АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2008, том 54, № 3, с. 390–399

АКУСТИКА ОКЕАНА, ГИДРОАКУСТИКА

УДК 534.23

КОРРЕЛЯЦИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ НЕНАПРАВЛЕННОМ И НАПРАВЛЕННОМ ПРИЕМЕ

© 2008 г. О. П. Галкин, С. Д. Панкова

Акустический институт им. Н.Н. Андреева
117036 Москва, ул. Шверника 4
E-mail: galkin@akin.ru

Поступила в редакцию 16.12.05 г.

Проводится сравнение данных, полученных при измерении пространственной корреляции между акустическими сигналами, принятыми одновременно как ненаправленными гидрофонами, так и направленной в вертикальной плоскости антенной. Пространственная корреляция измерялась между сигналами, зарегистрированными на различных дистанциях в глубоком океане. Разнесение точек приема, расположенных вдоль трассы распространения звука в двух зонах конвергенции, составляло примерно 64 км. Излучаемые псевдошумовые сигналы в диапазоне частот (0.8–2.0) кГц принимались вертикальной антенной с шириной главного максимума диаграммы направленности, равной ~2°. Одновременно регистрировались многолучевые сигналы, принятые ее центральным гидрофоном. Сигналы в 1-ой, а затем во 2-ой зонах конвергенции, принимались в разное время. Несмотря на это, коэффициенты пространственной корреляции между такими сигналами при направленном в вертикальной плоскости приеме, даже при неполном разрешении сигналов по углу прихода, достигали 0.64–0.74. В то же время при ненаправленном приеме коэффициенты взаимной пространственной корреляции не превышали 0.32.

PACS 43.30.Cq, 43.30.Re

Исследования пространственной и временнóй корреляции звуковых полей в океане представляют интерес как для развития физических моделей распространения звука в волноводах, так и для разработки новых методов обработки гидроакустических сигналов. В последние годы экспериментальному измерению корреляционных характеристик сигналов уделяется большое внимание. Так в работах [1–4], кроме результатов изучения амплитудных и фазовых флуктуаций в северной части Тихого океана, приводятся данные по измерению (пространственной и временной) когерентности низкочастотных сигналов, принятых разнесенными гидрофонами на дистанциях от ~2000 до ~5000 км. Изучались характеристики звуковых полей, создаваемых ненаправленными источниками в различных частотных полосах со средними частотами 28 Гц, 75Гц и 84 Гц на трассах между Гавайскими островами и побережьем Калифорнии. Сигналы принимались стационарными системами, представляющими собой вертикальные или горизонтальные цепочки гидрофонов.

В частности, в работе [2] обсуждаются материалы эксперимента по измерению поперечной пространственной корреляции. Источник, расположенный на глубине 810 м вблизи оси подводного звукового канала, излучал частотно-модулированный сигнал в полосе ~33 Гц со средней частотой 75 Гц. Многолучевые сигналы принимались двумя расположенными у дна горизонтальными линейными цепочками гидрофонов. После специальной обработки отдельные приходы сигналов выделялись на фоне шумов, что позволило измерить взаимную корреляцию между сигналами, принятыми одиночными гидрофонами. Интервал пространственной корреляции составил ~400–500 м.

В работе [3] проанализировано распространение низкочастотных широкополосных сигналов с центральными частотами 28, 75 и 84 Гц, принятых 700-метровыми и 1400-метровыми вертикальными цепочками приемников. Основное внимание уделено "финальной" энергетически сильной части приходящего сигнала, где существует многолучевая интерференция. Проведен анализ изменчивости фазы и интенсивности сигналов, а также функции когерентности по глубине и по времени.

В эксперименте, описанном в работе [4], измерялась взаимная корреляция между расположенными на одной глубине ненаправленными гидрофонами разнесенных в пространстве вертикальных цепочек. Для сигналов со средней частотой 75 Гц и полосой 30 Гц получено, что величина корреляции, усредненной по глубине для разных пар гидрофонов, спадает до 0.3–0.5 при разнесении приемников на 500 м, а при разнесении от 1 км до 3.5 км она равна 0.1.

Одним из положительных свойств направленного приема является улучшение отношения сигнал/помеха, что, в частности, рассмотрено в работе [5]. При этом не последнюю роль играет возможность выделения отдельных компонент многолучевого сигнала с помощью пространственно развитых антенн.

В ранее проведенных работах авторов [6, 7] рассматривалась пространственная (вдоль трассы распространения) корреляция сигналов килогерцового диапазона при полном или частичном разрешении их по углу прихода вертикальными антеннами. В первой из них, в частности, приведены результаты экспериментов в Филиппинском районе Тихого океана. Сигналы принимались одной и той же антенной последовательно в 1-ой, 2-ой и 3-ей зонах конвергенции. При разнесении точек приема на 60 км полученные коэффициенты корреляции составляли 0.74–0.93, а при разнесении на 120 км – 0.52–0.59. В работе [7] прием сигналов осуществлялся (также последовательно) на дистанциях 62 км, 72 км, 95 км и 135 км вблизи Гибралтарского пролива в Атлантическом океане в условиях двухосевого звукового канала. Полного разрешения сигналов по углу прихода в этих опытах получить не удалось. Несмотря на это, коэффициенты корреляции между сигналами, принятыми внутри 1-ой зоны конвергенции (разнесение точек приема $\Delta r = 10$ км), достигали 0.70–0.83, а между принятыми в 1-ой и 2-ой зонами конвергенции ($\Delta r = 63$ км) – 0.36–0.64. Детальное рассмотрение структуры звукового поля (углов прихода сигналов, энергетических спектров и функций автокорреляции в точках приема) показало, что одной из причин раскорреляции является неполное разрешение сигналов антенной по углу прихода.

Одной из задач экспериментов, результаты которых приведены ниже, являлось сравнение данных корреляционной обработки сигналов, одновременно принимавшихся ненаправленным гидрофоном и направленной в вертикальной плоскости антенной. В предыдущих же работах [6, 7] рассматривалась корреляция сигналов, принятых с помощью направленных систем в разное время и на различных дистанциях. Поэтому на величину раскорреляции могли влиять и флуктуации среды, и различные шумовые помехи. В данной же работе влияние изменений среды для сигналов при одновременном направленном и ненаправленном приеме будет одинаковым. Это позволяет оценить влияние именно многолучевости на раскорреляцию принятых сигналов.

Сначала рассмотрим материалы эксперимента, проведенного в юго-западной части Тихого океана в районе Филиппинских островов (некоторые результаты этого опыта были представлены в работе [6]). Непрерывный псевдошумовой сигнал, излучаемый ненаправленным источником с одного дрейфующего судна, принимался вертикальной антенной на другом дрейфующем судне, которое находилось последовательно в 1-ой, а затем во 2-ой зоне конвергенции. Прием сигналов в зонах с повышенной интенсивностью обеспечивал наилучшее отношение сигнал/помеха. Глубина океана в районе проведения эксперимента была ~5800 м. Источник и центральный приемник антенны располагались на глубине 250 м. Излучаемый сигнал генерировался сдвиговым регистром, построенным по методу последовательностей максимальной длины (m-последовательностей), и имел равномерный частотный спектр от 100 Гц до 5 кГц. Использование кварцевой тактовой частоты регистра позволяло воспроизводить псевдошумовой сигнал (период повторения 25.5 с) с большой точностью. Именно благодаря точной воспроизводимости излучаемого псевдошума, оказалось возможным измерение взаимной корреляции между сигналами, принятыми в разное время в двух точках пространства. Перед излучением псевдошумовой сигнал фильтровался в полосе частот от 0.8 до 2.0 кГц.

