АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2005, том 51, № 4, с. 469–476

УДК 534.23

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПСЕВДОШУМОВЫХ СИГНАЛОВ В ОКЕАНЕ ПРИ ОСТРОНАПРАВЛЕННОМ ПРИЕМЕ

© 2005 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 2.07.2003 г.

Обсуждаются результаты экспериментов при "однолучевом" и "многолучевом" приеме широкополосных непрерывных псевдошумовых акустических сигналов (0.8–1.3 кГц) в глубоком океане. Опыты проводились на трассах протяженностью от ~60 до ~420 км, соответствующих первым семи зонам конвергенции. Приводятся данные (для 1-й, 2-й и 7-й зоны) по измерению коэффициентов взаимной корреляции и разностей времен прихода между сигналами, принятыми одной и одновременно двумя остронаправленными (~2°) вертикальными антеннами, расположенными на разных глубинах (200 м и 450 м). Сопоставлены корреляционные характеристики сигналов, распространяющихся чисто водным путем, т.е. не отражающихся от границ волновода, и пришедших под различными углами в вертикальной плоскости. Делается вывод, что, при прочих равных условиях, основной причиной раскорреляции сигналов, принятых с различных направлений или на разных горизонтах, является неполное разрешение принятых многолучевых сигналов по углу прихода в вертикальной плоскости.

Изучение временной и корреляционной структуры акустических полей, создаваемых источниками звука в океане, необходимо для разработки адекватной модели океанического волновода, а также для решения целого ряда прикладных задач [1–4]. При этом особую ценность представляют экспериментальные данные, полученные в реальных океанических условиях и, следовательно, автоматически учитывающих влияние различных океанологических факторов. Такие материалы позволяют совершенствовать существующие модели океанических волноводов и вносить коррективы во вновь разрабатываемые модели, созданию которых посвящен целый ряд работ [5–7].

В глубоком океане звуковое поле в точке приема в большинстве случаев представляет собой суперпозицию сигналов, пришедших от источника звука по различным лучам. При этом отдельные компоненты, составляющие многолучевой сигнал, могут отличаться друг от друга не только углами прихода сигналов в вертикальной плоскости, но и факторами фокусировки и временами прихода их в точку приема.

Пространственное разрешение принимаемых сигналов по углу прихода в вертикальной плоскости можно осуществить с помощью развитых по вертикали остронаправленных антенн. Для разделения же отдельных компонент многолучевого сигнала по временам прихода обычно используют корреляционную обработку.

Целью настоящей работы является экспериментальная оценка влияния многолучевости на корреляционные характеристики и флуктуации разностей времен прихода принятых в точке приема сигналов, распространяющихся различными путями.

Для корректного решения поставленной задачи необходимо было устранить полностью или хотя бы в значительной степени другие факторы, которые в принципе могут приводить к раскорреляции принимаемых сигналов. Поскольку в глубоком океане (3–5 км) нельзя было жестко зафиксировать в пространстве (на глубинах ~100–500 м) ни положение излучателя, ни местоположение приемной системы, эксперименты пришлось проводить с использованием дрейфующих научно-исследовательских судов. Это, естественно, приводило к перемещению акустической трассы в пространстве. Поэтому в выбранном районе работ за все время проведения опытов профили скорости звука не должны были претерпевать каких-либо существенных изменений при любом расположении трассы. Кроме того, необходимо было использовать только такие сигналы, которые распространяются без отражения от границ волновода, что позволяет устранить влияние не только рельефа и структуры дна, но и взволнованной поверхности океана. Отметим также, что для получения более надежных результатов по корреляционным и временным характеристикам сигналов основную часть работ следовало проводить на тех участках трассы, где

