АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 38 1992 Вып. 1

УДК 534.24; 534.883
© 1992 г.

Д.А. Пискунов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ИСТОЧНИКА В УСЛОВИЯХ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО КАНАЛА

В статье представлены результаты спектрально-корреляционного анализа экспериментальных данных, полученных во время экспериментов по исследованию пространственно-временной структуры звукового поля подповерхностного источника в условиях приповерхностного канала. Описана методика спектрально-корреляционного анализа экспериментальных данных, по результатам которого построен горизонтальный разрез временной структуры звукового поля для дистанций от 22 до 110 километров. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных данных.

Различным вопросам исследования пространственно-временной структуры звуковых полей, формирующихся при многолучевом распространении в слоистом океане, уделяется большое внимание в научной литературе. В [1, 2] исследуются статистические свойства флуктуаций угла прихода, времени распространения и интенсивности звука, связанных с многократными отражениями отдельных лучей от взволнованной поверхности. В [3] исследование основано на представлении среды распространения как фильтра, линейного относительно передаваемых сигналов. В этом случае как детерминированные, так и случайные параметры морской среды могут быть учтены при задании импульсной или передаточной характеристик фильтра, устанавливающих соответствие между его входом и выходом. Работы [4, 5] посвящены исследованию пространственной когерентности и корреляционной структуры многолучевых звуковых полей и их зависимости от статистических параметров взволнованной поверхности. Ряд работ [6–11] посвящен экспериментальным исследованиям пространственно-временной структуры и идентификации на ее основе акустических лучей.

Определенный интерес представляет экспериментальное исследование горизонтальных разрезов пространственно-временной структуры звукового поля и степени ее согласования с данными предварительных расчетов. Отметим, что имеется немного работ, описывающих подобные исследования. В [12] исследуется горизонтальный разрез временной структуры сигналов, распространяющихся в однородном по трассе подводном звуковом канале. В [13] проведен анализ многолучевого распространения на неоднородной трассе, включающей районы континентального склона, континентального шельфа и глубокого океана.

В данной работе представлены результаты спектрально-корреляционного анализа экспериментальных данных, полученных во время экспериментов по исследованию горизонтального разреза пространственно-временной структуры звукового поля подповерхностного шумового источника в условиях приповерхностного звукового канала. Эксперименты проводились в марте 1990 г. в Тихом океане в глубоководном районе восточнее полуострова Камчатка. По результатам обработки экспериментальных данных построен горизонтальный разрез временной структуры звукового поля для дистанций от 22 до 110 км и дано сравнение экспериментальных и расчетных данных.

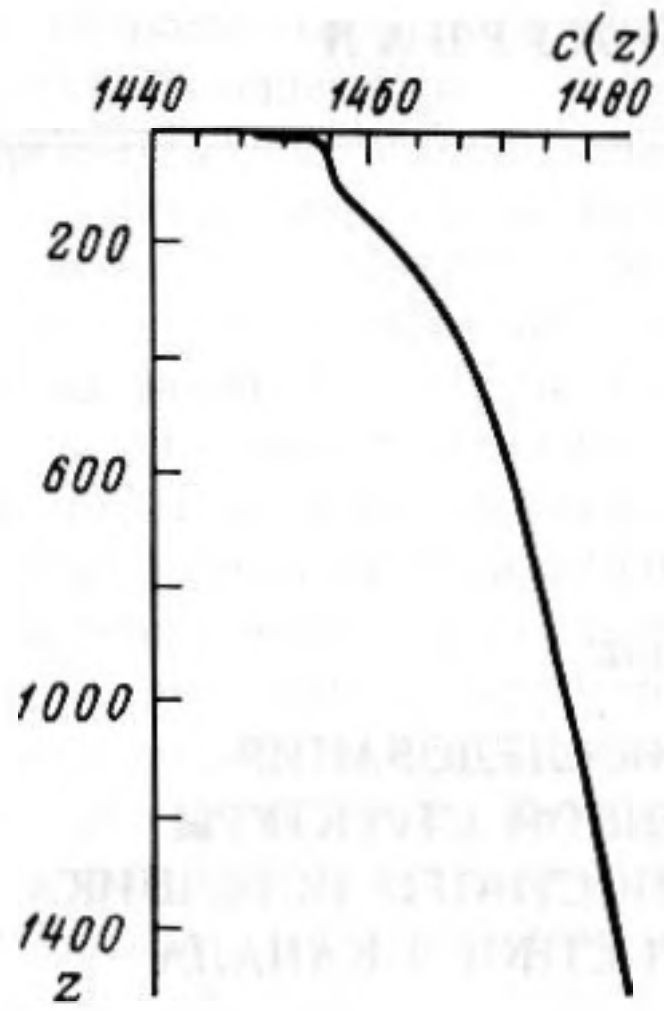

Рис. 1. Зависимость скорости звука от глубины

Район проведения работ характеризовался зимними условиями распространения звука, когда верхний слой воды еще не прогрет и температура до глубин порядка 100 м практически постоянна. На рис. 1 приведена зависимость скорости звука от глубины $C(Z)$ для данного района. Глубина места была больше 4000 м. При данном профиле скорости звука наблюдается положительная рефракция звука от поверхности до дна. Сигналы от приповерхностного источника в этом случае претерпевают многократные отражения от поверхности, что приводит к появлению флуктуаций, связанных с морским волнением. Зональная картина распространения в данных гидрологических условиях отсутствует и горизонтальный разрез звукового поля характеризуется сплошной освещенностью. Состояние поверхности моря на время проведения экспериментов менялось от 1 до 3 баллов, ветер – до 3 м/с. Кроме ветрового волнения практически всегда наблюдалась зыбь 3–4 балла.

