changes in the “water” signal spectrum due to the attenuation.