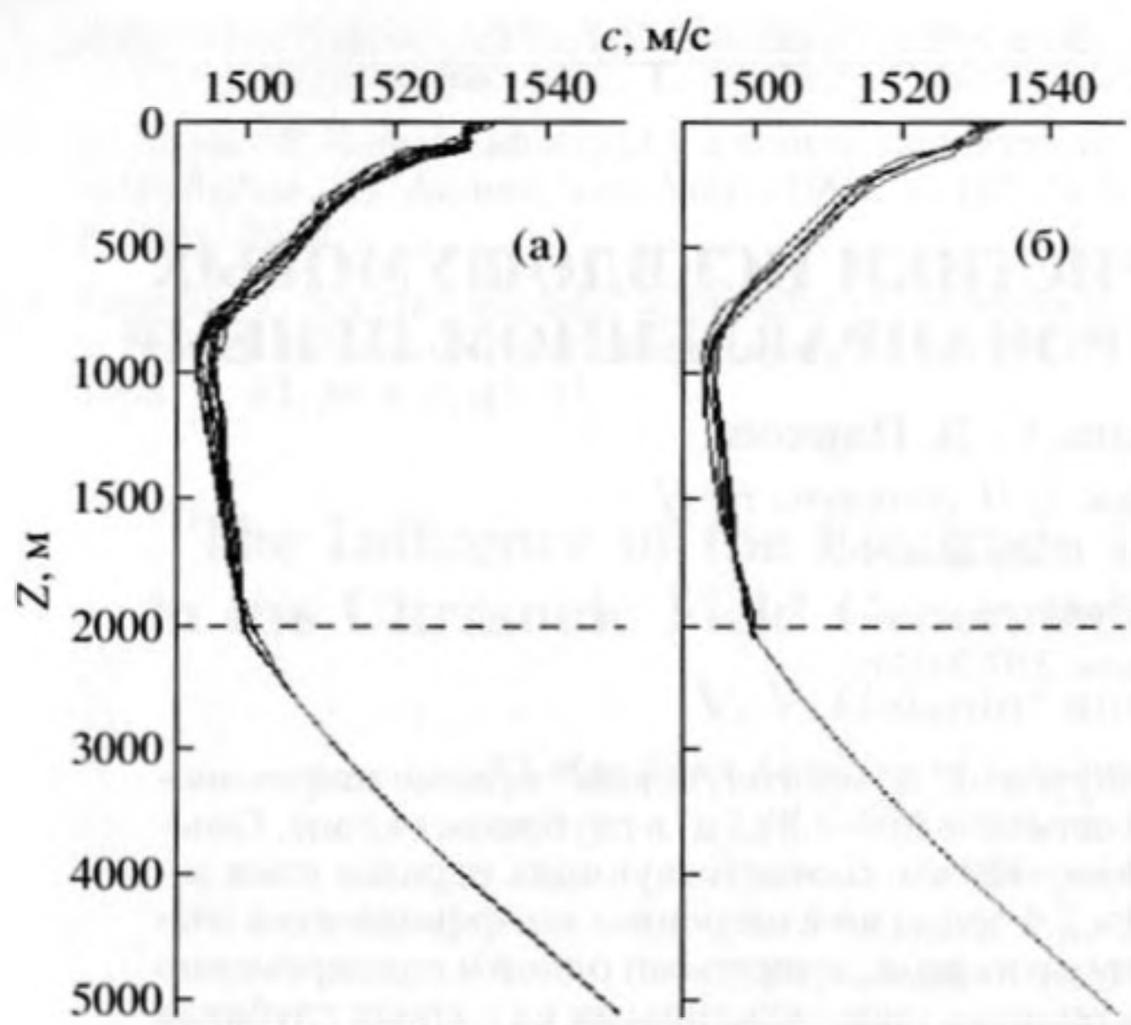

Рис. 1. Зависимости скорости звука от глубины, измеренные в местах приема (а) и в местах излучения (б) сигналов, в течение всего времени проведения экспериментов.

отношение принятый сигнал/шумовая помеха было бы максимальным. Этому требованию, как известно, отвечают зоны конвергенции. Поэтому эксперименты в основном и проводились в указанных зонах.

С учетом приведенных соображений для проведения исследований был выбран район в глубоководной части Атлантического океана, расположенный юго-западнее Канарских островов. Он характеризуется крайне малой пространственной изменчивостью океанических условий и практически полностью удовлетворяет тем требованиям, которые изложены выше.

Эксперименты проводились следующим образом. В выбранных точках на исследуемой трассе, с одного из дрейфующих научно-исследовательских судов Акустического института с помощью ненаправленного источника излучался непрерывный псевдошумовой сигнал в широкой полосе частот от 0.8 до 1.3 кГц. Глубина излучения во время экспериментов составляла 200 м. На другом – приемном судне через специальные шахты батипостов, расположенных на его диаметрали, были одновременно опущены на разные глубины две вертикальные 40-метровые антенны. Горизонтальное расстояние между шахтами составляло примерно 45 м. Каждая из антенн представляла собой гибкий шланг диаметром всего 5 см с неэквидистантно расположенными внутри него 296 гидрофонами, объединенными в 74 фазовых центра. Для натяжения шланговых антенн и придания им вертикального положения к нижнему концу каждой из них крепились 800-килограммовые грузы. Центральный гидрофон одной из антенн находился на глубине ~200 метров, а другой – на глубине ~450 метров. Сигналы, пришедшие на каждую антенну с различных направлений в вертикальной плоскости, одновременно принимались тремя диаграммами направленности, сформированными аналоговым способом. При этом один из главных лепестков этих диаграмм мог использоваться не только в режиме наведения, но и в режиме обзора в диапазоне углов ±(20°–23°). Пространственное разрешение сигналов по углу прихода составляло ~2° на средней частоте излучаемого диапазона. Измерения угловой, временной и корреляционной структуры звукового поля проводились на дистанциях от ~60 км до ~420 км, что соответствует семи зонам конвергенции. Глубина океана в районе проведения экспериментов на всей трассе распространения звука вплоть до 420 км оставалась практически неизменной и составляла примерно 5 км.

Приемное судно с опущенными антеннами в течение всего эксперимента находилось в дрейфе и его местоположение изменялось довольно медленно. Излучающее же – переходило из точки в точку вдоль выбранной трассы и только на нужных дистанциях дрейфовало, производя излучение сигналов. Общее время проведения экспериментов с учетом перерывов на переходы составило 14 суток.

Зависимости скорости звука от глубины $c(z)$, измеренные во время проведения опытов на приемном и излучающем судне, приведены на рис. 1а и 1б соответственно. Как видно из графиков, профили $c(z)$ не претерпевали существенных и принципиальных изменений.

Ось подводного звукового канала была расположена на глубине около 900 метров. Ветер и поверхностное волнение в продолжение всех опытов не превышали II–III-х баллов. По этим причинам отклонение антенн от вертикали было меньше 1°, а максимальные изменения глубин антенн не превышали 1.5 метров. В таких практически идеальных условиях измерялись взаимнокорреляционные функции и разности времен прихода сигналов, распространяющихся по "водным" лучам, т.е. приходящих без отражений от границ волновода. Поскольку работы проводились в зонах конвергенции, отношение сигнал/помеха значительно превышало единицу. Поэтому основное внимание в экспериментах уделялось оценке влияния на указанные характеристики пространственного разрешения сигналов по углу прихода в вертикальной плоскости.

Нормированные функции взаимной корреляции $R(\tau)$ между сигналами, принятыми с различных направлений в вертикальной плоскости (в том числе и антеннами, расположенными на разных глубинах), вычислялись в течение 4–5 минут

(с интервалом 20 секунд) при времени усреднения $T = 0.85$ секунды. Оценить погрешность ξ при вычислении коэффициентов $R(\tau)$ при таком времени усреднения можно по формуле $\xi = \frac{1}{\sqrt{\Delta f T}}$ [8], где Δf – полоса частот. Для условий экспериментов ($\Delta f = 500$ Гц и $T = 0.85$ с) погрешность не превышала 5%.

Максимальный интервал вычисляемых временных задержек составлял $\tau_{max} = \pm 50$ мс с шагом 0.125 мс. Точность определения разностей времен прихода, исходя из средней частоты излучаемого сигнала (около 1 кГц) и из-за возможного изменения знака корреляционного пика, была не хуже 0.5 мс.

Рассмотрим результаты измерений угловой, временной и корреляционной структуры звукового поля, проведенных в двух ближних (1-й и 2-й) и в самой дальней (7-й) зонах конвергенции.

