АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2012, том 58, № 6, с. 710–722

АКУСТИКА ОКЕАНА. ГИДРОАКУСТИКА

УДК 551.463

АЛГОРИТМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ 3D СПЕКТРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО ВОЛНЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ РАСЧЕТЕ ЧАСТОТНО-УГЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕВЕРБЕРАЦИИ

© 2012 г. Е. Л. Бородина, Б. М. Салин, М. Б. Салин

Институт прикладной физики РАН

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова 46

E-mails: bel@hydro.appl.sci-nnov.ru, salin@hydro.appl.sci-nnov.ru, mikesalin@hydro.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 01.03.2012 г.

На основе ранее разработанной модели рассеяния звука поверхностными возмущениями, характеризуемыми трехмерным спектром волнения, предлагается и тестируется довольно быстрый алгоритм расчета спектральной плотности мощности поверхностной реверберации, учитывающий условия распространения, дистанцию и, в том числе, характеристику направленности приемной системы. Для дистанций до 1000 м, глубины акватории ~20 м и реально измеренных 3D спектров волнения в диапазоне доплеровских частот ±5 Гц сделан расчет частотно-угловых спектров реверберации для акустического сигнала подсветки 1.5 кГц. Полученные при расчете угловые и частотные характеристики реверберации сопоставляются с результатами акустических измерений, выполненных с применением линейных горизонтальных приемных антенн.

Ключевые слова: рассеяние на поверхностном волнении, расчет реверберации, характеристики направленности реверберации, спектр рассеянного сигнала, брэгговское рассеяние, трехмерный спектр волнения.

Параметры рассеянных на взволнованной поверхности сигналов при заданном поле подсветки полностью определяются набором статистических характеристик волнения, поэтому если удается теми или иными средствами измерить все параметры волнения, влияющие на рассеяние, то появляется реальная возможность рассчитать и саму реверберацию. Наиболее просто расчет параметров реверберации на волнении можно выполнить для относительно низких частот, когда выполняется условие Рэлея $kL\sin\chi < 1$ (L – эффективная высота волны, k – волновое число звука). Так, в работе [1] для указанных условий были получены алгоритмы оценки параметров реверберации для моностатической схемы локации.

В данной работе предлагается и оценивается схема расчета параметров реверберации, возникающей при распространении тонального звука на мелководных стационарных трассах. Условно это можно назвать исследованием реверберации при бистатической схеме локации. Полученные при расчете данные по реверберации сопоставляются с результатами полунатурного эксперимента на трассе с параметрами: средняя глубина 20 м, протяженность трассы 100–400 м, общий размер акватории ~300 × 600 м.

Как было показано в работах [1–3], при тональной подсветке мелководной акватории на низких частотах отношение спектральной плотности мощности (СПМ) реверберации, измеренной в произвольной точке трассы распространения $\mathbf{r}_0$ (см. рис. 1), к квадрату уровня прямого сигнала $p^2(\mathbf{r}_0)$ на рабочей частоте излучателя f без учета эффектов затухания определяется выражением

$$p^2_{\text{norm}}(\mathbf{r}_0,\Omega) = \frac{2\pi^2 k^2 r_0}{H^3\chi_*}\sum_{m,n}\frac{\sin^2(\chi_m)\sin^2(\chi_n)}{\cos(\chi_m)\cos(\chi_n)}\times \\ \times\int\limits_S \frac{G^2(-\text{sign}\Omega\cdot\mathbf{K}_{m,n}(\mathbf{r},\mathbf{r}_0),|\Omega|)}{r|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|}ds. \quad (1)$$

Здесь k – волновое число акустического тонального (тонально-импульсного) сигнала подсветки; f и p_0 – частота и амплитуда сигнала подсветки (приведенная к 1 м); Ω – доплеровский сдвиг частоты акустического сигнала, принятого в точке $\mathbf{r}_0$; $\mathbf{r}$ – переменная интегрирования (рис. 1); H – характерная глубина волновода; χ_* – угол захвата лучей в волноводе (отсчитывается относительно горизонта); χ_m, χ_n – углы скольжения, соответствующие модам однородного волновода с номерами m, n и продольными волновыми числами k_m, k_n соответственно; S – характерная область акватории, на которой происходит рассеяние акустического сигнала, $G^2(\mathbf{K}, |\Omega|)$ – измеренная на акватории S трехмерная СПМ поверхностного волнения, $|\Omega|$ – циклическая частота ветрового волнения;