Сигналы от излучателя, который буксировался на глубине 50 м со скоростью 9 узлов и излучал псевдошумовой сигнал в полосе частот от 2,4 до 3,4 кГц, регистрировались на приемном судне с помощью жесткой эквидистантной вертикальной антенны, имеющей 64 фазовых центра, каждый образованный из двух параллельно включенных гидрофонов. Расстояние между этими гидрофонами равнялось 16 см; расстояние между фазовыми центрами – 32 см. Расположение антенны в пространстве отслеживалось специально разработанной системой, в которую входили глубиномер, компас и измерители крена и дифферента.

После предварительного усиления сигналы поступали в аппаратуру формирования статического веера диаграмм направленности. Сигналы с выходов 20 лепестков статического веера, перекрывающих с шагом 1,5° сектор обзора –15° ... +13,5° в вертикальной плоскости, записывались на многоканальный магнитофон. Ширина диаграммы направленности каждого лепестка по уровню 0,7 на частоте 3 кГц составляла 1,5°. Угловая структура звукового поля в секторе ± 24° отображалась в виде гистограммы на экране индикатора.

Информация, записанная на многоканальный магнитофон, была подвергнута спектрально-корреляционному анализу на структурном динамическом анализаторе HP-5423A, который представляет собой двухканальную многофункциональную специализированную ЭВМ, позволяющую в реальном масштабе времени измерять характеристики исследуемых процессов во временной и частотной областях. Принцип работы анализатора основан на 512-точечном быстром преобразовании Фурье транспонированного в низкочастотную область заданного оператором участка спектра исследуемых процессов. Графики исследуемых функций и их численные параметры отображаются на экране дисплея и на графическом плоттере.

Обработка записанной информации состояла в измерении взаимно корреляционных

функций между сигналами в различных каналах веера с целью определения временных задержек между сигналами, распространяющимися по отдельным лучам или конгруэнциям (при невозможности пространственного разрешения отдельных лучей).

В связи со сложной многолучевой структурой сигналов, многократно отраженных от взволнованной поверхности океана, измерение взаимно корреляционных функций в отдельные моменты времени не всегда позволяет уверенно определять интересующие обработчика временные задержки. В такой ситуации помогает так называемый "водопадный" режим измерения [10, 14], при котором измерения проводятся непрерывно в реальном масштабе времени, а графики измеренных функций последовательно выводятся друг под другом. Трассовый эффект, проявляющийся в таком режиме вывода, взаимно корреляционных функций позволяет определить временные задержки при меньших выходных отношениях сигнал/помеха, а также дает наглядную картину изменчивости временной структуры исследуемых процессов. Например, если корреляционный пик представляет собой локальный максимум взаимно корреляционной функции и имеет амплитуду на уровне или даже ниже уровня шумового фона, то на отдельном графике отличить его от шумов и идентифицировать с временной задержкой как правило нельзя, в то время как использование "водопадного" режима вывода может позволить проявить его с помощью трассового эффекта.

При выборе пар каналов веера, между сигналами которых измерялись взаимно корреляционные функции, использовались результаты предварительных расчетов звуковых полей, выполненных по программе В.П. Тебякина, а также сканограммы угловых структур, полученные в ходе эксперимента. В качестве опорного выбирался как правило луч с наименьшим временем распространения и претерпевший наименьшее количество отражений от поверхности. Такие лучи, имеющие при данных гидрологических условиях самые крутые углы прихода со стороны дна (лучи, отразившиеся от дна, не принимались во внимание из-за малых факторов фокусировки), достаточно уверенно определялись на экспериментальных сканограммах до дистанций порядка 80 км. Отметим, что экспериментальные угловые спектры имели в секторе обзора колоколообразную форму, и подчас эти лучи не разрешались на сканограмме в общепринятом смысле (например, по критерию Рэлея [15]). В таких случаях максимальные значения угла прихода определялись по характерному спаду в угловом спектре. На дистанциях свыше 80 км экспериментальные угловые спектры характеризовались сплошной освещенностью в секторе $\pm 16^\circ$. Поэтому здесь в качестве опорных выбирались несколько лучей в некотором секторе углов, определяемом исходя из предварительного расчета звукового поля. С выбранным таким образом опорным каналом измерения осуществлялся перебор остальных каналов веера.

Отметим, что поиск и правильный выбор опорного канала измерения является весьма важным этапом в процессе корреляционного анализа многолучевых сигналов. Это связано со следующими обстоятельствами.

Во-первых, правильный выбор опорного канала измерения связан с поиском и выбором лучей с наименьшим временем распространения. В результате задержки распространения всех остальных лучей относительно такого самого "быстрого" луча получаются положительными.

Второе обстоятельство вытекает из первого: при положительных задержках отпадает необходимость поиска отрицательных задержек, что по крайней мере вдвое сокращает время обработки.

Третье обстоятельство состоит в том, что часто расчетную временную структуру удобно строить относительно именно таких самых "быстрых" лучей. Поэтому правильный выбор опорного канала измерения при первичной обработке экспериментальных данных облегчит последующий анализ, который в данном случае состоял в сравнении измеренных и ожидаемых по расчету угловых и временных структур звуковых полей и выявлении степени их соответствия.

Экспериментальные и расчетные временные и угловые структуры звуковых полей представлены на рис. 2–5.