При работах в 1-й зоне (на дистанции 59.8 км) одна из реализаций угловой структуры поля, зафиксированная одновременно на указанных выше глубинах приема (450 м и 200 м), приведена на рис. 2. Здесь изображена фотография экрана индикатора секторного обзора в диапазоне углов прихода в вертикальной плоскости ±20° (на экране диапазон ±20° для получения более точного значения углов растянут до ~±120°). Внутренняя развертка относится к глубине приема 450 м, внешняя – к глубине 200 м. Жирными радиальными штрихами обозначены углы, на которые были наведены главные лепестки диаграмм направленности каждой из антенн при измерении корреляции. Угловая ширина отклика обеих антенн на каждом из отмеченных направлений прихода сигналов, практически соответствующая отклику на плоскую волну, косвенно указывает на полное пространственное разрешение принятых сигналов. Выбранные сигналы приходили под углами $\alpha_1 = -6.5°$ (при приеме на глубине – 450 м), а также $\alpha_2 = -2.5°$ и $\alpha_3 = +2°$ (для антенны на глубине – 200 м). Знак "–" означает приход сигналов на антенну снизу, а знак "+" – сверху. Сигналы с указанными углами прихода распространялись по чисто "водным" лучам, т.е. приходили без отражения от границ волновода, поскольку зарегистрированные углы были меньше углов скольжения лучей, касающихся поверхности океана (~10° – для глубины 450 м и ~7.5° – для глубины 200 м). На рис. 3 (вверху) изображены автокорреляционные функции $R_1(\tau)$, $R_2(\tau)$ и $R_3(\tau)$ сигналов, пришедших с каждого из указанных направлений. Внизу рис. 3 показаны функции взаимной корреляции $R_{1-2}(\tau)$, $R_{1-3}(\tau)$ и $R_{2-3}(\tau)$ между выбранными сигналами (индексы 1–2, 1–3 и 2–3 указывают на номера сигналов с углами прихода α_1 и α_2, α_1 и α_3, а также α_2 и α_3, для которых эти функции вычислялись). Поскольку автокорреляционные функции $R_1(\tau)$, $R_2(\tau)$ и $R_3(\tau)$ имеют по одному четко выраженному максимуму ("пику"), что соответствует полному пространственному разрешению принятых сигналов, постольку и каждая из взаимнокорреляционных функций также имеет один четко выраженный пик. Заметим также, что формы этих пиков практически совпадают с автокорреляционной функцией излучаемого сигнала. Такой "однолучевой" прием сигналов одновременно с двух или трех направлений в вертикальной плоскости был зафиксирован еще в ряде других случаев, особенно при проведении экспериментов в 1-й и 2-й зонах конвергенции. Результаты вычисления величин коэффициентов взаимной корреляции и флуктуаций разностей времен прихода сигналов при практически полном пространственном разрешении их сведены в таблицу 1.