Приемная 40-метровая вертикальная шланговая антенна (диаметром 5 см) состояла из неэквидистантно расположенных вдоль нее 296 гидрофонов. Ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны на частоте 1 кГц составляла ~2°. Отметим, что во всем диапазоне частот она, благодаря неэквидистантности, оставалась практически неизменной. Одновременно сформированные три диаграммы направленности могли использоваться как в режиме секторного обзора, так и в режиме наведения на выбранный угол прихода интересующего сигнала. Просмотр угловой структуры поля в точках приема осуществлялся путем сканирования главным лепестком диаграммы направленности в диапазоне углов ±23° относительно горизонтали ("+" означает приход сигнала сверху, "–" – снизу). В режиме наведения максимум диаграммы направленности мог наводиться на любой угол в указанном диапазоне. Сигналы, принятые в режиме наведения, записывались на специальном многоканальном магнитофоне. Одновременно на нем же проводилась запись сигналов, принятых ненаправленным одиночным гидрофоном, расположенным в центре антенны. Регистрация принятых сигналов проводилась в 1-ой зоне конвергенции на дистанции $r = 57.3$ км и через 1.5 часа – на дистанции $r = 58.0$ км от источника звука. Примерно через сутки была проведена запись сигналов во 2-ой зоне конвергенции на дистанции $r = 121.3$ км.

Район проведения эксперимента считается достаточно стабильным по гидрологическим условиям. На рис. 1 представлены зависимости скорости звука от глубины $c(z)$, измеренные в точках приема, удаленных друг от друга на ~60 км. Они

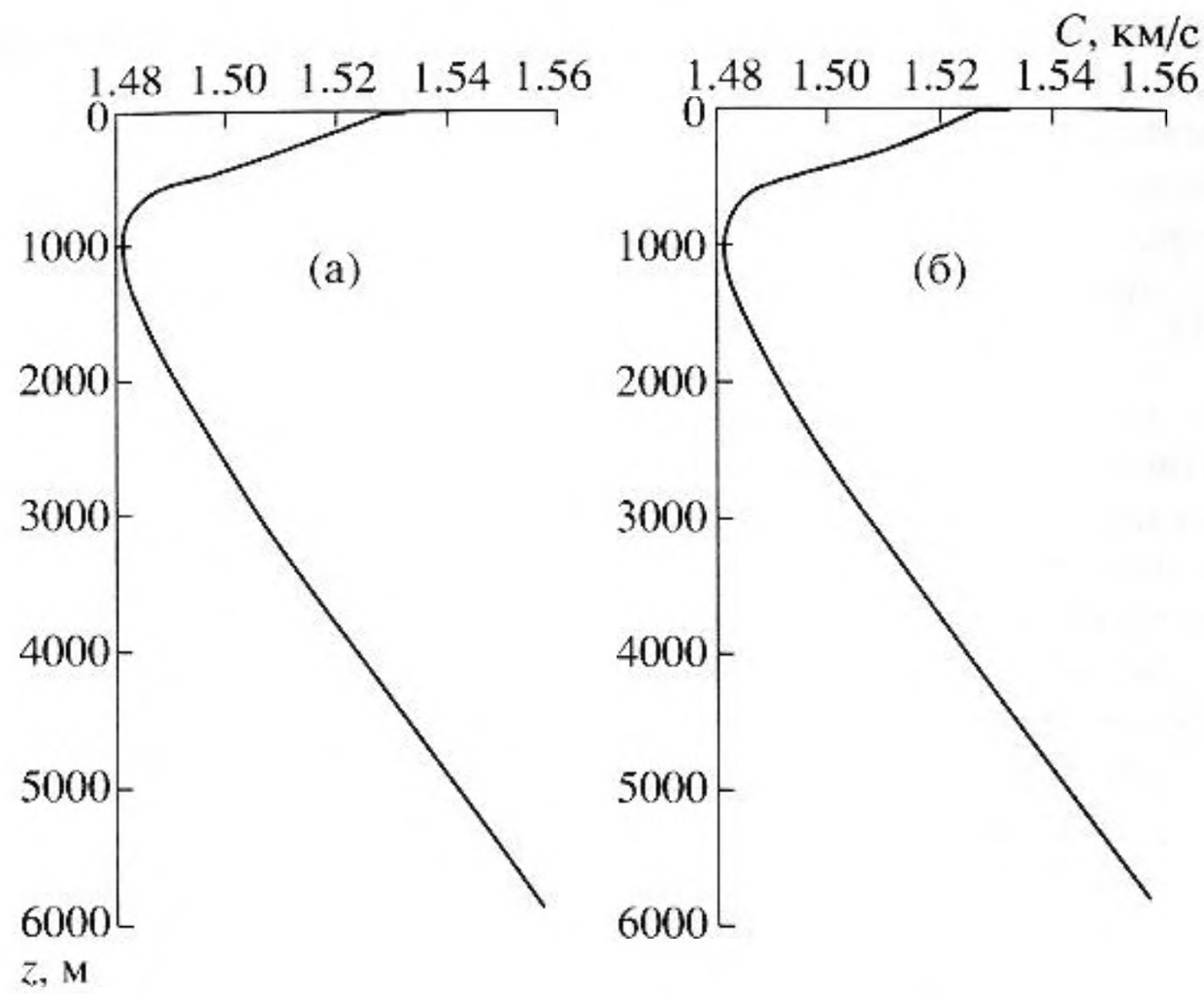

Рис. 1. Профили скорости звука c(z) в точках приема сигналов в Филиппинском море: а – в 1-ой зоне конвергенции, б – во 2-ой зоне конвергенции.