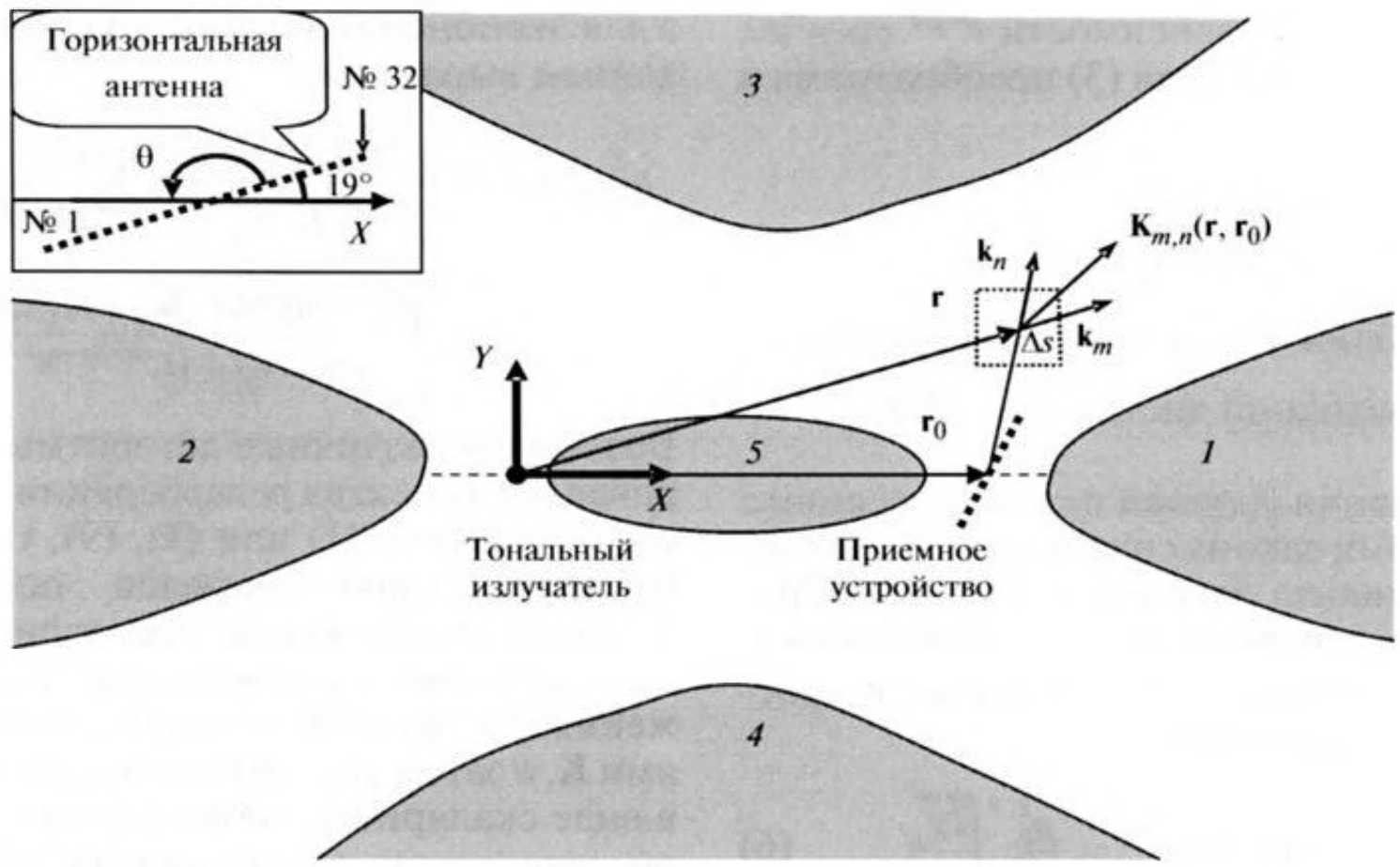

Рис. 1. Схема, поясняющая геометрию расположения приемоизлучающего устройства и алгоритм построения вектора $\mathbf{K}_{m,n}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$. Ось X совмещена с направлением распространения сигнала от излучателя к приемнику. В левом верхнем углу расположена схема ориентации приемной антенны, где №№ 1 и 32 обозначают первый и последний гидрофон антенны.