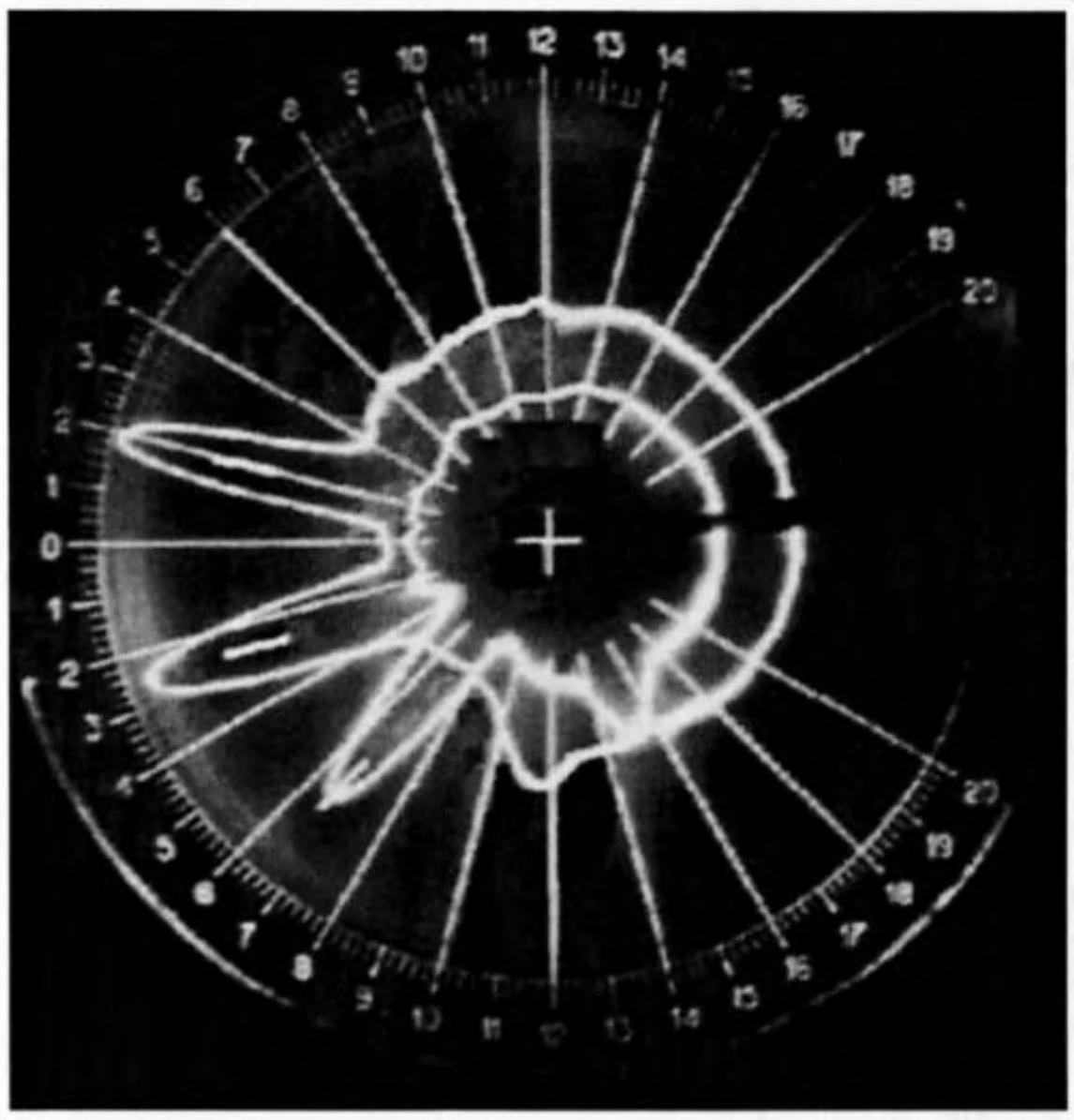

Рис. 2. Фотография экрана индикатора секторного обзора. Внутренняя развертка относится к глубине приема 450 м, внешняя – к глубине 200 м. Дистанция 117.3 км. Штрихами обозначены направления прихода сигналов.

В четырех первых столбцах таблицы указаны: дистанция r между точками излучения и приема, а также углы прихода сигналов α_1, α_2, α_3 и глубины h, на которых они принимались. В двух правых столбцах приведены (сверху вниз) значения коэффициентов взаимной корреляции $R_{1-2}(\tau)$, $R_{1-3}(\tau)$ и $R_{2-3}(\tau)$, усредненные, как указывалось выше, за 4–5 минут по 20–25 независимым измерениям, и флуктуации их разностей времен прихода σ_τ за то же время. Жирным шрифтом выделены результаты измерений, которые были описаны выше и представлены на рис. 2 и 3.

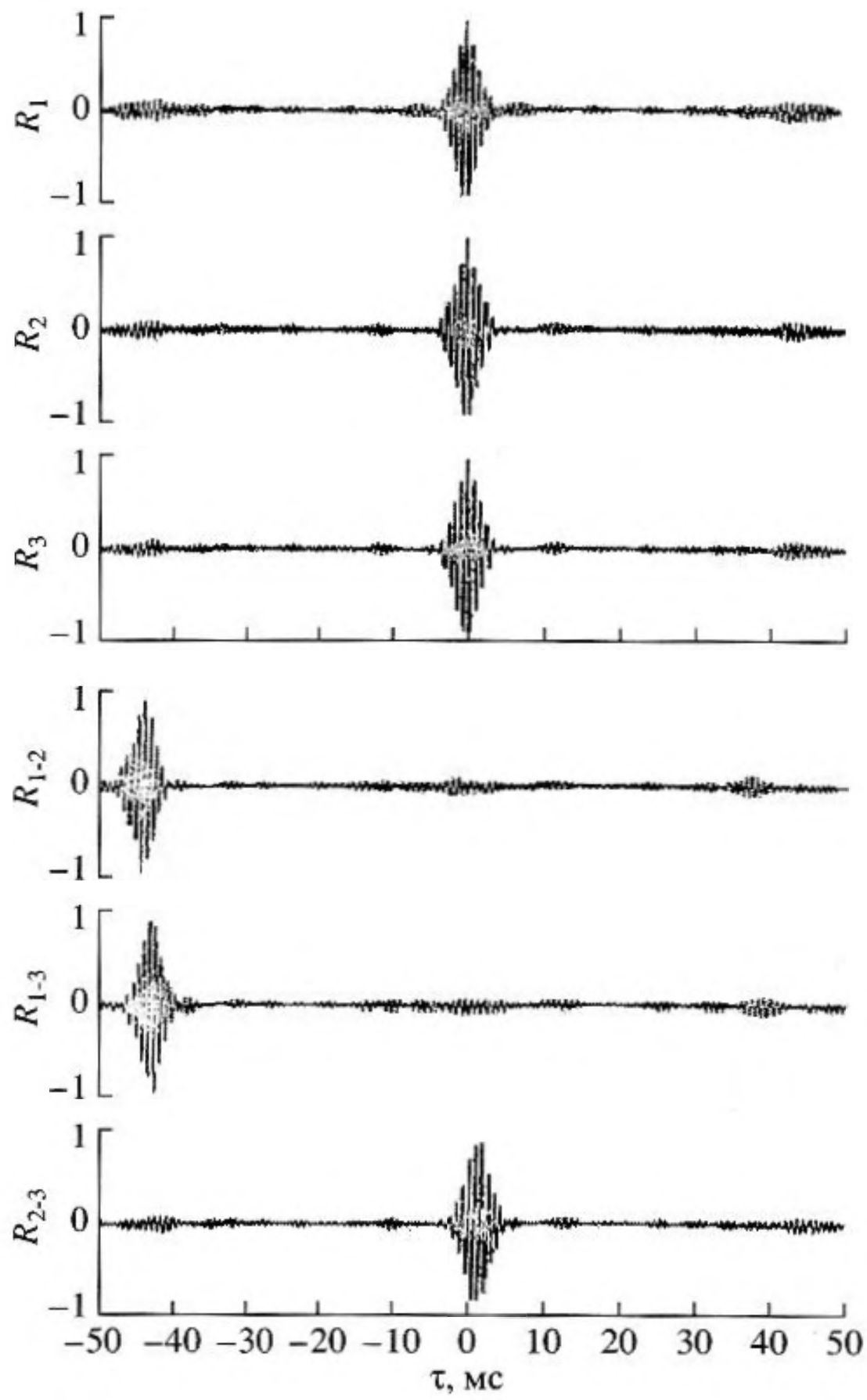

Рис. 3. Автокорреляционные и взаимнокорреляционные функции сигналов, принятых в 1-й зоне конвергенции при практически полном пространственном разрешении лучей.