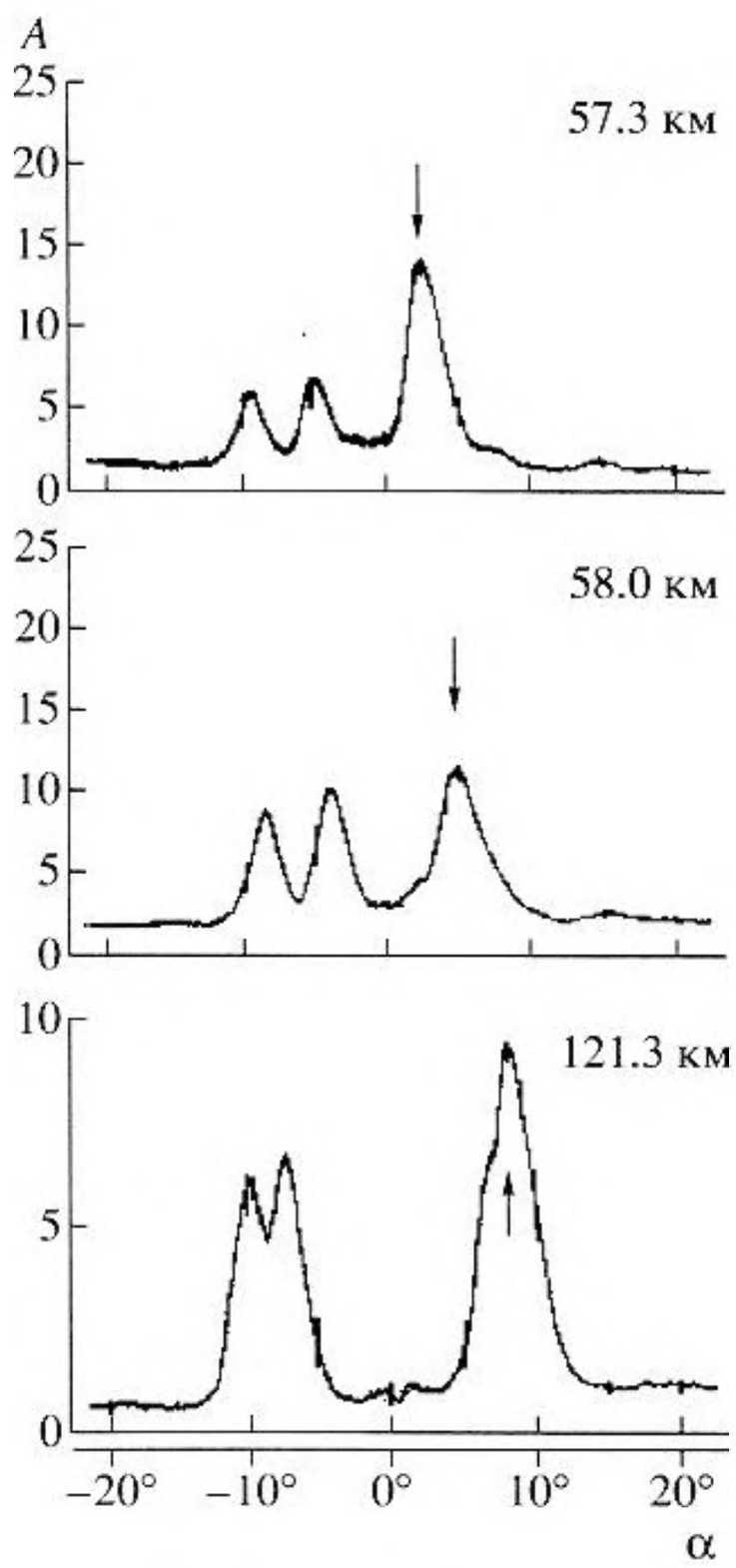

Рис. 2. Угловая структура звукового поля в вертикальной плоскости в Филиппинском море на дистанциях 57.3 км, 58.0 км и 121.3 км от источника.

типичны для одноканального распространения звука в тропических условиях глубокого океана. Ось подводного звукового канала расположена на глубине ~1000 м. Как видим, профили $c(z)$ в 1-ой (рис. 1а) и 2-ой (рис. 1б) зонах конвергенции, если и отличаются, то очень слабо.

Во время опытов в точках приема регистрировалась угловая структура звукового поля в вертикальной плоскости, а временна́я структура принятых многолучевых сигналов определялась по их автокорреляционным функциям.

Рассмотрим представленную на рис. 2 угловую структуру поля на указанных дистанциях. Здесь изображены фотографии экрана индикатора при сканировании главным лепестком диаграммы направленности 46-градусного сектора обзора. По оси абсцисс отложены углы прихода сигналов в вертикальной плоскости, по оси ординат – амплитуды принимаемых сигналов в линейном масштабе. На дистанции r = 57.3 км видны три хорошо разделяемых по углу сигнала, причем один из них примерно вдвое больше других по амплитуде. На r = 58.0 км все три сигнала (с несколько другими углами прихода из-за изменения дистанции) почти одинаковы по амплитуде. Во 2-ой зоне конвергенции угловая картина поля отличается от двух предыдущих как по значениям углов прихода, так по форме и амплитуде принятых сигналов. (Коэффициент усиления в тракте формирования диаграммы направленности был увеличен на 8 дБ). Как видно на фотографиях, часть лучей в точках приема хорошо разделяется по углу прихода. Другая часть сигналов, приходящих под близкими углами в вертикальной плоскости, не разрешается диаграммой направленности антенны. Об этом

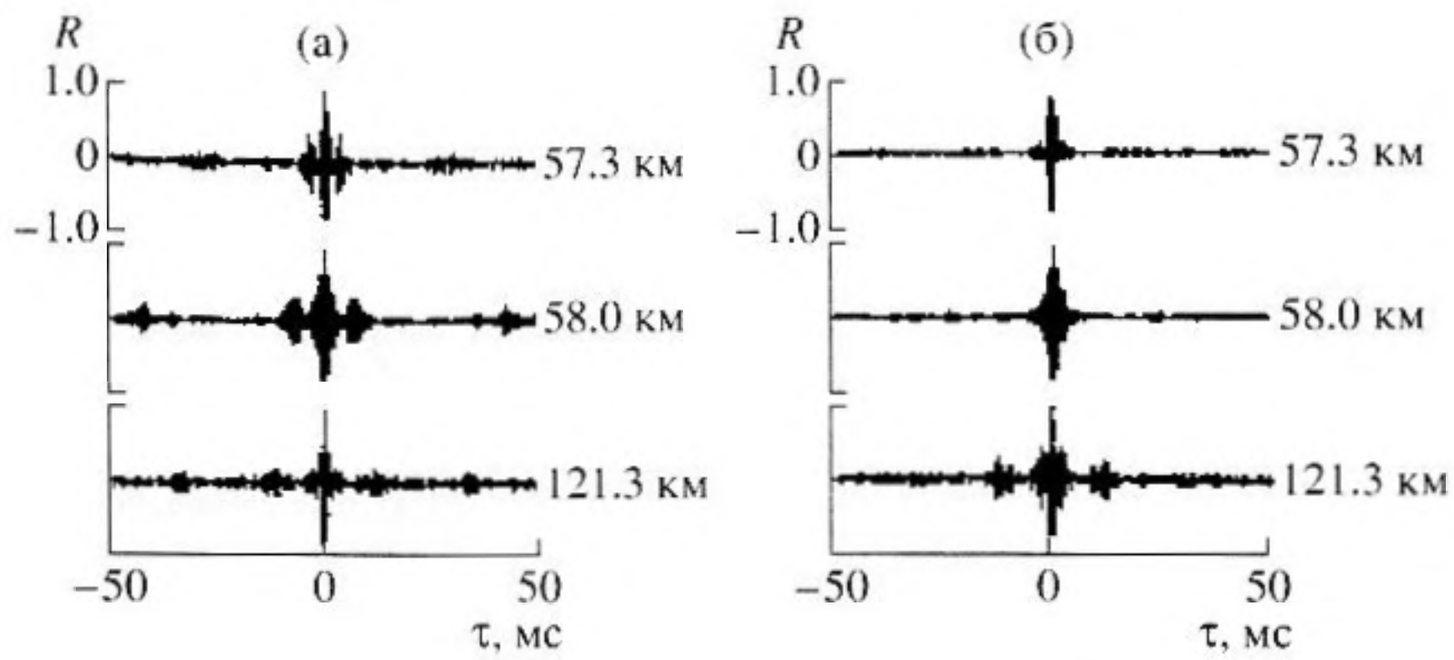

Рис. 3. Автокорреляционные функции сигналов, принятых на дистанциях 57.3 км, 58.0 км и 121.3 км. а – при ненаправленном приеме, б – при направленном приеме.