Рассмотрим данные об угловой структуре. Они отображены на рис. 2. Пунктиром

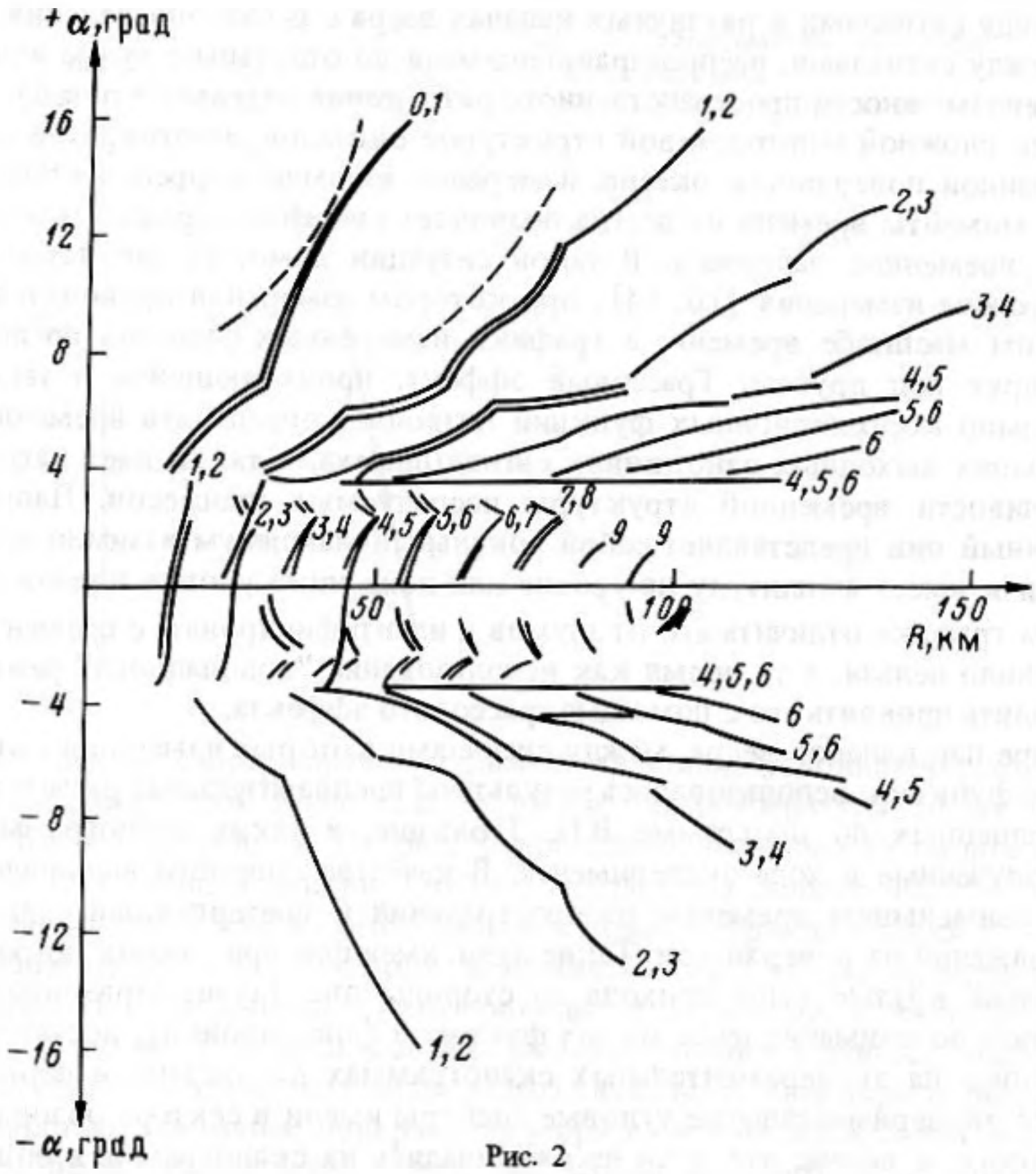

Рис. 2

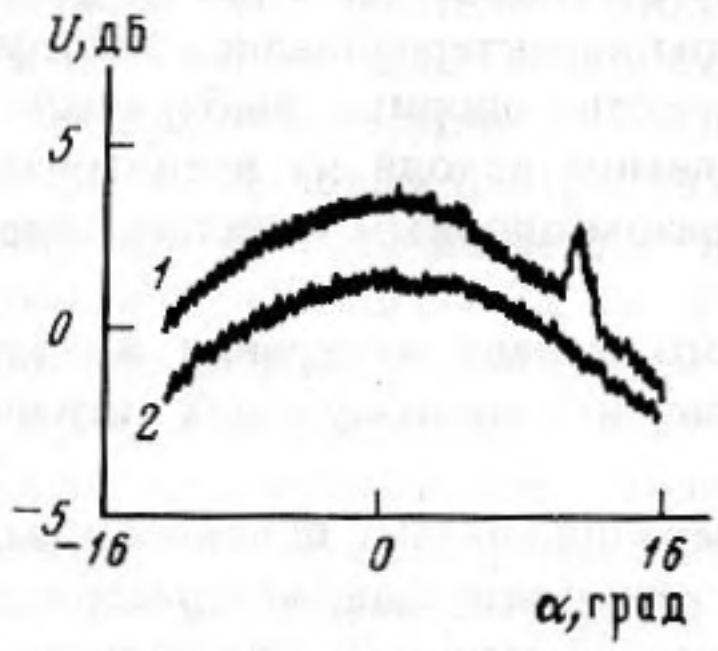

Рис. 3

Рис. 2. Угловая структура звукового поля: пунктир – эксперимент, сплошная линия – расчет (лучам, пришедшим со стороны дна, соответствуют положительные углы)

Рис. 3. Типичный вид экспериментальных угловых спектров. Дистанция R = 42 км. *1* – при включенном источнике сигнала; *2* – при выключенном источнике сигнала

нанесены экспериментальные данные, усредненные за время $T_у$ = 2 мин. Цифры около расчетных кривых (сплошные линии), отображающих расчетную угловую структуру, означают количество отражений от поверхности для различных конгруэнций. Линии на рис. 2, обозначенные сразу несколькими цифрами, соответствуют лучам, претерпевшим согласно расчету различное число отражений (указанное этими цифрами), но при этом пришедшим в точку приема под одинаковыми (или очень близкими) углами. В основном – это так называемые "сдвоенные" лучи с симметричными относительно горизонта углами выхода из источника. При этом луч, вышедший вверх, после отражения от поверхности, которое в силу положительной рефракции и наличия слоя скачка градиента скорости звука происходит вблизи точки излучения, быстро сливается с лучом, вышедшим вниз от горизонта. Далее такие лучи идут практически по одина-