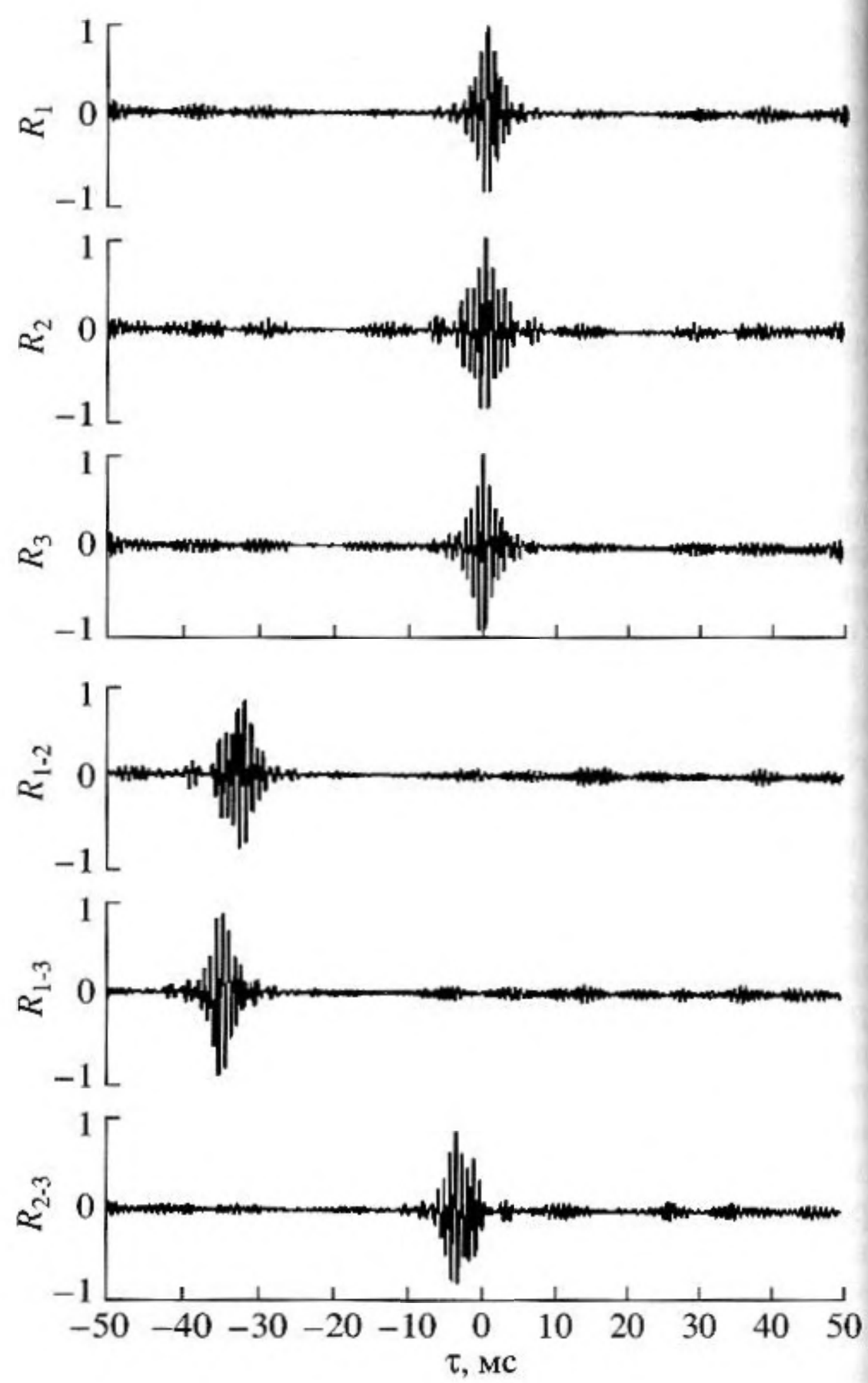

Рис. 4. Автокорреляционные и взаимнокорреляционные функции сигналов, принятых во 2-й зоне конвергенции, при неполном пространственном разрешении лучей.

Анализ данных, приведенных в таблице 1, показывает, что при практически полном пространственном разрешении сигналов по углу прихода в вертикальной плоскости коэффициенты взаимной корреляции достаточно велики и колеблются в пределах от 0.84 до 0.95, а флуктуации разностей времен прихода изменяются от 0.15 мс до 0.54 мс. При этом их величины практически не зависят ни от дистанции, ни от того, ведется ли прием сигналов на одной или на разных глубинах.

Здесь необходимо отметить, что аналогичные выводы (о большой величине коэффициента взаимной корреляции и относительно небольших флуктуациях разностей времен прихода сигналов) были сделаны и для "однолучевых" сигналов, принятых не только на разных глубинах, но и на различных дистанциях, т.е. зарегистрированных в разных зонах конвергенции [9–12].

Перейдем к рассмотрению результатов, полученных в тех случаях, когда приходящие сигналы не удается разрешить по углу, даже с помощью остронаправленных в вертикальной плоскости систем. В этих ситуациях форма главного лепестка диаграммы направленности обычно искажается: она расширяется и обычно становится несимметричной. Надежно определить количество принятых сигналов удается только по разности времен прихода. При корреляционной обработке в этих случаях возможны два варианта – частичное или полное разрешение сигналов по времени прихода. Рисунок 4 иллюстрирует первый вариант (частичного) разрешения принятых сигналов по времени прихода. На рисунке вверху приведены три автокорреляционные, а внизу – три взаимнокорреляционные функции сигналов, принятых во 2-й зоне конвергенции на дистанции 117.3 км.

Таблица 1

r, км	α_1°/h, м	α_2°/h, м	α_3°/h, м	$\lvert R\rvert$	σ_τ, мс
57.5	–11°/450	–6°/200	–7.5°/450	0.88	0.52
				0.87	0.39
				0.85	0.54
58.2	–6°/450	–8°/200	+3°/200	0.90	0.54
				0.90	0.46
				0.95	0.34
59.8	–6.5°/450	–2.5°/200	+2°/200	0.87	0.49
				0.89	0.54
				0.93	0.38
115.2	–10°/450	–7°/450		0.91	0.35
115.8	–6°/200	–2°/200		0.89	0.17
116.9	–7°/450	–3°/200		0.89	0.42
117.0	–8°/450	–6°/200	0°/200	0.87	0.38
				0.88	0.26
				0.91	0.31
117.5	–8.5°/450	–5.5°/200	–1.5°/200	0.84	0.49
				0.87	0.35
				0.95	0.15
118.2	–7°/200	–2°/200		0.91	0.35
118.5	+6°/200	–1.5°/200	–6°/200	0.91	0.31
				0.90	0.43
				0.91	0.43
119.7	+4°/200	–4°/200	0°/200	0.90	0.28
				0.89	0.30
				0.90	0.32
121.5	+1°/200	+8°/450		0.94	0.35