можно судить по ширине отклика, превышающего 2°, который соответствует ширине лепестка диаграммы направленности 40-метровой антенны на частоте 1 кГц. Для непрерывной регистрации сигналов главный максимум одной из диаграмм наводился на сигнал максимальной интенсивности (его положение на рис. 2 отмечено стрелкой). При этом если сигналы приходили по лучам с малым угловым отстоянием (меньшим ±1° от положения максимума), то они, естественно, не разрешались диаграммой направленности, и форма отклика заметно отличалась от формы главного лепестка диаграммы (см. рис. 2 для $r = 121.3$ км). Все сигналы, отклики которых при приеме на антенну изображены на фотографиях, одновременно принимались и центральным гидрофоном антенны. При этом они, естественно, суммировались со своими фазами и амплитудами.

Для определения временнóй структуры принятых сигналов рассмотрим их автокорреляционные функции $R(\tau)$. На рис. 3 представлены функции $R(\tau)$, позволяющие по числу корреляционных пиков определить число разрешаемых по времени отдельных лучей в многолучевом сигнале. Поскольку перед корреляционной обработкой принятые сигналы фильтровались в полосе частот (0.707–1.41) кГц, то их разрешение по времени прихода составляло ~1.4 мс. По оси абсцисс отложена временнáя задержка τ, а по оси ординат – величина нормированной функции автокорреляции R. Рис. 3а относится к ненаправленному приему, рис. 3б – к направленному приему. Вследствие четности автокорреляционных функций рассмотрим только положительные задержки. При ненаправленном приеме на верхней картинке рис. 3а ($r = 57.3$ км), кроме главного максимума (равного единице при нулевой задержке), существует второй с амплитудой 0.4 и разницей во времени прихода 3.7 мс. На $r = 58.0$ км (средняя картинка рис. 3а) можно различить два вторичных максимума: один, почти сливающийся с главным, с амплитудой 0.42 и задержкой 2.1 мс, второй, широкий – с амплитудой 0.4 и задержкой 6.7 мс. На $r = 121.3$ км (нижняя картинка на рис. 3а) в автокорреляционной функции при ненаправленном приеме видно множество вторичных максимумов с амплитудами, не превышающими 0.25 и большим набором задержек.

При направленном приеме на $r = 57.3$ км антенна полностью разрешает принятые сигналы по углу прихода в вертикальной плоскости. Имеющийся на верхней картинке рис. 3б второй, меньший 0.2, максимум соответствует автокорреляционной функции излучаемого псевдошума. На средней картинке рис. 3б ($r = 58.0$ км) второй максимум достаточно большой амплитуды, судя по форме и ширине корреляционного пика, сливается с главным. Таким образом, эти сигналы, принимаемые антенной, не разрешаются ни по углу, ни по времени прихода. Слияние максимумов произошло потому, что разность времен прихода двух сигналов оказалась меньше 1.4 мс. Во 2-ой зоне конвергенции при направленном приеме (нижняя картинка рис. 3б), кроме главного, видны три вторичных максимума с амплитудами 0.42, 0.16 и 0.27 и задержками 2.26 мс, 9.0 мс и 11.7 мс. Из рассмотрения автокорреляционных функций сигналов, зарегистрированных в точках приема, видно, что в опытах не всегда удавалось полностью отстроиться от многолучевости, даже применяя направленную вертикальную антенну. Так, если на дистанции 57.3 км антенна полностью разрешала принятые сигналы по углу прихода, то на дистанциях 58.0 км и 121.3 км это удавалось сделать лишь частично.

Рассмотрим более подробно основные результаты экспериментов, в первую очередь, взаимную корреляцию между сигналами, принятыми в разных зонах конвергенции. При этом в 1-ой зоне, как упоминалось выше, были выбраны две точки приема – $r = 57.3$ км и $r = 58.0$ км, во 2-ой зоне конвергенции – одна точка на $r = 121.3$ км. Таким образом, в первом случае пространственное

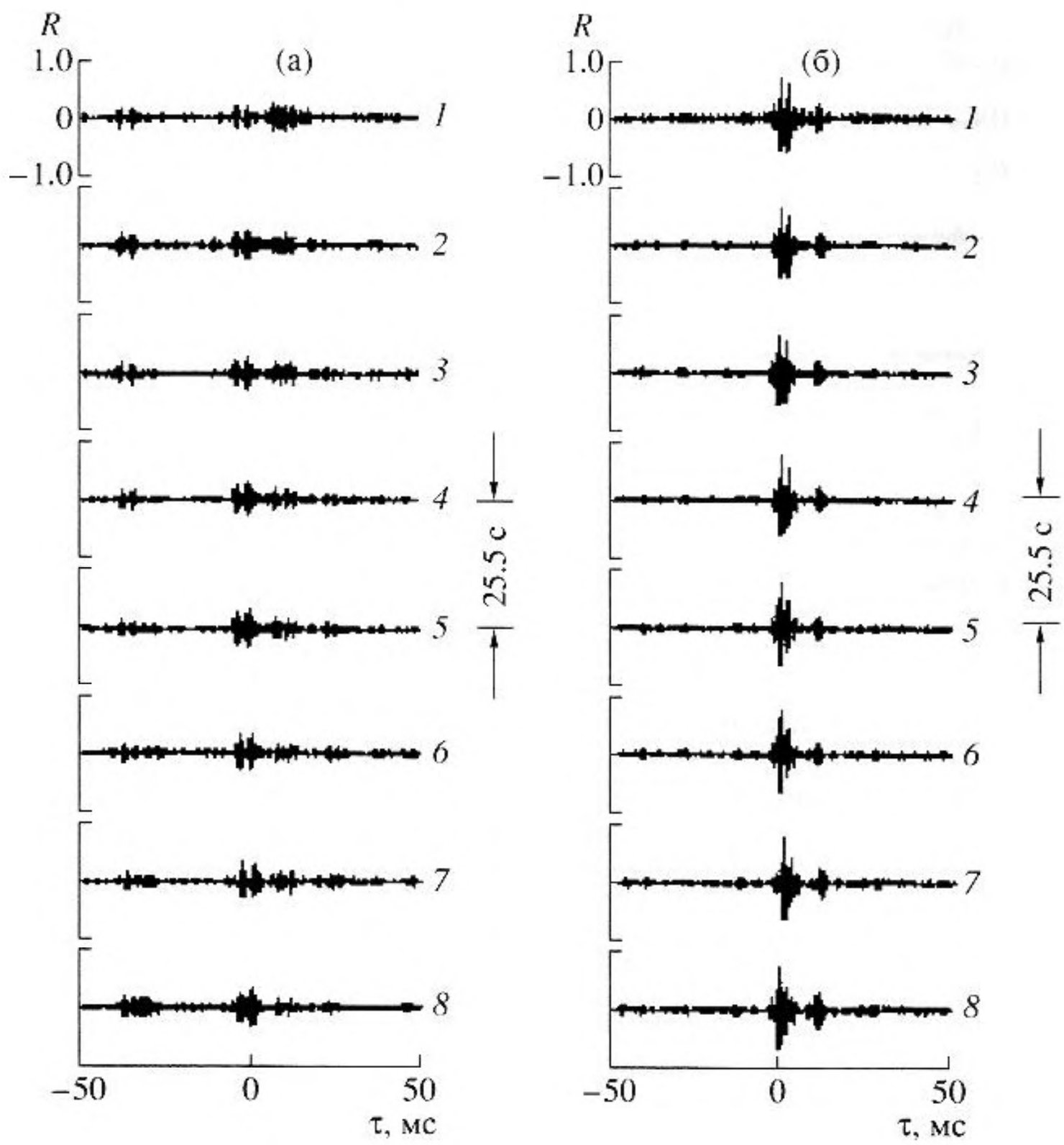

Рис. 4. Взаимно-корреляционные функции между сигналами, принятыми на дистанциях 57.3 км и 121.3 км (горизонтальное разнесение 64 км).