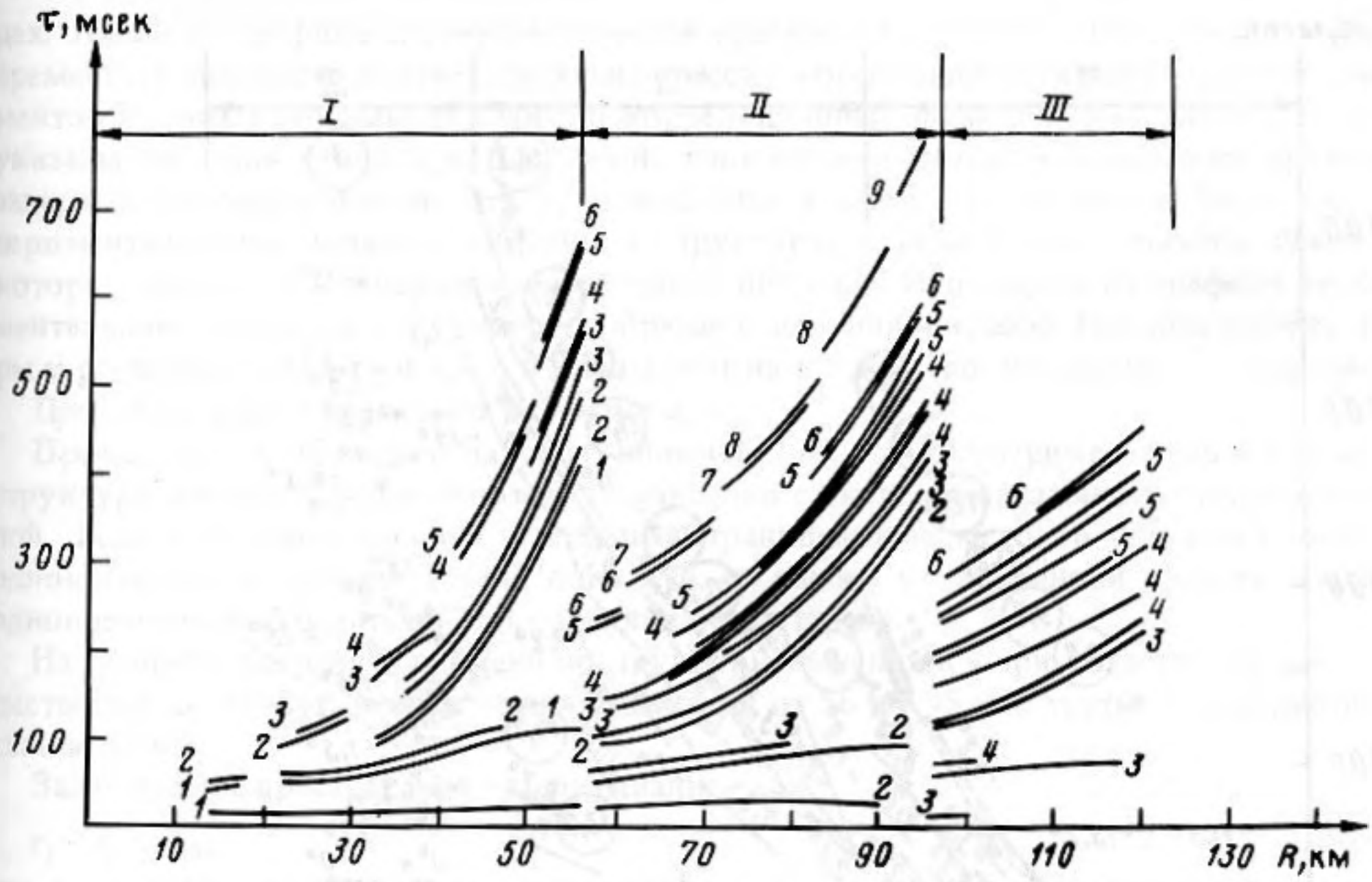

Рис. 4. Временная структура звукового поля. Расчет

ковым траекториям. Как видно, ожидаемая по расчету угловая структура характеризуется наличием множества лучей в секторе ± 16°. Наибольшее количество лучей сконцентрировано в секторе ± 6°. Две экспериментальные кривые на рис. 2 можно отнести к конгруэнциям лучей с наибольшим циклом. На дистанциях до 50 км – это чисто водные лучи и сдвоенные с ними лучи, однократно отразившиеся от поверхности вблизи точки излучения. На дистанциях от 50 до 80 км – это однократно отраженные и сдвоенные с ними двухкратно отраженные лучи. Как видно из рис. 2, для этих лучей расхождение с расчетом не превышает трех градусов, причем наклон экспериментальных кривых в среднем близок к расчетному, а экспериментальные значения углов всегда больше расчетных, что говорит о наличии статической ошибки между расчетом и экспериментом. На дистанциях свыше 80 км, как уже отмечалось выше, экспериментальная угловая структура звукового поля характеризовалась сплошной освещенностью с колоколообразной формой углового спектра и отдельные лучи не разрешались.

