АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2019, том 65, № 1, с. 22–33

АКУСТИКА ОКЕАНА. ГИДРОАКУСТИКА

УДК 551.463.26

ОЦЕНКА АМПЛИТУДЫ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА СИГНАЛА РЕВЕРБЕРАЦИИ

© 2019 г. Б. М. Салин[a], О. Н. Кемарская[a], М. Б. Салин[a, *]

[a] Институт прикладной физики РАН
Россия, 603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова 46
*e-mail: mikesalin@ipfran.ru

Поступила в редакцию 16.04.2018 г.
После доработки 01.06.2018 г.
Принята к публикации 28.08.2018 г.

Выполнен корреляционный анализ низкочастотных реверберационных сигналов путем разложения реверберации по эталонным функциям, сформированным в виде набора сигналов, отраженных от точечного рассеивателя, движущегося по круговой траектории. Выбор эталонного сигнала связан с моделью рассеяния звука неоднородностями (пузырьками), возникающими в приповерхностном слое и движущимися вместе с орбитальными течениями ветровых волн. Исследование показало, что корреляционные функции значительно (на 5–6 дБ) различаются для области положительных и отрицательных доплеровских частот сигналов реверберации. Также выявлено устойчивое увеличение значений максимума корреляционной функции на определенных радиусах движения рассеивателей, связанных с амплитудами ветровых волн.

Ключевые слова: морская низкочастотная реверберация, обратное рассеяние, зоны шельфа, объемные и поверхностные неоднородности, ветровое волнение, параметры реверберации, корреляционный анализ, обобщенный спектральный анализ

DOI: 10.1134/S032079191901009X

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] подробно исследовался вопрос о форме спектра низкочастотной (до 1 кГц) реверберации при использовании тонально-импульсных сигналов локации длительностью от единиц до нескольких десятков секунд. Было показано, что при значительном волнении (высота волны от подошвы до гребня 1.5–2 м и более) основным фактором, определяющим формирование спектра рассеянного сигнала в шельфовой зоне или в приповерхностном канале в глубоком океане, является отражение звука от подповерхностных рассеивателей, которые двигаются по круговым траекториям под воздействием ветровых волн.

Также было показано, что путем выполнения расчетов спектра, рассеянного на движущихся неоднородностях сигнала при различных амплитудах ветрового волнения, и сопоставления расчетов с реальными спектрами реверберации, можно опосредованно оценить характерную амплитуду ветровых волн r. То есть, в указанных работах волнение оценивается по совпадению реальных спектров с расчетными при варьировании в расчетах параметра средней высоты волн r (в расчетах используется модель развитого волнения и рэлеевское распределение амплитуд волн).

В настоящей работе применен подход определения радиуса движения рассеивателей не из сопоставления энергетических спектров тестовых и реальных сигналов, а путем прямого нахождения корреляции реверберационного сигнала и тестового сигнала, рассеянного на локальном рассеивателе, который движется по круговой траектории с радиусом r от 0 до максимально возможного радиуса R_{max}, характерного для максимальной высоты ветровых волн[1]. Ожидается, что те значения r, которым соответствуют максимумы функции корреляции или границы резкого уменьшения значений функции корреляции, будут соответ-

[1] Вообще говоря, операцию в виде интеграла по времени от произведения случайного сигнала на детерминированную временную функцию, зависящую от одного или двух параметров, следовало бы назвать обобщенным спектральным анализом или разложением сигнала по определенным базисным функциям. Однако фраза “обобщенный спектральный анализ реверберации” автоматически воспринимается читателем как разложение реверберационного сигнала по гармоническим функциям, и ни по каким другим. Поэтому было принято не совсем корректное решение назвать производимую операцию корреляцией, исключив упоминание о спектральном анализе.

ствовать уровню ветрового волнения на исследуемой акватории.

1. РАСЧЕТ ОЖИДАЕМЫХ ЗНАЧЕНИЙ И СТРУКТУРЫ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ

В работах [1, 2], для приповерхностного слоя, была найдена приближенная зависимость от глубины z объемной силы рассеяния звука[2] в виде

$$S_{\text{scatt}}(z) = S^{\text{wind}}_{\text{scatt.}V}\exp(-z/z_0), \qquad (1)$$

где константы $z_0 = 20$ м, $S^{\text{wind}}_{\text{scatt.}V} = 10^{-6}$ 1/м^3.

Указанное значение z_0 было найдено в [1] путем сравнения экспериментальных спектров реверберации с расчетными при рэлеевском распределении амплитуд ветровых волн R_0 с плотностью вероятности $w(R_0)$ и среднем значении $\overline{R_0} = 0.8$ м:

$$w(R_0) = \frac{R_0}{\left(\overline{R_0}\right)^2}\exp\left(\frac{-R_0^2}{2\left(\overline{R_0}\right)^2}\right). \qquad (2)$$

Целью настоящей работы является выполнение детального анализа реверберационных сигналов исходя из модели движения приповерхностных рассеивателей. Для такого исследования нами используется операция разложения реверберационного сигнала по эталонным функциям, комплексно сопряженным с отраженными от тестового рассеивателя звуковыми сигналами. При этом предполагается, что эталонный тестовый рассеиватель движется под воздействием ветровой волны по круговой траектории радиуса r с заданной начальной фазой φ. Значения радиуса и начальной фазы варьируются.

Временную зависимость эталонной функции $F_{\text{эт}}(r, \varphi, t)$, комплексно сопряженной к отраженному в обратном направлении сигналу, гетеродинированному на частоте локации, представим в виде

$$F_{\text{эт}}(r,\varphi,t) = \exp\left(-i2kr\sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right)\right). \qquad (3)$$

Здесь k – волновое число сигнала локации, r – радиус окружности, по которой движется эталонный рассеиватель с фиксированной угловой скоростью $2\pi/T$, φ – фаза сигнала рассеивателя относительно середины временного окна анализа ($t = 0$).

На рис. 1а в качестве примера представлен общий вид эталонного сигнала $F_{\text{эт}}(r, \varphi, t)$ (его мнимой части), построенный для фиксированного периода ветровой волны $T = 10$ с, пространственной частоты акустического сигнала $k = 2\pi/2$ м $= 3.14$ 1/м, параметров $r = 2$ м и $\varphi = 0$. Светло-серым цветом для того же временного периода изображен график изменения циклической частоты отраженного сигнала $\omega(t)$, полученной в виде производной по времени от значения фазы эталонного сигнала (3).

На рис. 1б–1д, на интервале времени ±2.5 с (длительность импульса локации $\tau = 5$ с) представлено семейство эталонных сигналов $F_{\text{эт}}(r, \varphi, t)$, построенных для значений $r = 0.5$, 1 и 2 м и $\varphi = 0°$, 90°, 180° и 270°.

Эталонные функции при $\varphi \sim 0°$ и 180° имеют в середине окна анализа максимальные (по модулю) значения частоты Доплера $f = 2kr/T$ (см. рис. 1б и 1г), что имитирует положение виртуального рассеивателя на вертикальной линии, проходящей через гребень или впадину волны. Можно показать, что представленный набор временных функций $F_{\text{эт}}(r, 0°, t)$ и $F_{\text{эт}}(r, 180°, t)$, по которым происходит разложение реверберационного сигнала, обладают свойством ортогональности на временном интервале ±2.5 с при определенном наборе r_j.