а – при ненаправленном приеме, б – при направленном приеме.

разнесение точек приема вдоль трассы распространения звука составляло $\Delta r = 64.0$ км, во втором – $\Delta r = 63.3$ км.

Методика вычислений заключалась в следующем. С частотой дискретизации 8 кГц в компьютер последовательно вводились: сначала опорный (короткий) сигнал длительностью 1.024 с, затем длинный сигнал длительностью 3 минуты. В качестве опорного использовались сигналы, принятые в 1-ой зоне конвергенции, в качестве длинного – сигналы, принятые во 2-ой зоне. В процессе вычислений производился сдвиг длинного сигнала с шагом, равным периоду дискретизации, т.е. 0.125 мс. Для вычисления нормированной взаимно-корреляционной функции при каждом сдвиге из длинного сигнала выбирался участок длительностью, равной длительности опорного. С интервалом, равным периоду псевдошумового сигнала, т.е. каждые 25.5 с (при наилучшем совпадении опорного сигнала с соответствующей 1.024-секундной частью длинного сигнала), появлялись функции корреляции с наибольшей величиной главного максимума ("пика"). Только эти функции и рассматривались в дальнейшем, причем положению главного пика приписывалась нулевая задержка, точность определения положений вторичных пиков равна 0.125мс – периоду дискретизации сигналов. За 3 минуты наблюдения вычислялось восемь функций корреляции. Для правомерного сравнения результатов взаимно-корреляционной обработки при ненаправленном и направленном приеме, ввод опорного и затем длинного сигналов в компьютер осуществлялся одновременно по двум каналам: одному – для сигналов, принятых центральным гидрофоном, второму – для сигналов, принятых главным лепестком диаграммы направленности антенны.

Сравним результаты корреляционной обработки при ненаправленном и направленном приеме. При этом отметим, что приведенные на рис. 4 и 5 взаимно-корреляционные функции при ненаправленном (рис. 4а и 5а) и направленном (рис. 4б и рис. 5б) приеме вычислены для сигналов, принимавшихся в одни и те же моменты времени одиночным гидрофоном и с помощью вертикальной антенны. Из-за многолучевого распространения

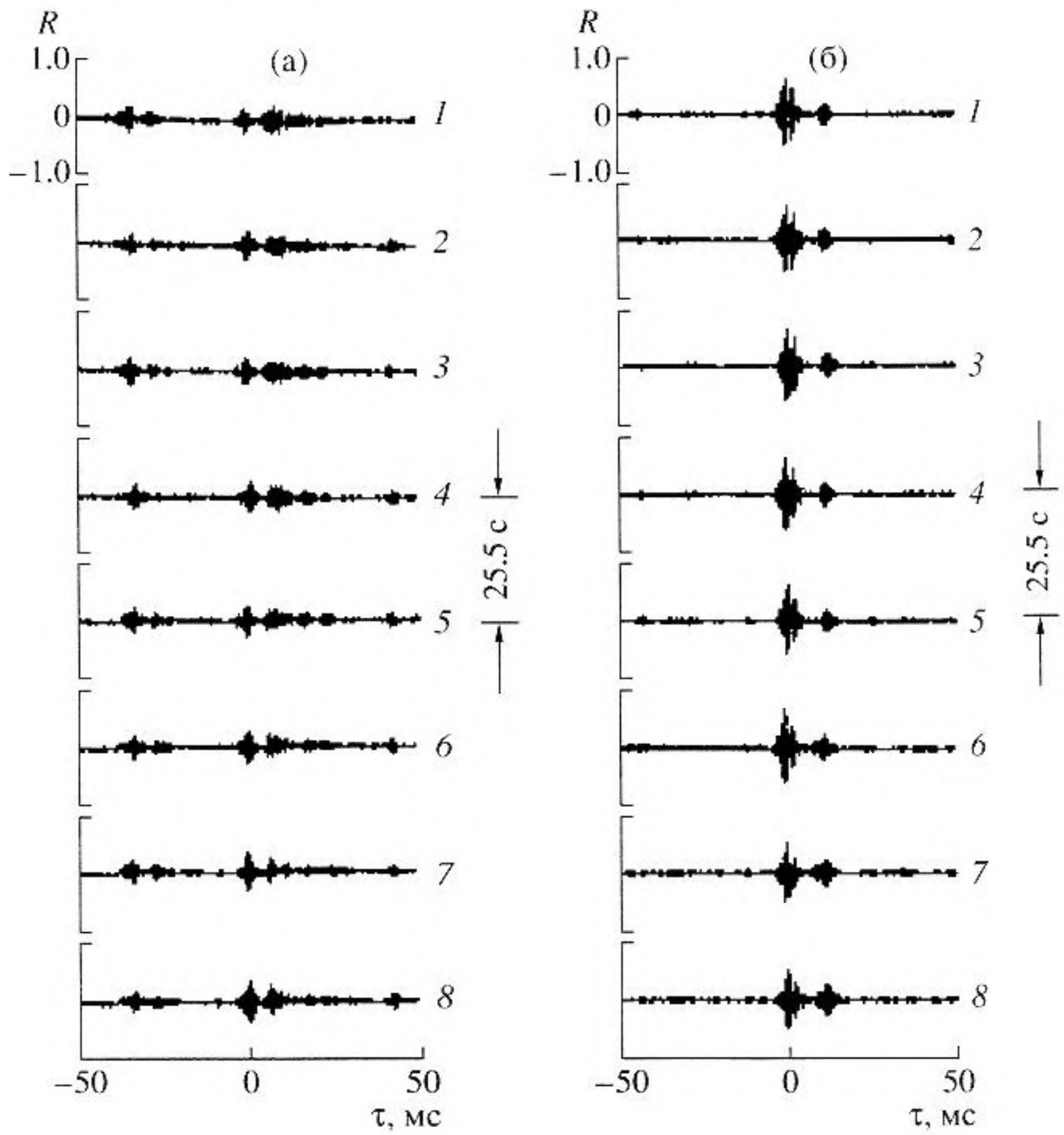

Рис. 5. Взаимно-корреляционные функции между сигналами, принятыми на дистанциях 58.0 км и 121.3 км (горизонтальное разнесение 63.3 км).

а – при ненаправленном приеме, б – при направленном приеме.

сигнала взаимно-корреляционные функции имеют многопиковый характер.

Рис. 4 относится к пространственному разнесению точек приема Δr = 64.0 км, а рис. 5 – к Δr = = 63.3 км. На рисунках приведено несколько взаимно-корреляционных функций, показывающих их изменчивость за 3 минуты с интервалом 25.5 с. При ненаправленном приеме многочисленные корреляционные максимумы, соответствующие отдельным, разрешенным по времени, приходам сигнала, примерно одинаковы по величине. Это объясняется тем, что при корреляционной обработке все сигналы с другими заметно отличающимися временами прихода являются своего рода помехой ("сигнальной помехой"), снижающей величину корреляционного максимума для каждого отдельно взятого сигнала. При разнесении точек приема на Δr = 64.0 км среднее (за 8 измерений) значение наибольшего максимума, равно $|\bar{R}| = 0.32$ при среднеквадратичном отклонении $\sigma_R \cong 0.04$, а при разнесении на Δr = 63.3 км – соответственно $|\bar{R}| = 0.31$ и $\sigma_R \cong 0.04$. И в том, и другом случае можно выделить четыре группы корреляционных пиков, соответствующих четырем группам лучей: вокруг нулевых задержек и задержек, равных примерно –33 мс, +11 мс и +25 мс, причем во втором случае (Δr = 63.3 км) две последние группы сливаются друг с другом. Формы корреляционных пиков и их структура на рис. 4а и 5а, так же, как угловая структура поля (см. рис. 2), несколько отличаются, хотя изменение расстояния было относительно небольшим (700 м).