Таким образом, в процессе совместного анализа экспериментальных и расчетных угловых структур звуковых полей идентифицированы (согласованы с расчетом) лишь лучи с максимальным циклом, обозначенные на рис. 2 как 0,1 и 1,2. Но это не означает, что ими (этими лучами) исчерпывается измеренная лучевая структура. Угловые распределения звукового поля, как расчетные, так и полученные в ходе экспериментов, имеют, как уже отмечалось, колоколообразные огибающие с максимумом интенсивности в области пологих углов прихода. На фоне этой огибающей согласно расчету как правило выделяется дополнительный максимум в области положительных углов (снизу от горизонта приема), соответствующий лучу с максимальным циклом. На экспериментальных сканограммах такой луч устойчиво наблюдался до дистанций порядка 80 км. Последующий взаимно корреляционный анализ подтвердил правильную идентификацию этого луча. На больших дистанциях (до 94 км) луч с максимальным циклом удавалось обнаружить лишь при анализе во временной области. Именно поэтому на рис. 2 в данных об измеренной угловой структуре (две пунктирные кривые) отражена информация лишь об отдельно выделенных лучах с наибольшим циклом на дистанциях до 80 км, идентифицированных уже на уровне сравнения расчетных и экс-

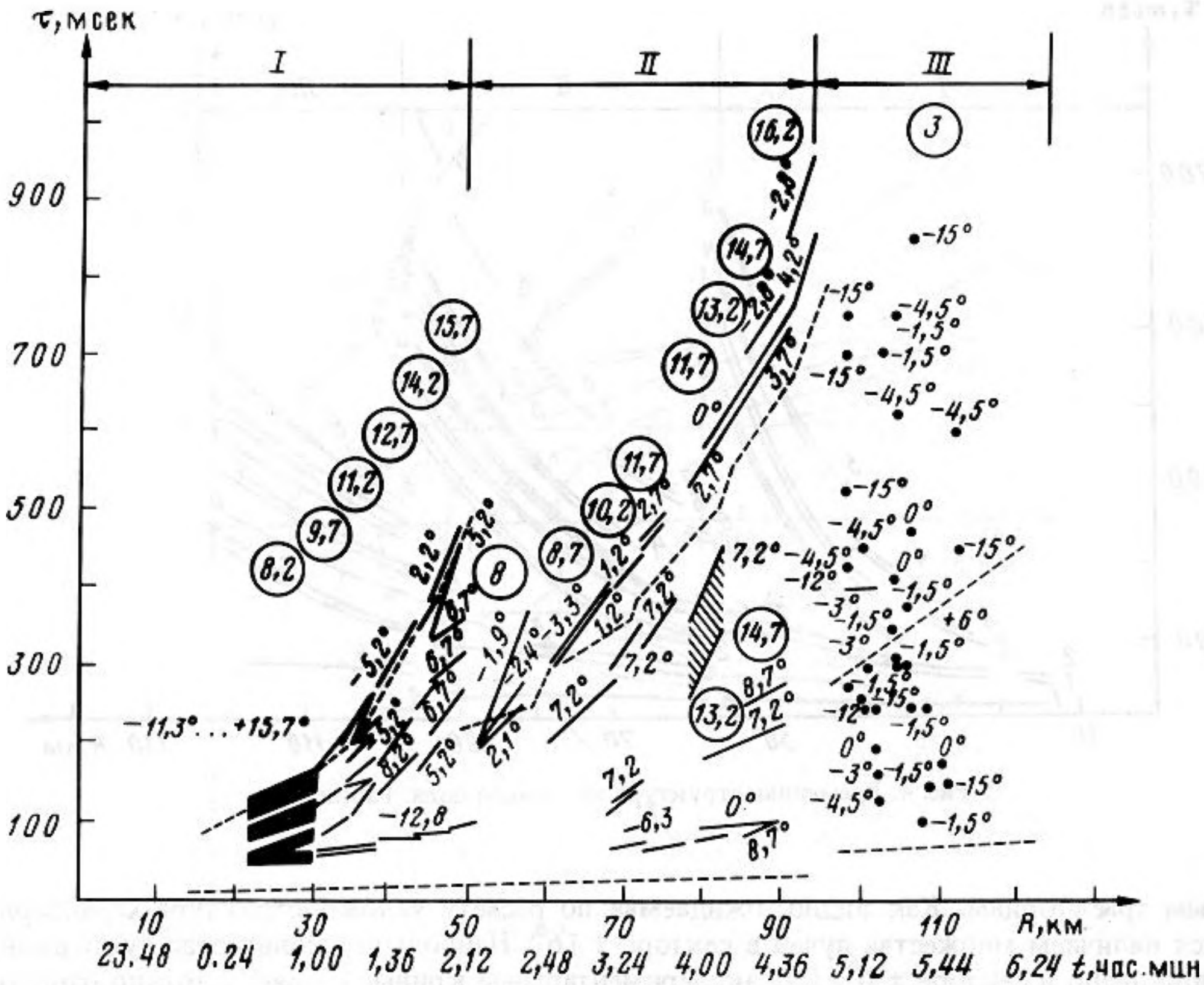

Рис. 5. Временная структура звукового поля: сплошная линия – эксперимент, пунктир – верхняя и нижняя границы расчета

периментальных данных только по угловым распределениям интенсивности звукового поля. Информация об измеренном угловом распределении во всем секторе обзора приемной системы не отражена на рис. 2, поскольку измеренный угловой спектр, как уже отмечалось, характеризовался сплошной освещенностью в секторе обзора ± 16° и отдельные лучи (кроме лучей с наибольшим циклом) не выделялись.

В качестве примера на рис. 3 (кривая *1*) приведена типичная экспериментальная сканограмма (в данном случае дистанция R = 42 км, время усреднения Δt = 2 мин), по которой видно, что огибающая углового распределения звукового поля в точке приема действительно имеет колоколообразную форму, а в области положительных углов (в данном случае α = 12,7°) выделяется дополнительный максимум, соответствующий лучу с наибольшим циклом. Отметим также, что угловое распределение шумов моря для данной гидрологии также имеет колоколообразную огибающую с максимумом в области пологих углов. Это подтверждается экспериментальной сканограммой, снятой в режиме паузы (отсутствия излучения) и отражающей угловое распределение шумов моря (см. рис. 3, кривая *2*). Если не принимать во внимание прохождение звуковой энергии через боковое поле диаграммы направленности, то подъем кривой *1*, соответствующей режиму излучения, над кривой *2*, соответствующей шумам моря, говорит о наличии звуковой энергии излученного сигнала во всем секторе обзора веера. При учете прохождения через боковое поле изменится лишь кривизна огибающей, но ее форма качественно останется прежней.