При $\varphi \sim 90°$ и 270° отражение импульса от рассеивателя при $t = 0$ происходит без изменения частоты (что соответствует нахождению рассеивателя на участках ветровой волны между гребнем и впадиной). Набор функций $F_{\text{эт}}(r, 90°, t)$ и $F_{\text{эт}}(r, 270°, t)$ (см. рис. 1в и 1д) свойством ортогональности не обладают.

Корреляцию гетеродинированного сигнала реверберации $p(t + n\Delta t)$ с эталоном $F_{\text{эт}}(r, \varphi, t)$ будем выполнять в виде

$$B(r,\varphi,n) = \left|\frac{1}{\tau}\int_{-\tau/2}^{\tau/2}(1+\cos(2\pi t/\tau^*))p(t+n\Delta t)F_{\text{эт}}(r,\varphi,t)\,dt\right|^2. \qquad (4)$$

Здесь первый сомножитель под интегралом – оконная функция, $\Delta t \sim \tau$ – шаг преобразования потока данных. Корреляционная функция (4), зависит от параметров φ и r. Проведем исследование возможности идентификации рассеивателей по параметрам φ и r с использованием выражения (4) и семейства эталонных функций (3).

На рис. 2 представлены результаты тестовых расчетов отклика $B(r, \varphi)$ на ансамбль рассеянных сигналов $p_i(t)$ вида

$$p_i(t) = F(z_i)e^{-z_i/2z_0}\exp\left(i2kR_0e^{-Kz_i}\sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \theta_i\right)\right). \qquad (5)$$

Ансамбль сигналов $p_i(t)$ описывает отражение звуковой волны от совокупности рассеивателей, ранжированных по глубине z (равномерное распреде-

[2] Сила рассеяния – это квадрат амплитуды отраженного поля, приведенного к расстоянию 1 м от рассеивателя, нормированный на квадрат амплитуды падающего поля.

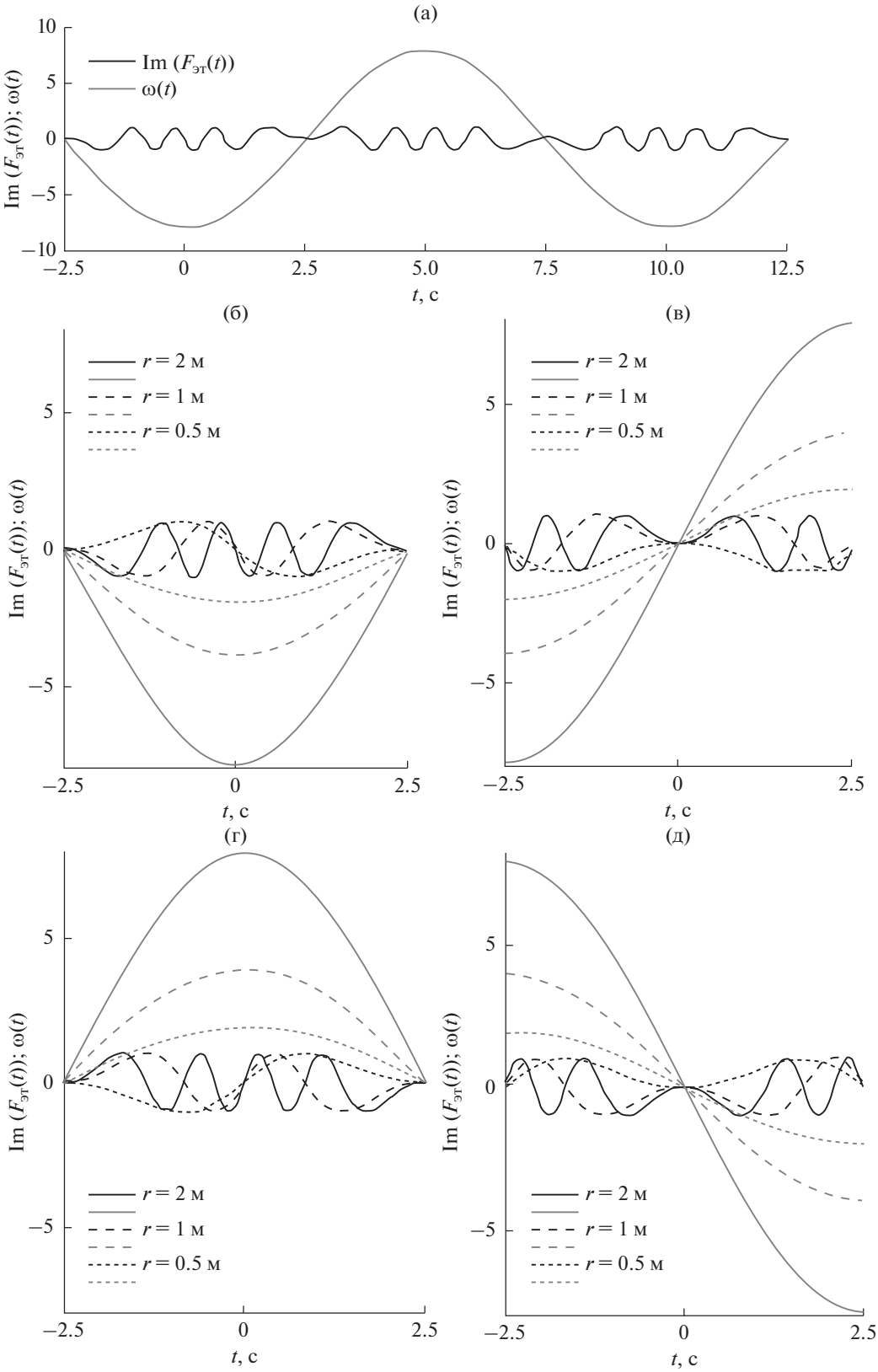

Рис. 1. Эталонные (базисные) функции $F_{эт}(r, \varphi, t)$, которые используются при обобщенном спектральном анализе (темные линии), текущее значение циклической частоты $\omega(t)$ (светлые линии). (а) Эталонная функция $F_{эт}(2, 0°, t)$ и $\omega(t)$, заданные на большом интервале времени. (б–д) Семейство эталонных функций $F_{эт}(r, 0°, t)$, $F_{эт}(r, 90°, t)$, $F_{эт}(r, 180°, t)$, $F_{эт}(r, 270°, t)$ и их циклические частоты, заданные на интервале времени ±2.5 с.