При направленном приеме, как уже было сказано, не всегда удавалось полностью избавиться от многолучевости. Однако, несмотря на это, число корреляционных пиков на рис. 4б и рис. 5б значительно меньше, а коэффициенты взаимной корреляции для группы лучей с нулевыми задержками существенно выше. Их значения для главного максимума, усредненные (как и при ненаправленном приеме) по 8-ми измерениям, равны $|\bar{R}| = 0.74$ при среднеквадратичном отклонении $\sigma_R \cong 0.06$ для разнесения точек приема на Δr = = 64.0 км и $|\bar{R}| = 0.64$ и $\sigma_R \cong 0.04$ – для разнесения

Таблица 1. (Δr = 64.0 км, рис. 4б)

N	1	2	3	4	5	6	7	8		
R/τ									$\lvert\bar{R}\rvert/\bar{\tau}$	σ_R/σ_τ
R_1	0.68	0.64	0.72	0.76	0.81	0.77	0.78	0.75	0.74	0.06
τ_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R_2	–0.62	–0.57	0.55	0.53	0.49	0.46	0.43	0.37	0.50	0.08
τ_2	1.63	1.63	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.0	0.23
R_3	0.23	–0.22	–0.22	0.22	0.21	0.21	0.24	–0.31	0.23	0.03
τ_3	11.13	11.50	10.75	11.25	11.38	11.38	11.63	11.25	11.28	0.26

Таблица 2. (Δr = 63.3 км, рис. 5б)

N	1	2	3	4	5	6	7	8		
R/τ									$\lvert\bar{R}\rvert/\bar{\tau}$	σ_R/σ_τ
R_1	0.66	0.66	–0.61	0.65	0.59	0.58	0.71	0.63	0.64	0.04
τ_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
R_2	0.46	0.49	0.48	0.46	0.32	0.27	0.37	0.37	0.40	0.08
τ_2	2.13	2.25	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13	2.141	0.04
R_3	0.21	0.21	0.20	–0.17	–0.28	0.24	0.24	0.20	0.22	0.03
τ_3	11.25	11.38	11.13	11.50	11.25	11.63	11.50	11.38	11.38	0.16

Δr = 63.3 км. На рисунках в обоих случаях можно выделить по три максимума: главный – при нулевой задержке, второй, отстоящий от главного всего на ~2 мс, и третий с задержкой ~11.3 мс. От измерения к измерению их величины и положение на оси задержек немного меняются, что объясняется изменением положения в пространстве корреспондирующих точек за счет дрейфа.

Подробные данные об изменении величины корреляционных максимумов и положения их на оси задержек при направленном приеме сведены в таблицы 1 и 2. Введены обозначения: N – номер реализации взаимно-корреляционной функции, приведенной на рис. 4б и на рис. 5б справа; R_1, R_2, R_3 – величины корреляционных пиков; τ_1, τ_2, τ_3 – временной сдвиг корреляционных пиков относительно пика с максимальным значением R в мс; $|\bar{R}|$ и σ_R – среднее значение величины корреляционного максимума и его среднеквадратичное отклонение; $\bar{\tau}$, σ_τ – среднее значение временного сдвига и среднеквадратичное отклонение в мс.

Каждая функция взаимной корреляции $R(\tau)$ вычислялась при времени усреднения T = 1.024 секунды.

Оценить среднеквадратичную ошибку ξ при вычислении значений коэффициентов $R(\tau)$ можно по формуле [8]:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{2\Delta f T}}\left(1 + \frac{1}{R_{12}^2(\tau)}\right)^{1/2}\frac{1}{\sqrt{N}}$$

где $R_{1,2}$ – коэффициент взаимной корреляции; Δf – частотная полоса анализа; T – время усреднения; N – число измерений. В условиях эксперимента Δf = 1200Гц, T = 1.024с, N = 8 и, следовательно, среднеквадратичная случайная ошибка ξ не превышает 1–3%.

Приведенные в таблицах данные показывают, что средняя величина главного взаимно-корреляционного пика ($|\bar{R}|$ = 0.74) при разнесении точек приема на Δr = 64.0 км оказалась больше, чем при Δr = 63.3 км ($|\bar{R}|$ = 0.64). В основном это связано с тем, что при большем удалении от источника (r = 58.0 км) и, следовательно, при меньшем расстоянии между точками приема (Δr = 63.3 км) разрешение сигналов по углу прихода в вертикальной плоскости было не полным, в отличие от приема сигналов на дистанции r = 57.3 км (Δr = 64). В то же время, именно эти сигналы (отмечены стрелками на рис. 2, а их автокорреляционные функции приведены на двух верхних картинках рис. 3б) использовались в качестве опорного при вычислении пространственной корреляции сигналов, принятых в 1-ой и во 2-ой зоне конвергенции.

Повышенные флуктуации разностей времен прихода сигналов по различным лучам обычно связаны с изменением знака (с положительного на отрицательный) взаимно-корреляционных пиков. Так, например, для N = 2 и N = 3 (см. таблицу 1) изменение знака R_2 приводит к изменению временной задержки τ_2 на 0.5 мс (с 1.63 на 2.13 мс), т.е. на

Таблица 3

Разнесение точек приема	$\Delta r = 64.0$ км				$\Delta r = 63.3$ км			
	R_{min}	R_{max}	$\lvert\bar{R}\rvert$	σ_R	R_{min}	R_{max}	$\lvert\bar{R}\rvert$	σ_R
ненаправленный прием	0.22	0.37	0.32	0.04	0.20	0.41	0.31	0.04
направленный прием	0.64	0.81	0.74	0.06	0.58	0.71	0.64	0.04

полпериода сигнала со средней частотой спектра (1 кГц). В остальных шести измерениях, где R_2 не меняет знак, величина τ_2 стабильно равна 2.13 мс.

В таблице 3 дано сравнение величин главных максимумов R (наибольших пиков) взаимно-корреляционных функций при ненаправленном и направленном приеме сигналов. В ней для пространственного разнесения точек приема $\Delta r = 64.0$ км и $\Delta r = 63.3$ км приведены минимальное R_{min} и максимальное R_{max} значения главных максимумов по восьми измерениям за 3 минуты наблюдения, а также их средние значения $|\bar{R}|$ со среднеквадратичными отклонениями σ_R.

Как видно из таблицы 3, для одних и тех же условий среды при ненаправленном приеме средние величины наибольших пиков пространственной корреляции не превышают 0.32, тогда как при направленном приеме те же величины достигают значений 0.64 и 0.74. Причиной такого снижения корреляции является только увеличение многолучевости при приеме сигналов ненаправленными гидрофонами, поскольку при одновременном направленном приеме тех же сигналов условия в среде, естественно, остаются одинаковыми.