Форма самой верхней автокорреляционной функции, относящейся к приему на глубине 450 м под углом $\alpha_1 \cong -6.6°$, близка к автокорреляционной функции излученного сигнала. Отсюда следует, что с этого направления фактически осуществлялся "однолучевой" прием. Две другие функции автокорреляции для $\alpha_2 \cong -6.3°$ и для $\alpha_3 \cong +2°$, относящиеся к приему на глубине 200 м (особенно вторая – для α_2), имеют один, но более "размытый" корреляционный пик. Такая картина возникает в тех случаях, когда разности времен прихода сигналов, попадающих в главный лепесток диаграммы направленности антенны, оказываются меньше интервала корреляции. Естественно, что пики во взаимнокорреляционных функциях $R_{1\text{–}2}(\tau)$, $R_{1\text{–}3}(\tau)$ и $R_{2\text{–}3}(\tau)$, особенно где присутствует второй сигнал с углом прихода α_2, становятся несимметричными и по форме отличающимися друг от друга.

Второй вариант, возникающий при корреляционной обработке сигналов, которые не удается разрешить по углу, – это практически полное разрешение сигналов по времени прихода.

На рис. 5 приведены автокорреляционные (вверху) и взаимнокорреляционные (внизу) функции многолучевых сигналов, зарегистрированных в 7-й зоне конвергенции на дистанции 416 км. Он иллюстрирует оба возможных варианта корреляционного определения числа принятых сигналов, как при неполном, так и при полном разрешении их по времени прихода. Функция автокорреляции $R_1(\tau)$ относится к приему сигналов на глубине 450 м с направления $\alpha_1 = -8°$, две другие ($R_2(\tau)$ и $R_3(\tau)$) – к приему на глубине 200 м с углами прихода $\alpha_2 = -4°$ и $\alpha_3 = -1°$. По количеству и расположению корреляционных пиков видно, что в первом случае ($R_1(\tau)$) сигналы приходили по четырем лучам, три из которых хорошо разрешены во времени, а четвертый сливается с третьим; во

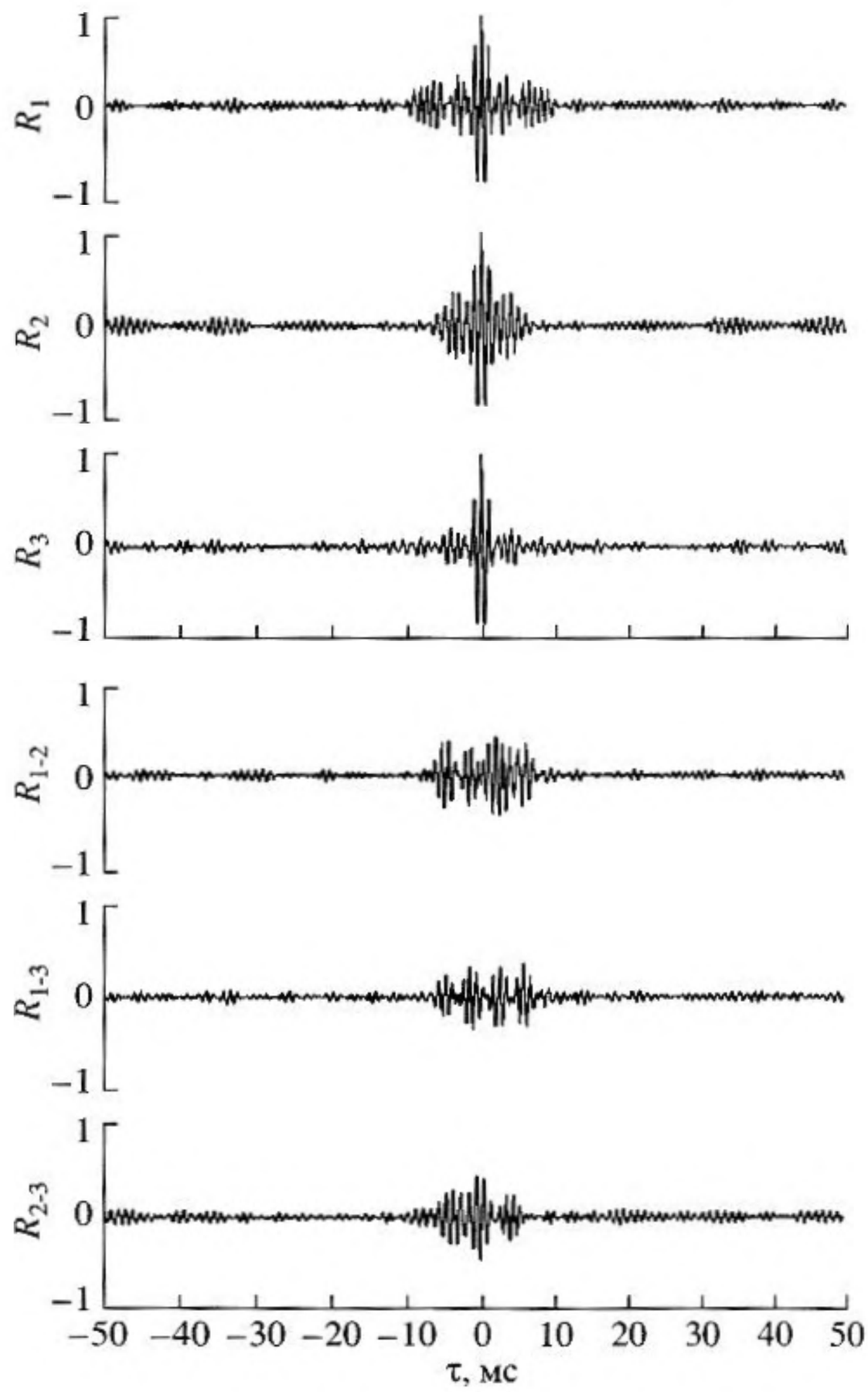

Рис. 5. Автокорреляционные и взаимнокорреляционные функции сигналов, принятых в 7-й зоне конвергенции, как при неполном, так и при полном разрешении их по времени прихода.