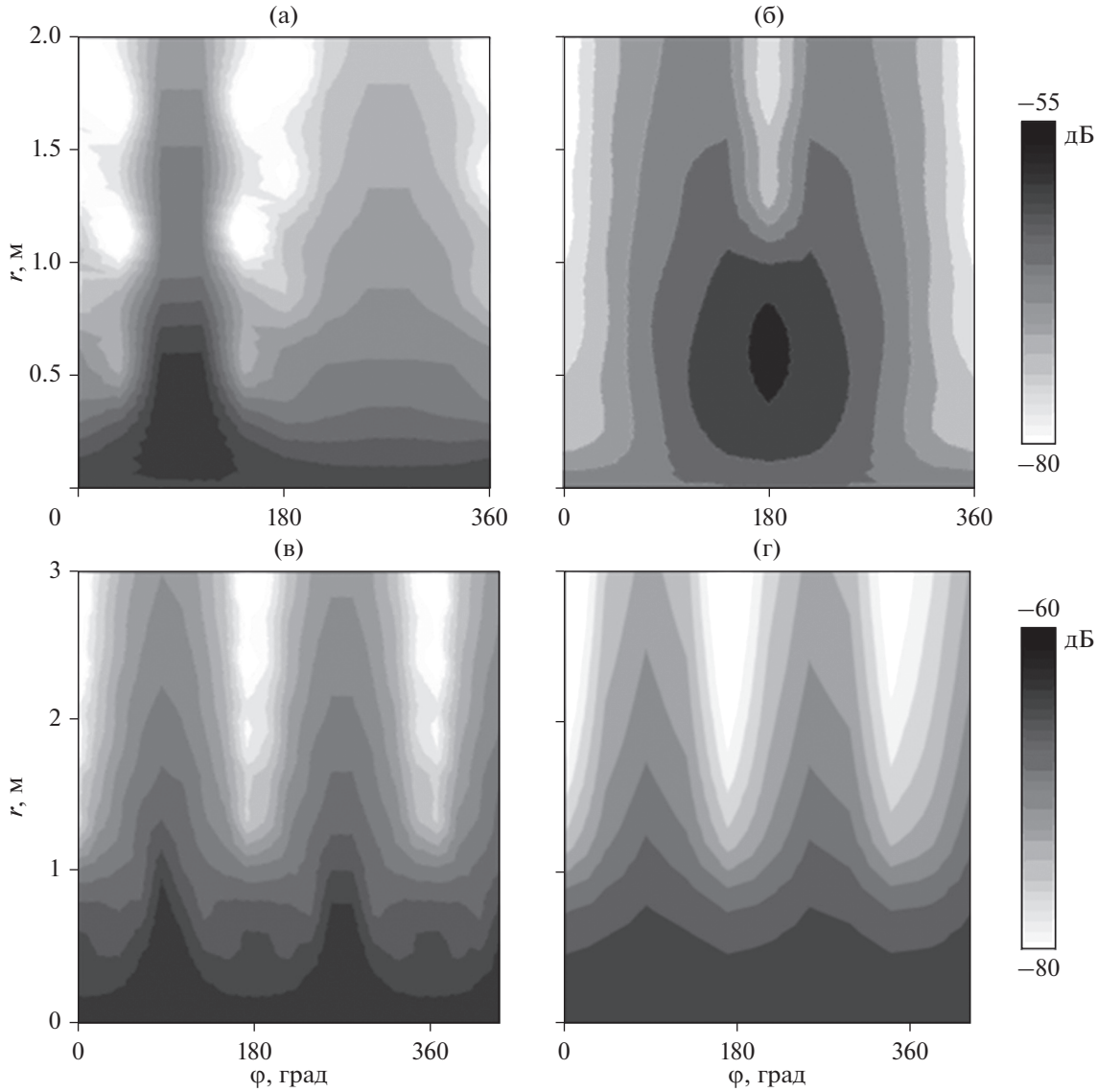

Рис. 2. Двумерная функция $B(r, \varphi)$, рассчитанная для ансамбля модельных сигналов $p_i(t)$ при четырех комбинациях значений фаз рассеивателей θ_i: (а) $\theta_i = \theta = 90°$, (б) $\theta_i = \theta = 180°$, (в) $\theta_i = \theta = \{0°, 90°, 180° \text{ и } 270°\}$, (г) равномерное распределение рассеивателей по θ от 0° до 360°.

ление $z_i = i\Delta z$), с отражательной способностью каждого рассеивателя $e^{-z_i/2z_0}$, которые движутся по круговым траекториям с радиусами $R_0 e^{-Kz_i}$ с определенным начальным набором фаз θ_i.

Моделирование реверберационных сигналов $p_i(t)$ выполнялось для условий, максимально приближенных к натурному эксперименту: акустическое волновое число $k = 2\pi/\lambda$, где $\lambda = 2$ м; амплитуда волнения (относительно нулевого уровня) $R_0 = 1$ м; период ветровых волн $T = 10$ с[3]; волновое число ветровой волны $K = 4\pi^2/(T^2 g) = 0.04$ 1/м; характерная глубина ослабления рассеяния $z_0 = 20$ м (для упрощения расчетов учитывались рассеиватели, расположенные не глубже 60 м), зависимость произведения амплитуд полей подсветки и отражения от глубины z при среднем угле захвата волновода $\chi = 20°$ принята равной

$$F(z) = \begin{cases} (\sin(kz\sin\chi))^2 & \text{для} \quad kz\sin(\chi) < \pi/2, \\ 1 & \text{для остальных} \quad z. \end{cases} \quad (6)$$

При расчете корреляции использовались параметры оконной функции: время интегрирования (длительность импульса) $\tau = 5$ с и $\tau^* = 7$ с. Перебор по глубине от 0 до 60 м выполнялся с шагом

[3] Для упрощения расчетов считаем значения периода ветровой волны T и амплитуды R_0 фиксированными. Средняя амплитуда ветровой волны, исходя из спектра Пирсона–Московица, на частоте 0.1 Гц составляет 1 м.

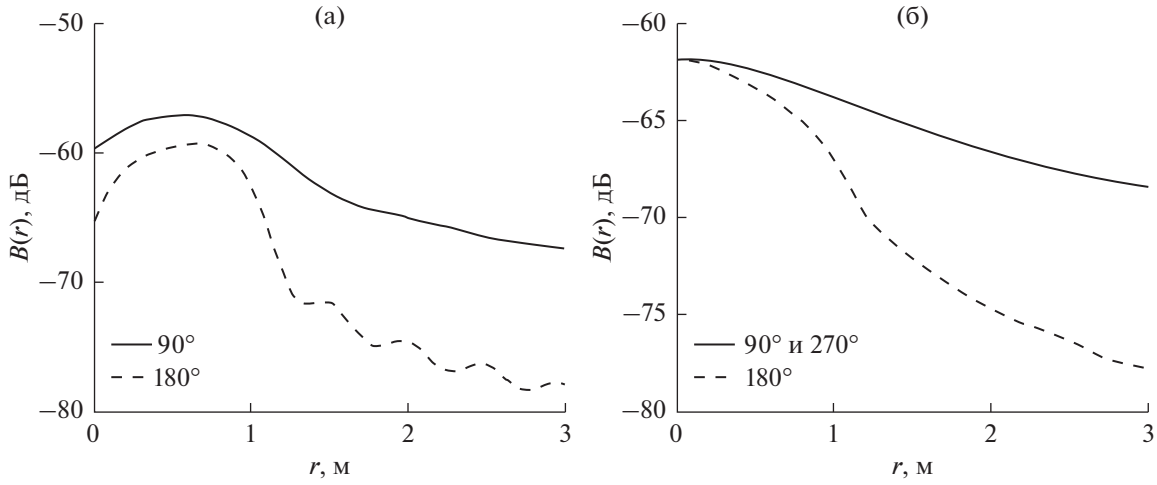

Рис. 3. Сечения двумерной функции $B(r, \varphi)$, представленной: (а) на рис. 2а при $\varphi = 90°$ и рис. 2б при $\varphi = 180°$, (б) на рис. 2г для значений $\varphi = 90°$, 270° (сплошная линия) и $\varphi = 0°$, 180° (пунктирная линия).

$\Delta z = 2$ м. Корреляционные отклики от каждого i-го рассеивателя складывались некогерентно.