Теперь рассмотрим экспериментальную временную структуру и ее согласование с расчетной (рис. 4, 5). По оси абсцисс на графиках, отображающих временную структуру, отложена дистанция в км, а для экспериментальной временной структуры (рис. 5) – текущее судовое время. По оси ординат отложена временная задержка в миллисекун-

дах. Линии на графике экспериментальной временной структуры отображают значения временных задержек, соответствующих трассам корреляционных пиков, снятых с фрагментов водопадного вывода взаимно корреляционных функций. В кружках в градусах указаны значения углов прихода лучей, относительно которых измерялась временная задержка распространения. Эти лучи выбирались в качестве опорных. Числа над экспериментальными линиями временной структуры означают углы прихода лучей, для которых измерялась задержка относительно опорных. Пунктиром на графике экспериментальной временной структуры отображены верхняя и нижняя границы расчета. Цифры у расчетных кривых на рис. 4 указывают на количество отражений от поверхности.

Проведем анализ временной структуры.

Прежде всего обращает на себя внимание то, что экспериментальная временная структура является более богатой в сравнении с экспериментальной угловой структурой. Если в угловом спектре с помощью традиционных методов удавалось выделить одновременно в лучшем случае один луч, то анализ во временной области позволил одновременно наблюдать до 16 корреляционных пиков.

На графике расчетной временной структуры выделяются три области: первая – для дистанций до 56 км, вторая – для дистанций от 56 до 95 км, третья – для дистанций свыше 95 км.

Задержки распространения рассчитывались как

$$\tau_i = t_i - T_0,$$

где i – количество отражений от поверхности, τ_i – задержка распространения i-го луча относительно опорного, t_i – время распространения i-го луча, T_0 – время распространения опорного луча.

Для всех трех областей временная задержка была рассчитана относительно лучей с минимальным временем распространения. Для первой области $T_0 = t_0$, т. е. это чисто водные лучи, для второй области $T_0 = t_1$ – это лучи, претерпевшие однократное отражение, а в третьей области $T_0 = t_2$ – это лучи, двукратно отразившиеся от взволнованной поверхности. Отметим что лучи, претерпевшие однократное отражение, по расчету существуют и за пределами второй области, т. е. на дистанциях свыше 95 км, однако их углы прихода на антенну выходят за сектор обзора статического веера, а факторы фокусировки становятся малыми, поэтому в качестве опорных в третьей области выбраны двукратно отраженные лучи.

На графике экспериментальной временной структуры (рис. 5) также выделяются три области: первая – для дистанций до 50 км, вторая – для дистанций от 50 до 94 км, третья – для дистанций свыше 94 км.

Для первой и второй областей, т. е. для дистанций до 94 км, в качестве опорных выбраны лучи с максимальным циклом (среди лучей с достаточным для измерения фактором фокусировки). Эти лучи соответствуют кривым экспериментальной угловой структуры на рис. 2. Как уже отмечалось, они имеют наименьшее время распространения, поэтому, как и в расчетной временной структуре, все задержки получаются положительными. Отметим, что для выбранных по приведенной выше методике опорных лучей в качестве проверки осуществлялся также поиск и в области отрицательных задержек, которые, как и ожидалось, не были выявлены.

Как в расчетной, так и в экспериментальной временной структурах задержки увеличиваются с ростом дистанции внутри указанных областей. Внутри этих областей увеличивается с ростом дистанции и градиент временной задержки.

Максимальное значение задержки практически всегда выше расчетного. В первой области, т. е. на дистанциях до 50 км, относительное отклонение от расчета по максимальной задержке, $\delta_\tau(R)$, не превышает 18%, а относительное отклонение по дистанции, $\delta_R(\tau)$, не превышает 6%. Во второй области, т. е. на дистанциях до 94 км, относительное отклонение не превышает 26% по максимальной задержке и 9% по дистанции. Относительное отклонение считалось, как отношение разницы между экспериментальным и расчетным значениями к расчетному:

$$\delta_\tau(R) = (|\tau_э - \tau_р|/\tau_р) \cdot 100\%, \quad \delta_R(\tau) = (|R_э - R_р|/R_р) \cdot 100\%,$$