Направленный в вертикальной плоскости прием оказывается выигрышным и в тех случаях, когда в угловой структуре поля не удается выделить отдельные сигналы из-за большой многолучевости, например, когда корреспонденты находятся вблизи оси зукового канала. Такие условия распространения звука были зарегистрированы при проведении опытов в районе, расположенном юго-западнее Курильской гряды. Глубина океана вдоль исследуемой трассы менялась от 4200 м до 5200 м. Как и в вышеописанных экспериментах, с одного дрейфующего судна излучался непрерывный псевдошумовой сигнал, а прием сигналов осуществлялся на другом дрейфующем судне с помощью той же 40-метровой вертикальной антенны. Однако вместо режима секторного обзора в вертикальной плоскости использовался так называемый статический "веер" диаграмм направленности. Он состоял из 32-х диаграмм, главные лепестки которых были расположены с постоянным шагом (~1.3°) в диапазоне углов прихода примерно ±21°. В этих экспериментах измерялись функции взаимной корреляции не между сигналами, принятыми на различных дистанциях, а зарегистрированными одновременно одной и той же антенной с разных направлений в вертикальной плоскости. На рис. 6 показаны профили скорости звука до глубины 1600 метров (рис. 6а) и угловая структура поля (рис. 6б) в точках приема на дистанциях 217 км и 334 км. В отличие от предыдущих опытов (см. рис. 1), ось звукового канала была расположена в непосредственной близости от поверхности. Источник находился на глубине 100 м, а центр вертикальной приемной антенны – на глубине 250 м. На графиках угловой структуры поля по оси абсцисс отложен диапазон углов прихода, обеспечиваемый статическим "веером", по оси ординат – амплитуды сигналов в относительных единицах. Соседние "лепестки веера" перекрывались примерно по уровню ~0.9, поэтому ширина каждого отдельного "столбика" соответствует такому раствору главного лепестка каждой из 32-х диаграмм направленности. Отношение сигнал/помеха на дистанции 217 км было хуже, чем на дистанции 334 км, поэтому коэффициент усиления в тракте формирования диаграмм направленности в первом случае был на 8 дБ больше, чем во втором.

На рис. 7 приведены взаимно-корреляционные функции между сигналами, принятыми двумя лепестками "веера" диаграмм направленности, наведенными на углы 0° и ~2.3°, т.е. практически неперекрывающимися друг с другом, на дистанциях 217 км (рис. 7а) и 334 км (рис. 7б). Среди нескольких корреляционных пиков четко выделяются главные максимумы, соответствующие лучам с наибольшей интенсивностью. Их величины достигают 0.24 на 217 км и 0.35 на 334 км. (В то же время автокорреляционные функции сигналов, принятых ненаправленным гидрофоном, имели вид, аналогичный представленным на рис. 3а) .

Таким образом, при полном разрешении сигналов по углу прихода с помощью направленной в вертикальной плоскости антенны корреляционные функции имеют один максимум. При частичном разрешении – их число определяется количеством сигналов, попадающих в раствор главного лепестка диаграммы направленности антенны и временнóй задержкой между ними. Величины максимумов зависят от соотношения интенсивно-

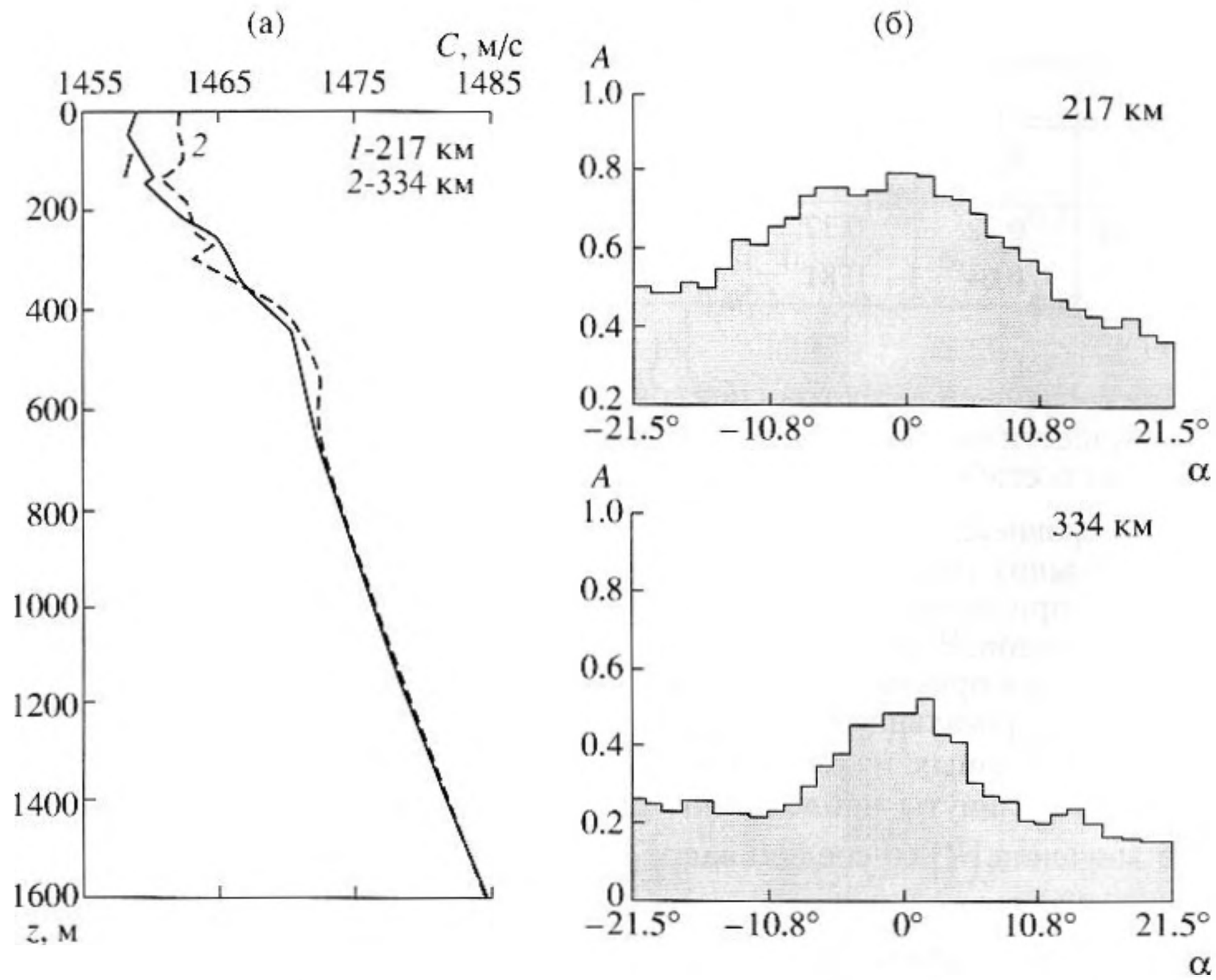

Рис. 6. Зависимости скорости звука от глубины c(z) в верхней части волновода (а) и угловая структура поля (б) при приеме сигналов в районе Курильской гряды на дистанциях 217 км и 334 км.