На рис. 2 представлены значения корреляционных функций $B(r, \varphi)$, рассчитанные для следующих комбинаций рассеивателей и соответствующих значений рассеянных сигналов (5):

– рис. 2а – рассеиватели имеют общую фазу движения по кругу $\theta_i = \theta = \pi/2$ (расположены на вертикальной линии, проходящей через середину склона волны, а рассеянные сигналы без учета зависимости амплитуды от z_i аналогичны сигналам, представленным на рис. 1д);

– рис. 2б – $\theta_i = \theta = \pi$ (имитация расположения рассеивателей на гребне или впадине волны, сигналы – аналог рис. 1б);

– рис. 2в – совокупность однотипных рассеивателей, сгруппированных вокруг четырех значений фаз $\theta = \{0, \pi/2, \pi$ и $3\pi/2\}$;

– рис. 2г – равномерное распределение рассеивателей по θ от 0 до 2π с шагом $\pi/10$.

В полученных модельных зависимостях можно отметить следующие особенности корреляционных функций.

При наличии компактной группы рассеивателей с одинаковыми значениями фаз θ_i корреляционная обработка восстанавливает фазу рассеивателей с разрешением $\Delta\varphi \approx 2\pi/10$ (рис. 2а и 2б). В этом случае по двумерной зависимости корреляционной функции $B(r, \varphi)$ можно определить, что в импульсном объеме отраженного сигнала присутствует локальная неоднородность, движущаяся по радиусу 0.5–1 м. При наличии четырех групп рассеивателей из-за их взаимного влияния разрешение по фазе падает (рис. 2в). При наличии в отраженном импульсе 20 и более групп рассеивателей с произвольными фазовыми соотношениями положение рассеивателей по фазе не определяется (рис. 2г).

При большом числе рассеивателей фоновая корреляционная функция имеет максимум при $\varphi = \pi/2$ и $\varphi = 3\pi/2$ (см. рис 2в, 2г). Как следует из сопоставления с рис. 1б и 1г, указанные значения фаз соответствует отражению звука от рассеивателей с доплеровским частотами вблизи нулевой частоты (переход доплеровской частоты через 0). При околонулевом доплеровском сдвиге отражения с различных глубин не разделяются по координате r, отклики от различных r суммируются, что дает для указанных значений φ увеличение амплитуды корреляционной функции. При этом, естественно, теряется информация о радиусе движения

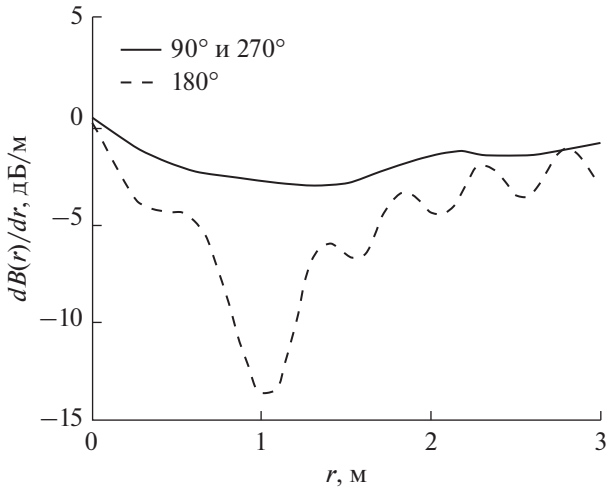

Рис. 4. Значения производных по r, характеризующих убывание функций $B(r)$, представленных на рис. 3б, при $\varphi = 90°$ (сплошная линия) и 180° (пунктирная линия).

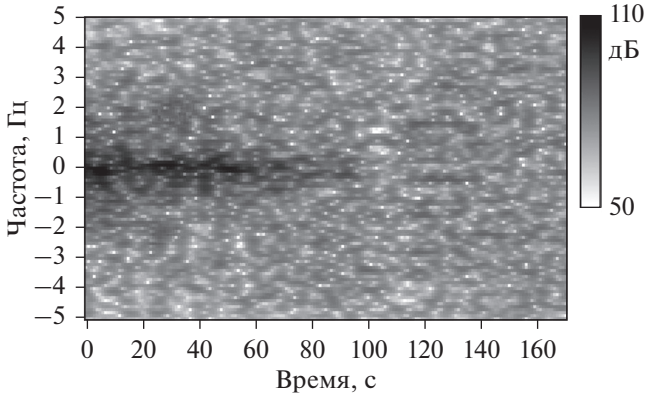

Рис. 5. Текущие значения спектральной плотности мощности сигнала реверберации. Параметры локационного сигнала: $\lambda \approx 2$ м, длительность посылки 5 с.

рассеивателя. Для значений φ, равных 0 и π, информация о радиусе движения частиц, а также об амплитуде волнения R_0 не теряется (влияние ортогональности базисных функций).

На рис. 3 построены сечения функции $B(r, \varphi)$, представленной на рис. 2а, 2б и 2г, для значений углов $\varphi = \pi/2$ и $3\pi/2$ (сплошная линия) и аналогичные сечения для $\varphi = \pi$ (пунктирная линия) – случай рассеяния на частицах с максимальным доплеровским сдвигом частоты. Следует отметить, что в тестовых сигналах было заложено максимальное значение радиуса движения частиц у поверхности (амплитуда волнения) $R_{\max} = R_0 = 1$ м.

Как видно из графиков рис. 3 (пунктирная линия), значения r вблизи максимума функции корреляции приходятся на диапазон реальных значений радиусов движения рассеивателей $r = 0...1$ м.

Из графика рис. 4 также следует, что максимальное убывание корреляционной функции (–13 дБ/м) для $\varphi = 180°$ наблюдается при значении $r = R_0 = 1$ м. Таким образом, судя по расчетам, по граничному значению r, при котором наступает максимальный спад корреляционной функции, можно непосредственно определять амплитуду ветрового волнения.

2. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СИГНАЛОВ МОРСКОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ

Для тестирования предложенной схемы обработки натурных данных (4) нами использовались реверберационные сигналы, зарегистрированные в Тихом океане вблизи полуострова Камчатка. Описание эксперимента и условия его проведения приведены в работе [1]. В настоящей работе для выполнения исследования была выбрана запись