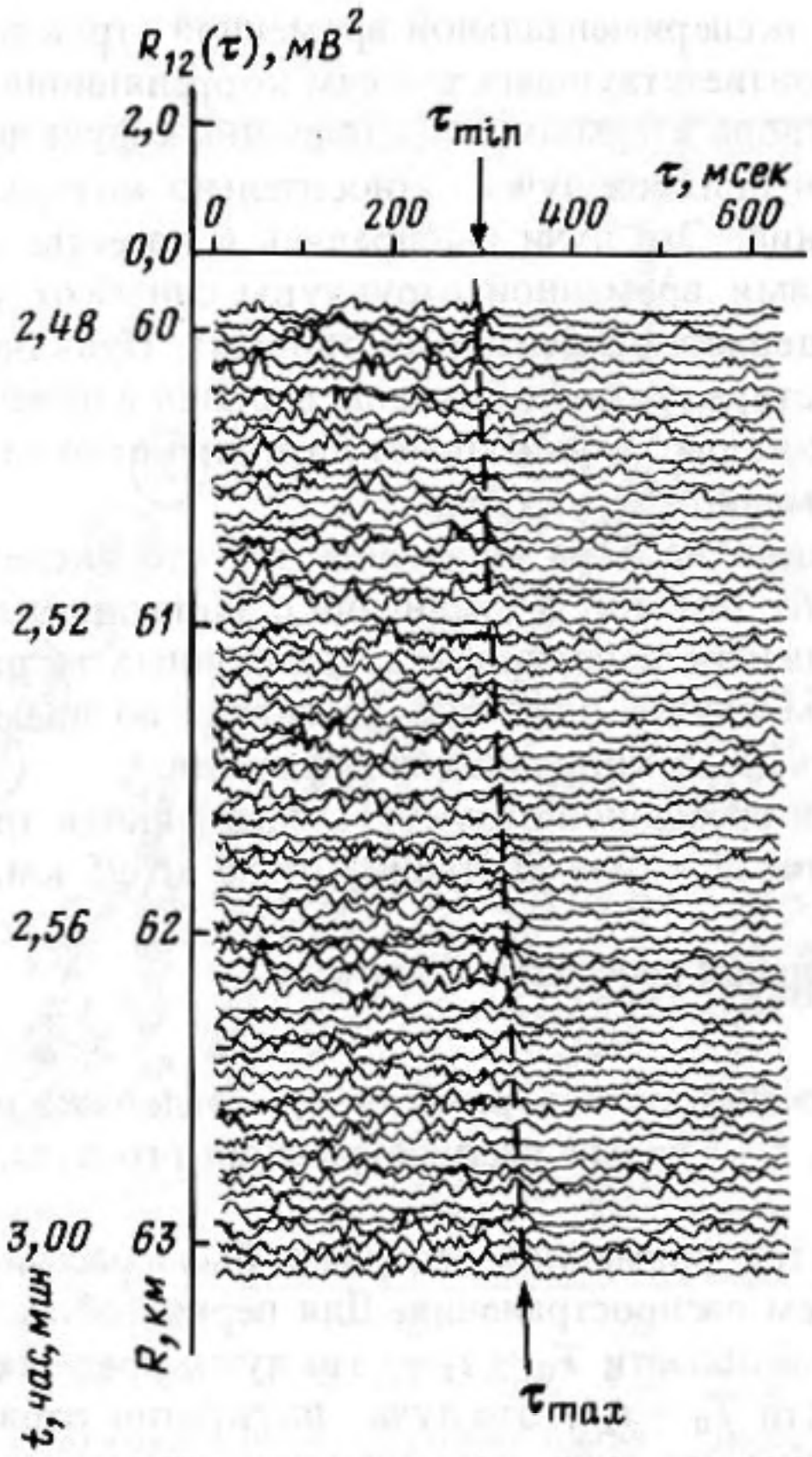

Рис. 6. Фрагмент водопадного вывода огибающей взаимно-корреляционной функции между сигналами в каналах веера −3,3° и +8,7°. Время усреднения $\Delta t = 70$ с, $\tau_{min} \approx 30$ мс, $\tau_{max} \approx 345$ мс

где $\delta_\tau(R)$ – относительное отклонение по задержке распространения по заданной дистанции R, $\delta_R(\tau)$ – относительное отклонение по дистанции при заданной величине задержки τ, $\tau_э$ – максимальная временная задержка, измеренная на дистанции R, $\tau_р$ – максимальная временная задержка, ожидаемая на дистанции R по расчету, $R_э$ – истинная дистанция, на которой в эксперименте измерена задержка $\tau_э$, $R_р$ – дистанция, на которой по расчету ожидается наличие максимальной задержки $\tau_э$.

Градиент максимального значения задержки распространения в среднем близок к расчетному, хотя имеются трассы с градиентом задержки, существенно отличающимся от расчетного.

Для дистанций от 50 до 94 км наблюдается сильная изменчивость временной структуры звукового поля во времени и хаотичность местоположения отдельных корреляционных пиков. Однако при этом на фрагментах водопадного вывода взаимно корреляционных функций ярко выражена широкая область, внутри которой огибающая взаимно корреляционной функции выделяется над шумовым фоном. Внутри этой области отдельные трассы корреляционных пиков существуют лишь короткое время порядка 30 с. Верхняя граница этой области дает информацию о максимальной временной задержке, присутствующей на заданной дистанции. Такие задержки являются наиболее информативными для решения обратной задачи целеуказания. Именно они отображены на графике экспериментальной временной структуры для дистанций от 50 до 94 км. Пример характерной изменчивости временной структуры на этих дистанциях приведен на рис. 6, где изображен фрагмент водопадного вывода взаимно корреляционной функции между сигналами в каналах веера +8,7° и −3,3° для дистанций

от 60 до 63 км. Взаимно корреляционные функции, построенные на рис. 6, усреднены по интервалу времени Δt = 70 см, значение которого выбрано эмпирически с целью повышения отношения сигнал/шум. При указанном времени усреднения на данной дистанции наилучшим образом выделяется область наличия корреляционных пиков, о которой говорилось выше.

На других дистанциях время усреднения также выбиралось исходя из наилучшего выделения отдельных трасс корреляционных пиков (на дистанциях до 50 км) или трасс верхней границы области временных задержек, где они присутствуют (на дистанциях 50–94 км). При этом Δt менялось в зависимости от дистанции в пределах от 10 до 70 с. Метод определения трассы верхней границы временных задержек пояснен на рис. 6.

Третья область на графике экспериментальной временной структуры (рис. 5) для дистанций свыше 94 км характеризуется тем, что лучи с максимальным циклом имеют здесь исходя из расчета уже два отражения от поверхности. Для частот 2–4 кГц, на которых проводился рассматриваемый здесь эксперимент, этого оказалось достаточно для такого разрушения когерентной составляющей сигналов, что "длинные" трассы задержек методом водопадного вывода выявить не удалось. Отдельные значения задержек, выявленные по критерию повторяемости корреляционного пика не менее чем в трех из четырех последовательно измеренных взаимно корреляционных функциях, отмечены на рис. 5 точками. За пик принимался локальный максимум корреляционной функции. Как видно из рис. 5, здесь существуют задержки, как попадающие в границы расчета, так и существенно отличающиеся от расчетных. Отклонение от расчета достигает здесь 145%.