втором ($R_2(\tau)$) – по трем, два из которых плохо разделялись по времени (широкие максимумы); в третьем ($R_3(\tau)$) – по двум с хорошим временным разделением. В функциях взаимной корреляции $R_{1\text{-}2}(\tau)$, $R_{1\text{-}3}(\tau)$ и $R_{2\text{-}3}(\tau)$ можно увидеть несколько корреляционных максимумов. Однако отчетливо они видны только в $R_{1\text{-}3}(\tau)$, где хорошо различаются 4 корреляционных пика, указывающих на приход не менее четырех сигналов. В двух других графиках ($R_{1\text{-}2}(\tau)$ и в $R_{2\text{-}3}(\tau)$) наблюдается как полное, так и частичное разрешение сигналов по времени прихода. Таким образом, рис. 5 позволяет утверждать, что в каждый из главных лепестков диаграмм направленности попадали многолучевые сигналы, приходящие по двум-четырем лучам. Поскольку их интенсивности были сравнимы по величине, постольку соответствующие им корреляционные пики, характеризующие энергию принимаемых сигналов, практически оказались одинаковыми. Как видим, при "многолучевом" приеме наблюдается заметное снижение коэффициентов корреляции по сравнению с "однолучевым" приемом. Это связано с тем, что одни и те же сигналы, приходящие с несколько отличающимися временами, приводят к снижению величины каждого отдельного пика, поскольку они при корреляционной обработке являются своего рода помехой. Такая своеобразная помеха обычно называется "сигнальной помехой". Именно поэтому максимальные значения коэффициентов корреляции в данном случае не превышали 0.5.

В таблице 2 приведены результаты измерений взаимнокорреляционных функций при "многолучевом" приеме в 1-й и 2-й зонах конвергенции, а в таблице 3 представлены результаты для 7-й зоны конвергенции. В трех первых столбцах, как и раньше, указаны: дистанция r между точками излучения и приема, углы прихода сигналов α_1, α_2 и глубины h, на которых они принимались. В предпоследнем столбце таблицы приводятся величины наибольших корреляционных максимумов $/R/_{\max}$ (вверху) и побочных пиков $/R/$ (ниже). В последнем столбце, как и раньше, приведены среднеквадратичные значения флуктуаций разностей времен прихода σ_τ. Жирным шрифтом выделены результаты измерений, которые были описаны выше и представлены на рис. 4 и 5.

Представленные материалы, полученные в Канарском районе Атлантического океана, подтверждают сделанные ранее выводы [9–12] о том, что флуктуации разностей времен прихода сигналов, даже включая ошибки измерений, практически совпадают с теоретическими оценками [13], которые связывают их с влиянием неоднородностей водной толщи. Коэффициенты взаимной корреляции сигналов, принятых остронаправленными антеннами на различных горизонтах, отличающихся на несколько сотен метров (максимальное разнесение остронаправленных антенн при работах в других районах Мирового океана достигало 1200 м), могут быть достаточно большими, особенно при хорошем угловом разрешении лучей в вертикальной плоскости (в рассматриваемом случае, например, в 1-й и 2-й зонах конвергенции – до 0.95). Таким образом, вертикальный интервал корреляции может достигать сотен и даже тысяч длин звуковой волны. Такие выводы существенно отличаются от выводов, сделанных на основании экспериментов, проведенных в глубоком океане с помощью ненаправленных гидрофонов (см., например, [14]). Они показали, что вертикальный и горизонтальный интервал корреляции обычно лежат в пределах примерно 10λ и 100λ (λ – длина звуковой волны). На самом же деле такие, в общем-то, относительно небольшие интервалы корреляции не связаны

Таблица 2

r, км	α_1°/h, м	α_2°/h, м	$\frac{/R/_{max}}{/R/}$	σ_τ, мс	r, км	α_1°/h, м	α_2°/h, м	$\frac{/R/_{max}}{/R/}$	σ_τ, мс
60.2	+7°/200	+2°/200	0.83	0.36	117.0	–9°/450	–6°/200	0.64	0.31
			0.42	0.23				0.52	0.31
60.2	+2°/200	–2°/200	0.84	0.28	117.0	–8°/450	–1°/200	0.79	0.49
			0.47	0.36				0.30	0.44
66.6	+7.5°/200	+7°/450	0.74	0.24	117.3	–6.6°/450	+2°/200	0.87	0.38
			0.32	0.56	117.3	–6.6°/450	–6.3°/200	0.79	0.32
			0.47	0.51				0.44	0.43
68.5	+7°/450	+3°/450	0.79	0.41	117.3	–6.3°/200	+2°/200	0.81	0.37
			0.26	0.96				0.46	0.32
69.0	+11°/450	+7°/450	0.68	0.26	120.5	+6°/450	–7°/200	0.79	0.27
			0.62	0.38				0.31	0.46
			0.53	0.38	120.9	+6°/200	–6°/200	0.66	0.49
69.0	–11°/450	+7°/450	0.53	0.59				0.46	0.42
			0.47	0.50	120.9	–6°/200	+2.5°/200	0.64	0.50
115.2	–7.5°/450	–1°/200	0.57	0.27				0.45	0.36
			0.34	0.26	122.5	+2°/200	–0.5°/200	0.77	0.35
			0.32	0.29				0.40	0.62
115.2	–8°/450	–2°/200	0.66	0.34	122.8	–10.5°/450	+7.5°/450	0.50	0.69
			0.51	0.50				0.33	0.26
115.5	–5°/200	0°/200	0.66	0.23	123.4	+11°/450	+8.5°/450	0.56	0.27
			0.32	0.33				0.40	0.24
116.5	–7.5°/450	–5.5°/200	0.72	0.49	130.2	+10°/450	–10°/450	0.45	0.71
			0.60	0.50				0.37	0.62
116.5	–7°/200	–2°/200	0.66	0.50	132.4	+10°/450	–10°/450	0.46	0.56
			0.55	0.13				0.34	0.70
116.7	–7°/200	–3°/200	0.66	0.22	132.6	+10°/450	–7°/200	0.60	0.24
			0.40	0.12				0.40	0.58