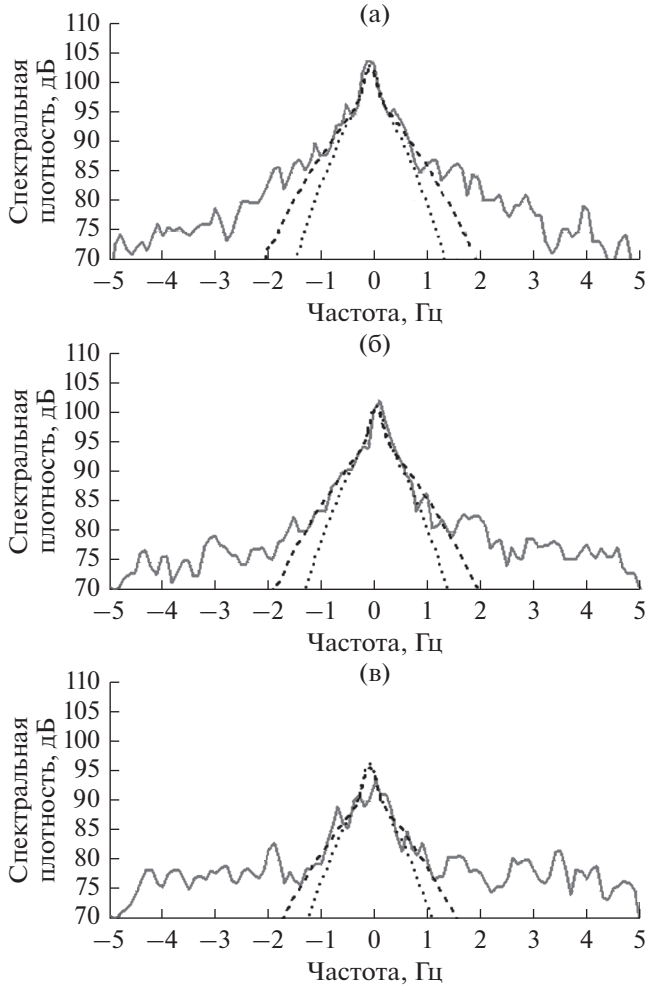

Рис. 6. Усредненные в интервалах времени (а) 0–20, (б) 40–60 и (в) 60–80 с экспериментально измеренные спектры реверберации и шумовой помехи (сплошная линия). Расчетные значения спектра реверберации для средней амплитуды волнения $\overline{R_0} = 0.8$ (пунктирная линия) и 1.2 м (штриховая линия).

реверберационного сигнала с длительностью импульса локации $\tau = 5$ с при длине волны $\lambda \approx 2$ м.

Начнем с традиционного способа обработки сигналов. На рис. 5 представлен текущий спектр гетеродинированного сигнала реверберации, принятого в горизонтальной плоскости с выделенного направления (условное направление +35°). Расчет текущих значений спектральной плотности мощности $G(\omega, n)$ выполнялся по стандартной схеме, аналогично работе [2], с использованием выражения

$$G(\omega, n) = \frac{1}{\sqrt{2}\tilde{T}} \left| \int_{-\tilde{T}/2}^{\tilde{T}/2} \left[1 + \cos\frac{2\pi t}{\tilde{T}} \right] p(t + n\Delta t) e^{i\omega t} dt \right|^2. \quad (7)$$

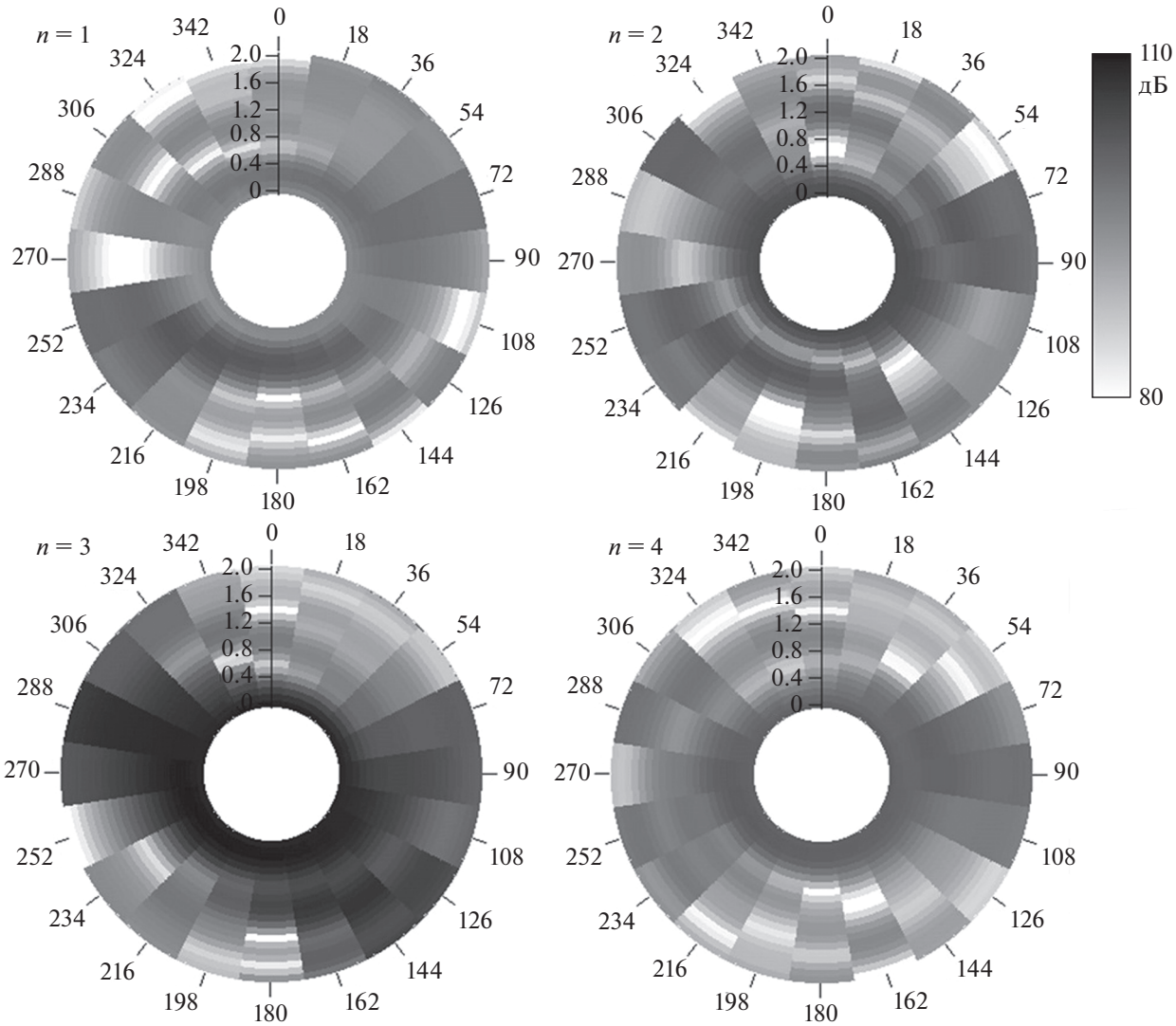

Рис. 7. Реализации двумерной функции $B(r, \varphi, n)$, рассчитанные и построенные для интервала времени 0–17 с и значений n = 1...4 (представлены на графиках). Окно анализа 5 с, шаг по времени 4 с.

При спектральной обработке применялось окно Хеннинга с временным окном $\tilde{T}$ = 7.5 с, с шагом по времени Δt = 4 с. Полоса пропускания фильтра после гетеродинирования реверберационного сигнала составляла ±4.5 Гц, ослабление сигнала вне полосы пропускания составляло на частотах ±5 Гц более 6 дБ. Начало отсчета на рис. 5 (t = 0) соответствует временной задержке 15 с относительно времени прихода на антенну переднего фронта импульса посылки. Граничные частоты спектра ±1.5 Гц, внутри которых лежат основные компоненты спектра реверберации (по уровню больше –15...–20 дБ от максимума), соответствуют максимальному доплеровскому сдвигу частоты рассеянного сигнала при радиусе движения рассеивателя $R_{\max}$ = 2.4 м, периоде T = 10 с и длине звуковой волны λ = 2 м.

На рис. 6 для трех интервалов времени представлены усредненные значения измеренных спектров – сплошные линии. Интервал усреднения 0–20, 40–60 и 60–80 с, начало отсчета по времени совпадает с рис. 4. Уровень спектральной плотности шумового фона в условных единицах составил ~75 ± 3 дБ, уровень реверберации на несущей частоте уменьшается за интервал измерений 0–60 с на 10 дБ.