В заключение сформулируем основные результаты работы. По результатам спектрально-корреляционного анализа экспериментальных данных построен горизонтальный разрез временной структуры звукового поля шумового подповерхностного источника для дистанций до 110 км. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных данных. Описана методика спектрально-корреляционного анализа, в результате которого показано, что в пространственно-временной структуре звукового поля шумового источника в условиях приповерхностного звукового канала на частотах 2–4 кГц наблюдается удовлетворительное согласие с расчетными данными на дистанциях до 94 км.

Автор благодарен В.П. Акуличевой и О.В. Бодрову за полезные обсуждения результатов работы, а также В.Д. Никифорову и В.В. Семенову за участие в проведении экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акуличева В.П., Фролов В.М.* Флуктуации уровней, углов прихода и разностей времен прихода звуковых сигналов, принятых в океане по отдельным лучам // Акуст. журн. 1986. Т. 32. № 6. С. 742–747.
2. *Галкин О.П., Фролов В.М.* Флуктуации угла прихода звукового сигнала, отраженного от поверхности океана // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 2. С. 168–170.
3. *Jourdain G.* Advanced methods for investigation of the underwater channel // Y.T. Chan (ed.) Underwater acoustic data processing. Proceeding of the 1988 NATO Advanced Study Institute on underwater acoustic data processing, held at the Royal Military College of Canada from 18 to 29 July 1988. Kluwer academic publishers, 1989. P. 69–85.
4. *Leroy-Hebert S.,Plaisant A.* The multipath coherence function for correlated random channel and moving source // Y.T. Chan (ed.) Underwater acoustic data processing. Proceeding of the 1988 NATO Advanced Study Instituteo on underwater acoustic data processing, held at the Royal Military College of Canada from 18 to 29 July 1988. Kluwer academic publishers, 1989. P. 93–97.
5. *Medwin H., Clay C.S.* Dependence of spatial and temporal correlation of forward-scattered underwater sound on the surface statistics. II. Experiments // J. Acoust. Soc. Amer. 1970. V. 47. № 5. P. 1419–1429.
6. *Legters G.R., Weinberg N.L., Clark J.G.* Long-range atlantic acoustic multipath identification // J. Acoust. Soc. Amer. 1983. V. 73. № 5. P. 1571–1580.
7. *Worcester P.F.* An exampl of ocean acoustic multipath identification, at long range using both travel time and vertical arrival angle // J. Acoust. Soc. Amer. 1981. V. 70. № 6. P. 1743–1747.
8. *Dosso S.E., Chapman N.P.* Acoustic propogation in a shallow sound channel in the Northeast Pacific Ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1984. V. 75. № 2. P. 413–418.

9. *Nothrop J., Shocley R.S.* Long-range Pacific acoustic multipath identifcation // J. Acoust. Soc. Amer. 1984. V. 5. № 6. P. 1760–1765.
10. *Jerome C. Rosenberger.* Passive localization // Y.T. Chan (ed.) Underwater acoustic data processing. Proceeding of the 1988 NATO Advanced Study Institute on underwater acoustic data processing, held at the Royal Military College of Canada from 18 to 29 July 1988. Kluwer academic publishers, 1989. P. 511–524.
11. *Бреховских Л.М., Гончаров В.В., Дремучев С.А., Куртепов В.М., Селиванов В.Г., Чепурин Ю.А.* Эксперименты по дальнему распространению звука в Канарской котловине Атлантического океана // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 5. С. 824–831.
12. *Лаврова П.В., Нефедов Л.М.* Исследование временной структуры сигнала, распространяющегося в океане // Исследования акустических характеристик океана. Тез. I Всесоюз. конф. по исследованию и освоению ресурсов Мирового океана. Владивосток: 1976. С. 54–57.
13. *Mrinal K., Sen L.N., Fazer S., Mallick N.R.* Chapman Analysis of multipath sound propogation in the ocean near 49° N, 128° W // J. Acoust. Soc. Amer. 1988. V. 83. № 2. P. 588–597.
14. *Wu L.J.* Practical graph partitioning algorithms for SONAR // Y.T. Chan (ed.) Underwater acoustic data processing. Proceeding of the 1988 NATO Advanced Study Institute on underwater acoustic data processing, hedl at the Royal Military College of Canada from 18 to 29 July 1988. Kluwer academic publishers, 1989. P. 637–643.
15. *Сазонов В.В., Караваев В.В.* Статистическая теория пассивной локации. М.: Радио и связь, 1987. 240 с.

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

Поступила в редакцию
26.11.90

D.A. Piskunov

EXPERIMENTAL STUDY OF THE SPATIAL–TEMPORAL SOUND FIELD STRUCTURE OF AN UNDERSURFACE SOURCE IN A SHALLOW CHANNEL

The study of different aspects of acoustic wave propagation in a stratified ocean is carried out. The most important applications of these researches are sonar purposes target detection, array processing, communication. The spatial–temporal structure of sound field is of special interest for target detection. The results of spectra–correlation analysis of data collected during experimental investigations of spatial–temporal sound field structure for a undersurface source and a deep receiver are discussed. Experiments were carried out on the homogeneous deep route with the shallow sound channel at the Northwest Pacific Ocean. The source transmitted pseudorandom noise at the frequency band of 2,4–4,0 kHz. The source ship was moving from the receiver one and carrying the source at the depth of 50 m with the low speed of 9 knots. The receiving system included the uniform vertical array at the depth of 280 m and the beamforming apparatus. A technique of the spectra–correlation analysis is described. The approach used is based on the cross–correlation measurements between the signals of different beams with the aim of multiple time delay estimation and plotting of the temporal structure of the sound field. A horizontal profile of the temporal structure of the sound field. A horizontal profile of the temporal structure for distances from 22 km up to 110 km is constructed on the basis of the results of the analysis. The experimental temporal structure for distances to about 95 km is in a good agree with the ray theory.