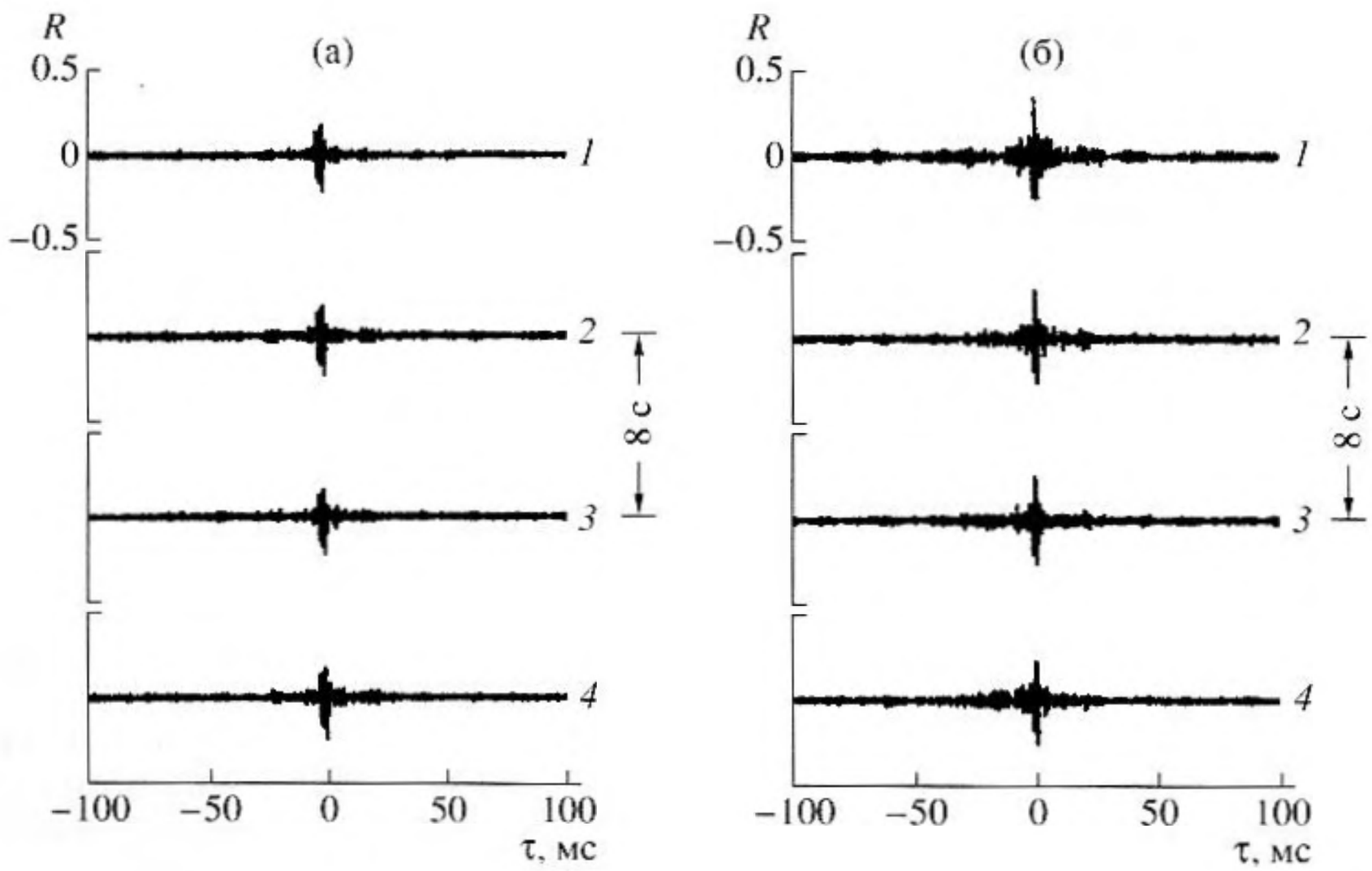

Рис. 7. Взаимно-корреляционные функции между сигналами, принятыми двумя диаграммами "веера" с направлений 0° и 2.3°:

а – на дистанции 217 км, б – на дистанции 334 км.

стей принимаемых сигналов и углового отстояния лучей друг от друга. В случае ненаправленного приема число корреляционных пиков увеличивается, а их величины уменьшаются из-за влияния так называемой "сигнальной помехи". Это происходит потому, что каждый из отдельных сигна-

лов, приходящий со сдвигом по времени, является (при корреляционной обработке) помехой для другого из принимаемого многолучевого сигнала.

Приведенные выше результаты корреляционной обработки экспериментальных данных показали, что даже при ширине главного лепестка диаграммы направленности всего ~2°, не всегда удается выделить отдельные составляющие многолучевого сигнала. Однако сравнение корреляционных данных, полученных при одновременном ненаправленном и направленном приеме сигналов, позволяет сделать вывод о значительном уменьшении влияния многолучевости при направленном в вертикальной плоскости приеме. При этом существенно увеличиваются интервалы пространственной корреляции, что позволяет, даже при значительном разнесении точек приема, проводить идентификацию сигналов и успешно решать триангуляционные задачи, в том числе при охране экономической зоны от несанкционированной деятельности судов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 03-02-16565).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Worcester P.F., Spindel R.C.* North Pacific Acoustic Laboratory // J. Acoust. Soc. Amer. 2005. V. 117. № 3 (Part. 2). P. 1499–1510.
2. *Andrew R.K., Howe B.M., Mercer J.A.* Transverse horizontal spatial coherence of deep arrivals at megameter ranges // J. Acoust. Soc. Amer. 2005. V. 117. № 3 (Part. 2). P. 1511–1526.
3. *Colosi J.A., Bagegeroer A.B. et al.* Analysis of multipath acoustic field variability and coherence in the finale of broadband basin-scale transmissions in the North Pacific Ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 2005. V. 117. № 3 (Part. 2). P. 1538–1564.
4. *Voronovich A.G., Ostashev V.E., et al.* Horisontal refraction of acoustic signals retrieved from North Pacific Acoustic Laboratory billboard array data // J. Acoust. Soc. Amer. 2005. V. 117. № 3 (Part. 2). P. 1527–1537.
5. *Stotts S.A.* A robust spatial filtering technique for multisource localization and geoacoustic inversion // J. Acoust. Soc. Amer. 2005. V. 118. № 1. P. 139–162.
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.* Пространственная корреляция гидроакустических сигналов в двухосевом подводном звуковом канале // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 4. С. 467–472.
8. *Бендат Дж., Пирсол А.* Измерение и анализ случайных процессов // М. "Мир". 1974. 463 с.

Correlation of Underwater Acoustic Signals Simultaneously Received with Omnidirectional and Directional Means

O. P. Galkin and S. D. Pankova

Andreev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia

e-mail: galkin@akin.ru

Abstract—A comparison of experimental data on the spatial correlation between acoustic signals simultaneously received by an omnidirectional hydrophone and a directional vertical array is carried out. The spatial correlation was measured between the signals received at different distances in a deep ocean. The points of reception were positioned in two convergence zones along the path of sound propagation with a point-to-point distance of about 64 km. Pseudonoise signals were emitted in the frequency range (0.8–2.0) kHz and received by a vertical array, whose beam had a width of ~2°. Concurrently, multipath signals received with the central hydrophone of the array were recorded. Signals in the first and second convergence zones were received at different times. Nevertheless, in the case of the directional reception, the coefficients of spatial correlation between such signals appeared to be as high as 0.64–0.74 even under the conditions of incomplete resolution of signals in the angle of arrival in the vertical plane. At the same time, in the case of omnidirectional reception, the coefficients of spatial correlation were below 0.32.