Для указанных параметров сигнала: λ = 2 м, длительность импульса 5 с, сила рассеяния приповерхностного слоя, заданная (1), и объемных рассеивателей (не зависящих от z) $S_{\text{scatt.}V}$ = 2 × 10^{-9} 1/м^3, а также параметров ветрового волнения: средний период волны 10 с, средняя высота волны (амплитуда относительно уровня горизонта) $\overline{R_0}$ = 0.8 и 1.2 м

(соответственно, от подошвы до гребня $2\overline{R_0} = 1.6$ и 2.4 м), были выполнены теоретические расчеты ожидаемых усредненных уровней спектров реверберации. При расчетах спектров случайные рассеиватели задавались в виде единичных отражателей в интервале глубин от 0 до 150 м с шагом 1 м от 0 до 30 м и с шагом 3 м от 30 до 150 м; шаг по угловой координате θ (положение рассеивателя на круговой траектории) π/2. Использовалось рэлеевское распределение амплитуды ветровой волны со средним значением $\overline{R_0} = 0.8$ и 1.2 м. Детальная схема расчета модельного спектра реверберации представлена в работе [2].

Результаты теоретического расчета спектров представлены на рис. 6 пунктирными и штриховыми линиями. Расчетные спектры были выравнены с экспериментальными на нулевой (несущей) частоте. Как видно из рисунков, для полосы частот от −1 до +1 Гц, в которой по расчетам содержится 93% мощности сигнала реверберации, расчетные спектры хорошо соответствуют экспериментальным аналогам при значении $\overline{R_0} = 1.2$ м.

Далее перейдем к корреляционной обработке. Вычисление корреляционных функций – разложение реверберации по эталонным функциям вида (3) – выполнялось согласно (4) со следующими параметрами: длительность окна анализа τ равно длительности посылки (τ = 5 с), весовая функция τ* = 7 с (аналог окна Хэмминга), шаг по времени $\Delta t = 4$ с.

Представление результатов вычисления двумерной функции $B(r, \varphi)$ было выполнено двумя способами: в прямоугольной системе координат r, φ (аналогично графикам на рис. 2) и в азимутальной системе координат: φ – азимутальный угол, r – длина вектора. На рис. 7 для примера представлены четыре реализации функции $B(r, \varphi, n)$, рассчитанные согласно (4) для начального интервала времени 0–17 с (начало отсчета по времени см. рис. 5) при значениях $n = 1...4$.

Как видно из рис. 7, не усредненные по ансамблю реализации функций $B(r, \varphi)$ носят довольно случайный характер. Из особенностей следует отметить значительное уширение функций по r и увеличение амплитуд в секторах углов вблизи направлений 90° и 270°, что соответствует расчетам (см. рис. 2в, 2г). Значительный спад функции $B(r, \varphi)$ для углов 0°, 180° начинается для значений $r > 0.4$ м, но при $r \sim 1.2$ и 1.7 м наблюдаются второй и третий максимум корреляционной функции.

Усредненные значения функций $B(r, \varphi)$ (интервалы усреднения по времени 0–20, 20–40, 40–60 и 60–80 с) представлены в прямоугольной системе координат на рис. 8. Структура усредненных функций рис. 8 в общих чертах соответствует теоретическому расчету для равномерного распределения рассеивателей (рис. 2г), однако имеет более сложную форму с наличием определенных пространственных структур, на которых $B(r, \varphi)$ достигает локальных максимумов (отмечены пунктиром). Представляется интересным то, что такая неоднородная структура корреляционной функции наблюдается, вообще говоря, при очень большом количестве рассеивающих элементов

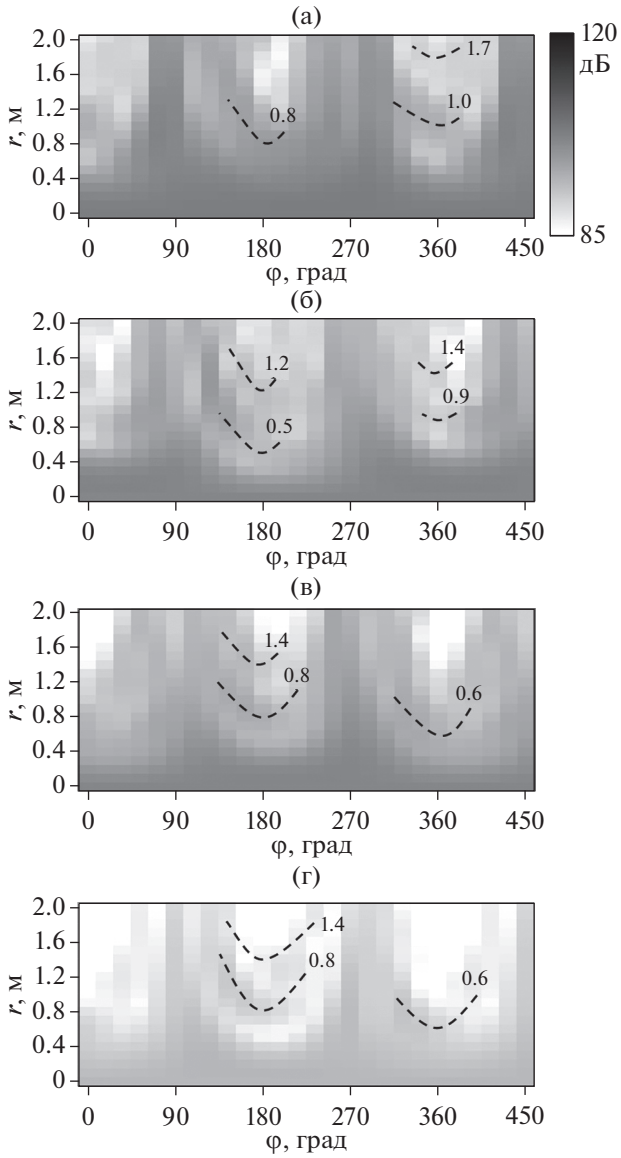

Рис. 8. Усредненные функции $B(r, \varphi)$. Интервалы усреднения 0–20, 20–40, 40–60 и 60–80 с (рис. 7а–7г соответственно). Пунктир – пространственное положение максимумов вблизи углов 180° и 360°, цифры – минимальные значения r, при которых достигаются максимумы.