Таблица 3

r, км	α_1°/h, м	α_2°/h, м	$\frac{/R/_{max}}{/R/}$	σ_τ, мс	r, км	α_1°/h, м	α_2°/h, м	$\frac{/R/_{max}}{/R/}$	σ_τ, мс
415.8	–3.5°/200	+1.5°/200	0.62	0.39	416.0	–8°/450	–4°/200	0.53	0.25
			0.43	0.45				0.39	0.22
415.9	–8°/450	–5°/200	0.68	0.33				0.31	0.30
			0.27	0.21				0.26	0.25
415.9	–5°/200	0°/200	0.59	0.68	416.0	–8°/450	–1°/200	0.39	0.32
			0.49	0.27				0.35	0.40
415.95	+2°/200	–5°/200	0.63	0.21				0.27	0.46
			0.39	0.25				0.24	0.48
415.95	+2°/200	–2°/200	0.59	0.31	416.0	–4°/200	–1°/200	0.51	0.51
			0.47	0.38				0.30	0.45
415.95	–5°/200	–2°/200	0.72	0.16				0.26	0.38
			0.51	0.0					

с изменениями структуры отдельных сигналов, распространяющихся по различным лучам, а обусловлены имеющейся в волноводах многолучевостью. Она существенно уменьшает взаимную корреляцию сигналов при пространственном разнесении точек приема. Поэтому решающим фактором, снижающим коэффициент корреляции между сигналами, принятыми антеннами, является плохое разрешение лучей.

Таким образом, результаты экспериментов с использованием остронаправленных (~2°) в вертикальной плоскости антенн, проведенных в раз-

личных районах Мирового океана [9–12] на разных расстояниях и на разных горизонтах, в том числе и представленные выше, показали, что основной причиной раскорреляции сигналов является неполное разрешение многолучевых сигналов по углу прихода в вертикальной плоскости. Поэтому для сигналов, не отражающихся от границ волновода, после устранения многолучевости интервалы пространственной корреляции по вертикали достигают практически толщины волновода, а по горизонтали – превышают десятки и сотни километров.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 03-02-16565) и гранта Минпромнауки НШ-1277.2003.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Czenszak S.P., Krolik J.L.* Robust wideband match-field processing with a short vertical array // J. Acoust. Soc. Amer. 1997. V. 101(2). P. 749–759.
2. *Orris G.J., Nicholas M., Perkins J.S.* The matched – phase coherent multi-frequency matched-field processor // J. Acoust. Soc. Amer. 2000. V. 107(5). P. 2563–2575.
3. *Spiesberger J.L.* The matched-lag filter: Detecting broadband multipath signals with auto- and cross-correlation functions // J. Acoust. Soc. Amer. 2001. V. 109(5). P. 1997–2007.
4. *Soares C., Jesus S.M.* Broad-band match-field processing: Coherent and incoherent approaches // J. Acoust. Soc. Amer. 2003. V. 113(5). P. 2587–2598.
5. *Beron-Vera F.J., Brown M.G.* Ray stability in weakly range-dependent sound channels // J. Acoust. Soc. Amer. 2003. V. 114(1). P. 123–130.
6. *Brown M.G., Colosi J.A., Tomsovic S., Virovlyansky A.L., Wolfson M.A., Zaslavsky G.M.* Ray dynamics in long-range deep ocean sound propagation // J. Acoust. Soc. Amer. 2003. V. 113(5). P. 2533–2547.
7. *Wolfson M.A., Tomsovic S.* On the stability of long-range sound propagation through a structured ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 2001. V. 109(1). P. 2693.
8. *Макс Ж.* Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. Т. 2. С. 56. // М., "Мир", 1983, 256 с.
9. *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.
10. *Галкин О.П., Панкова С.Д.* Влияние неоднородностей океанической среды на взаимнокорреляционную функцию принятых сигналов // Вопр. судостроения. Сер. Акустика. 1982. № 15. С. 13–17.
11. *Галкин О.П., Панкова С.Д.* Пространственная корреляция гидроакустических сигналов в двухосевом подводном звуковом канале // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 4. С. 467–472.
12. *Галкин О.П., Панкова С.Д.* Корреляционные характеристики и разности времен распространения гидроакустических сигналов при направленном приеме на разных горизонтах // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 4. С. 481–488.
13. *Кузнецова Н.Г., Чернов Л.А.* Флуктуации угла прихода луча и времени распространения сигнала по лучу в случайно-неоднородной среде // Вопр. судостроения. Сер. Акустика. 1982. Вып. 15. С. 5–13.
14. *Carey W.M.* The determination of signal coherence length based on signal coherence and gain measurements in deep and shallow water // J. Acoust. Soc. Amer. 1998. V. 104(2). P. 831–837.

Correlation Characteristics of Pseudonoise Signals in the Ocean at a Highly-Directional Reception

O. P. Galkin and S. D. Pankova

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

e-mail: bvp@akin.ru

Abstract—Data of experiments with single-path and multipath reception of broadband continuous pseudonoise acoustic signals (0.8–1.3 kHz) in a deep ocean are discussed. The experiments were carried out on tracks from ~ 60 to ~ 420 km in length, which corresponds to the first seven convergence zones. The data on the cross-correlation coefficients and arrival time differences are presented (for the first, second, and seventh zones) for signals received by one highly-directional (~2°) vertical array or by two such arrays simultaneously at depths of 200 and 450 m. The correlation characteristics of signals propagating over purely water paths, i.e., without reflections from the waveguide boundaries and arriving under different angles in the vertical plane are compared. It is found that the origin of the decorrelation of signals received from various directions or at different depths (all other factors being the same) is the incomplete resolution of the received multipath signals in the arrival angle in the vertical plane.