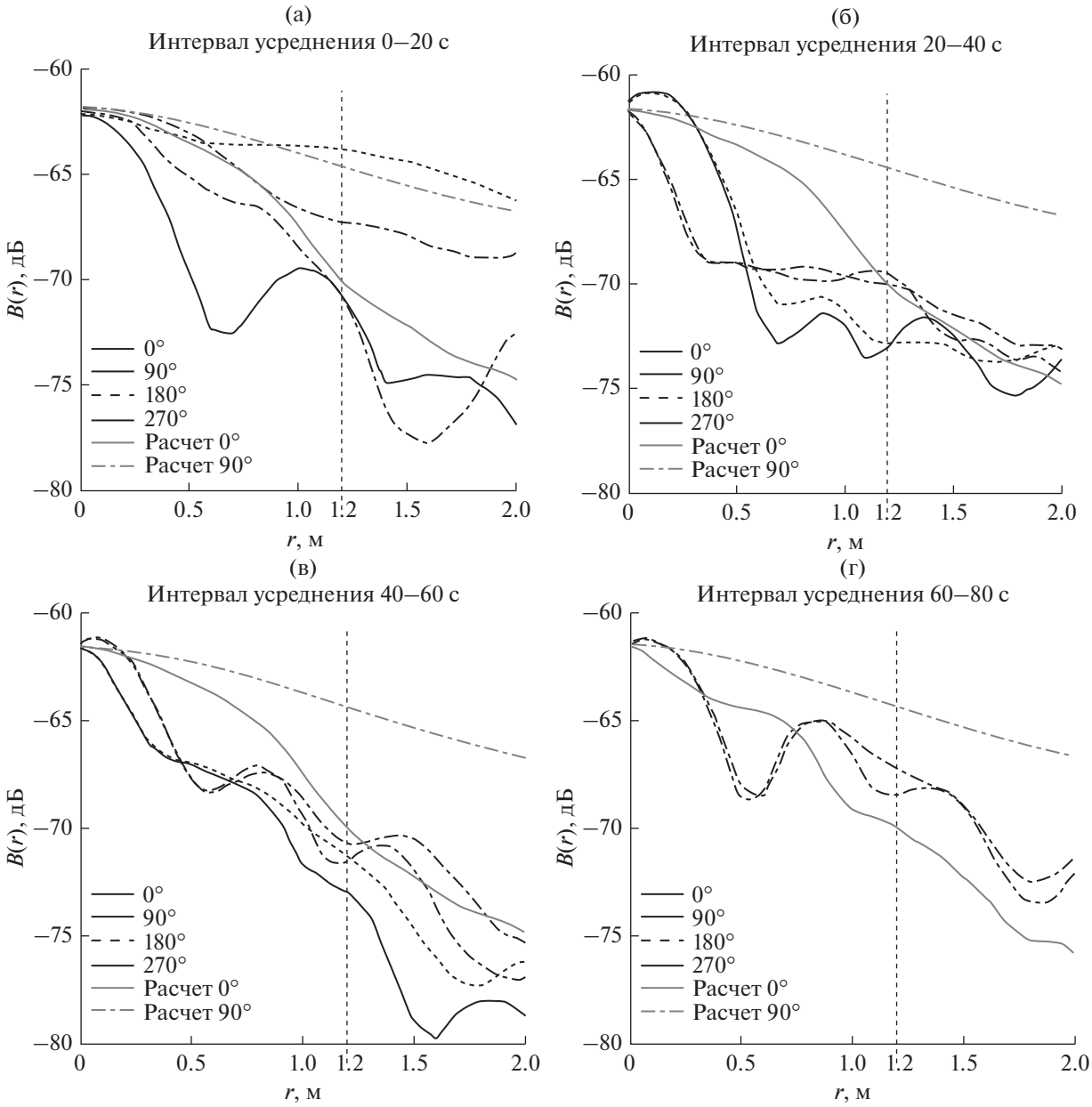

Рис. 9. Сечения двумерных функций $B(r, \varphi)$, представленных на рис. 8, для значений φ, равных 0°, 90°, 180° и 270° и интервалов времени 0–20, 20–40, 40–60 и 60–80 с (рис. 9а–9г соответственно). Серые сплошные и штрих-пунктирные линии – расчет $B(r)$ для $\varphi = 0°$ и $\varphi = 90°$ соответственно.

(большом ансамбле усреднений), расположенных на площади[4] ~15 × 4 км, и то, что она не случайна и во многом повторяется на соседних участках усреднения (ср. рис. 8в и 8г).

Для более детального анализа характеристик $B(r, \varphi)$ и сравнения с расчетами на рис. 9 приведены сечения по φ двумерных функций $B(r, \varphi)$, представленных на рис. 8 и 2г, для значений фаз $\varphi = 0°$ (360°), 90°, 180° и 270°. Значения r, при которых функции $B(r)$ на рис. 9 достигают максимумов при $\varphi = 0°$ (360°) и $\varphi = 180°$, отмечены на рис. 8 пунктиром (по уровню больше –15...–20 дБ от максимума) в окрестности указанных значений фаз.

Первоначально проанализируем кривые на рис. 9, построенные для углов $\varphi = 0°$ и 180°, кото-

[4] Площадь поверхности S, с которой поступает на приемную антенну рассеянный сигнал, определяется выражением $S = C(t/2)\Delta\alpha C(\tau/2)$, где C – скорость звука, t – время задержки прихода импульса, $\Delta\alpha$ – ширина диаграммы направленности приемной антенны в горизонтальной плоскости (рад.), τ – длительность импульса.

рые отвечают за рассеяние звука с положительными и отрицательными доплеровскими частотами (отметим, что экспериментальные и теоретические кривые различаются между собой).

Во-первых, экспериментальные кривые для $\varphi = 0°$ и $\varphi = 180°$ при одних и тех же значениях r различаются в среднем на 3–5 дБ. При круговой траектории движения рассеивателей значительное отличие в амплитуде отраженного сигнала при положительном и отрицательном значении доплеровского сдвига может говорить об изменении концентрации рассеивателей на масштабе радиуса движения или за время ~0.5 периода кругового движения (~5 с). Например, в момент обрушения гребня волны (допустим, при положительном доплеровском сдвиге частоты) формируются крупные воздушные образования [3–5], на которых интенсивно рассеивается звук. Когда эта область пространства оказывается во впадине волны (отрицательный доплеровский сдвиг), рассеиватели успевают всплыть или преобразуются в более мелкие фракции, на которых может происходить более слабое рассеяние звука.

Такое нестационарное во времени поведение концентрации рассеивателей, сосредоточенных в приповерхностном слое – одно из возможных объяснений различий кривых $\varphi = 0°$ и $\varphi = 180°$, представленных на рис. 9.

Другая гипотеза о неравенстве рассеяния при положительном и отрицательном доплеровском сдвиге заключается в возможном неравенстве скоростей движения частиц жидкости на гребне и во впадине волны за счет ветровых течений. Оценки возможных скоростей поверхностных течений и их влияния на трансформацию спектра реверберационного сигнала выполнены в работах [2, 6, 7].

Различия в амплитудах рассеяния при положительных и отрицательных доплеровских сдвигах ожидаемы не только на максимальных радиусах движения частиц, характерных для самых верхних слоев акваторий, но и на меньших r, учитывая характеристику направленности распространения поверхностных волн.

На графиках рис. 8, 9 представлены данные, полученные при большом интервале усреднения по времени (20 с), что соответствует усреднению по дальности ~15 км. На таком большом интервале дистанций вполне могут быть участки с различными амплитудами волнения и (или) различными направлениями движения. Например, при движении по направлению на приемную антенну поверхностная волна с амплитудой $r = 1$ м идентифицируется при обработке рассеянного сигнала как волна с максимальным r, равным 1 м. При движении волны под углом к антенне 60° она уже будет идентифицироваться как волна с максимальным r, равным 0.5 м. В этом случае при обработке суммарного рассеянного сигнала в функциональной зависимости $B(r, \varphi)$ будут максимумы как с $r = 1$ м, так и с $r = 0.5$ м и для обоих r в силу указанных выше причин возможны различия в графиках при $\varphi = 0°$ и $\varphi = 180°$.

Относительно ширины диаграммы направленности или углового распределения энергии ветровых волн в литературе присутствует немного экспериментальных данных, так как основные измерения выполняются трехкоординатными волнографами, которые не могут разделять по угловой координате одновременно приходящие с разных направлений поверхностные волны. Тем не менее, оценки показывают, что на основной частоте волнения ширина диаграммы направленности по уровню 0.5 может составлять ~30°–40° [8].

В работе [9] с использованием оптической схемы регистрации волнения показано, что для относительно короткопериодного волнении (основная частота ~1 Гц) на диаграмме направленности (сечениях двумерных спектров на отдельных частотах) наблюдаются явно выраженные максимумы, разнесенные по углу на 60°–90°. При существовании относительно узконаправленных пиков в диаграмме направленности ветрового волнения механизм появления нескольких пиков по r в сечении корреляционной функции при $\varphi = 0°$ и 180°, обусловленных разными направлениями прихода ветровых волн, может быть реализован.

Стоит сказать несколько слов относительно поведения кривых $B(r)$ при $\varphi = 90°$ и 270° (рис. 9), характеризующих переход доплеровской частоты в рассеянном сигнале от положительных к отрицательным значениям и наоборот. На некоторых временных интервалах (рис. 8б, 8г) кривые $B(r)$ при $\varphi = 90°$ и 270° идут довольно близко друг к другу, т.е. примерно равное число рассеивателей проходят через нулевую частоту в ту и другую сторону. На других интервалах (рис. 8а, 8в) количество рассеивателей, переходящих нулевую частоту в ту и другую сторону, различается.

3. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Выполненное исследование в целом подтвердило выводы предыдущих работ [1, 2] о том, что спектр низкочастотного реверберационного сигнала при локации тонально-импульсными сигналами длительностью пять и более секунд

формируется круговым движением приповерхностных рассеивателей. Из сопоставления расчетных и измеренных спектров была определена средняя амплитуда ветрового волнения $\overline{R_0} = 1.2$ м (от подошвы до гребня 2.4 м) при использовании рэлеевского распределения амплитуд ветровых волн.

2. Для более подробного исследования характеристик движения рассеивателей был выполнен корреляционный (обобщенный спектральный) анализ сигналов, использующий разложение реверберации по, вообще говоря, не ортогональному набору эталонных сигналов, которые представляют собой отражение акустической волны от точечных рассеивателей, движущихся по круговой траектории с произвольными радиусом и фазой движения.

Исследование показало, что рассеянные сигналы не в полной мере соответствуют модели отражения от движущегося по круговой траектории рассеивателя, так как уровни рассеяния значительно (на 5–6 дБ) различаются для области положительных и отрицательных доплеровских частот. Один из выводов из такого наблюдаемого эффекта заключается в том, что большой вклад в рассеяние дают самые верхние слои жидкости, в которых может изменяться концентрация рассеивателей за время одного периода ветровой волны. Такой же вывод, только на основе несимметрии спектров реверберации, делается и в работе [2].

3. При анализе обобщенных спектров выявлено устойчивое увеличение амплитуды на нескольких радиусах движения рассеивателей, например, $r = 0.8$ и 1.6 м для области положительных доплеровских частот и $r = 0.6$ м для отрицательных – интервалы времени задержки 40–60 и 60–80 с (рис. 8в, 8г и 9в, 9г). Наличие таких максимумов свидетельствует: а) о присутствии на исследуемой акватории как минимум двух или трех систем волн – движение волн с амплитудами 0.8 и 1.6 м в одном направлении и 0.6 м в противоположном; б) об изменении концентрации рассеивателей на масштабе радиуса движения или за время ~0.5 периода кругового движения (~5 с).

С учетом указанных замечаний следует, тем не менее, отметить совпадение в поведении теоретических и экспериментальных кривых в скорости снижения значений корреляционных функций при $\varphi = 0°$ и 180° с ростом амплитуды волн r (уменьшение корреляции на 10 дБ при изменении r от 0 до 1.5 м). Причем для указанных значений фаз теоретические и экспериментальные оценки различаются тем меньше, чем для бóльшей дистанции (бóльшей временной задержке) производится вычисление корреляционной функции (бóльшее число независимых рассеивателей, определяемое площадью поверхности $R\Delta\alpha\Delta R$) – ср. рис. 8а и 8г. Это свидетельствует в том числе о правильности заложенной в расчет корреляционной функции зависимости количества рассеивателей с глубиной (1).

Основное преимущество в использовании обобщенного спектрального анализа, а не спектрального анализа, основанного на разложении сигнала по гармоническим функциям, – это согласованная обработка, когда принятый сигнал разлагается по тому набору функций, которые в нем содержатся. Гармонический спектральный анализ хорошо использовать при оценке скоростей в сдвиговых приповерхностных течениях, тогда как обобщенный – при оценке скорости в потоке с завихренным движением частиц жидкости.

Как показали модельные исследования, точность обобщенного спектрального анализа при оценке ветрового волнения с фиксированной высотой волн (см. рис. 4) составляет прядка 10%. При анализе реального реверберационного сигнала обобщенный анализ кроме граничного значения r (уменьшения обобщенного спектра, например, на 10 дБ) дает также определенные данные о распределении волнения по высоте волн (см. рис. 9). Из текущих гармонических спектров усредненная высота волн находится только опосредованно, после расчета семейства спектров рассеянного сигнала (при гипотетически известных параметрах звукорассеивающего слоя, высоты волны, их распределения по ансамблю реализаций) и сопоставления расчетных данных с экспериментальными.

Работа над разделом “Расчет ожидаемых значений и структуры корреляционных функций” выполнялась при поддержке программы ФНИ государственных академий наук на 2013–2020 гг., раздел № 12.18 “Разработка физических основ акустических систем нового поколения”. Работа над разделом “Корреляционный анализ сигналов морской реверберации” проводилась при поддержке Российского научного фонда (РНФ, грант № 14-17-00667).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Салин Б.М., Кемарская О.Н., Молчанов П.А., Салин М.Б.* Исследование механизма уширения спектра низкочастотного реверберационного сигнала при рассеянии звука на приповерхностных неоднородностях в условиях интенсивного ветрового волнения // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 3. С. 314–322.

2. *Салин Б.М., Салин М.Б.* Механизмы формирования спектральных характеристик низкочастотной реверберации и прогнозные оценки // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 2. С. 197–206.

3. *Колобаев П.А.* Исследование концентрации и статистического распределения пузырьков, создаваемых ветром в приповерхностном слое океана // Океанология. 1975. Т. 15. № 2. С. 1013–1017.

4. *Neighbors T.H., Bjerne L.* Anomalous low frequency sea surface reverberation // Hydroacoustics. 2001. V. 4. P. 181–192.

5. *Thorpe S.A.* On the clouds of bubbles formed by breaking wind-waves in deep water and their role in air–sea gas transfer // Philos. Trans. Roy. Soc. A. 1982. V. 304. P. 155–210.

6. *Шулейкин В.В.* Физика моря. М.: Наука, 1968. 1090 с.

7. *Пери А.Х., Уокер Дж.М.* Система океан–атмосфера. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 194 с.

8. *Young I.R.* The form of the asymptotic depth-limited wind-wave spectrum. Part III. Directional spreading // Coastal Engeneering. 2010. V. 57. № 1. P. 30–40.

9. *Салин Б.М., Салин М.Б.* Комбинированный метод измерения трехмерных спектров волнения. II. Примеры использования основных схем измерений и анализ полученных результатов // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58. № 3. С. 200–213.