$\mathbf{K}$ – волновой вектор волнения, который рассчитывается для набора точек $\mathbf{r}$ в виде

$$\mathbf{K} = -\mathrm{sign}\Omega \cdot \mathbf{K}_{m,n}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = -\mathrm{sign}\Omega\left(k_m \frac{\mathbf{r}}{r} + k_n \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_0}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|}\right). \quad (2)$$

Трехмерная СПМ поверхностного волнения $G^2(\mathbf{K}, |\Omega|)$ (размерность м^4/Гц) измеряется или задается в системе координат, связанной с направлением трассы распространения. При этом ось X и, соответственно, K_x ориентируются вдоль трассы распространения, задаваемой вектором $\mathbf{r}_0$ (рис. 1), а начало координат ($\mathbf{r} = 0$) при расчете $\mathbf{K}_{m,n}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$ согласно (2) привязывается к месту расположения излучателя. В данной работе волновой вектор поверхностной волны обозначается заглавной буквой $\mathbf{K}$, волновой вектор акустической волны – строчной $\mathbf{k}$, модули векторов обозначаются K и k соответственно. При выводе (1) использовалось стандартное выражение для среднего значения уровня прямого сигнала [4]

$$p(r_0) = p_0\sqrt{2\chi_*/r_0 H}. \quad (3)$$

Схемы расчета параметров реверберации с использованием выражений (1)–(3) основываются на принципе брэгговского рассеяния акустического поля на пространственной структуре ветровых волн, которая в общем виде задается трехмерным спектром волнения $G^2(\mathbf{K}, |\Omega|)$. При этом для каждого локального рассеивающего участка Δs, расположенного на поверхности акватории S (рис. 1), и каждой пары мод приходящего и рассеянного полей находится волновой вектор суммарного акустического поля $k_m\frac{\mathbf{r}}{r} + k_n\frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_0}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|}$. Для найденного волнового вектора с использованием данных по спектру волнения $G^2(\mathbf{K}, |\Omega|)$, во-первых, оценивается квадрат амплитуды ветровой волны $G^2(k_m\frac{\mathbf{r}}{r} + k_n\frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_0}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|}, |\Omega|)$, на которой происходит брэгговское рассеяние звука на указанном участке Δs, и, во-вторых, рассчитывается амплитуда рассеянного сигнала. Суммируя рассеяние полного набора мод со всех локальных участков Δs, мы получаем суммарный спектр рассеянного поля, задаваемого выражением (1)[1].

Расчет, согласно (1), нормированной СПМ реверберации без учета затухания приводит к расходимости уровня рассеянного поля для значений $r|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0| \to \infty$, поэтому при вычислениях будем использовать следующие модели затухания звуковых волн:

– усредненную по модам экспоненциальную модель ослабления поля; выражение (3) при этом преобразуется к виду

$$p^2(r) = p_0^2(2\chi_*/rH) \times 10^{-\sigma r}; \quad (4)$$

– закон спадания интенсивности поля как r в степени –3/2, который, согласно [5], можно применять для расчета полей в мелком море на небольших дистанциях.

[1] Строгий вывод выражения для спектральной плотности рассеянного поля приводится в [3].

С учетом степенной зависимости $r^{-3/2}$ среднее значение интенсивности поля (3) преобразуется к виду

$$p^2(r) = \frac{p_0^2}{r^{3/2}}\sqrt{\frac{2\chi_*}{H}}, \tag{5}$$

при этом уровни ближнего и дальнего полей будут сшиваться на переходной дистанции[2] $H/2\chi_*$.

Для сопоставления уровней полей рассеяния с различными видами закона спадания выберем величину коэффициента затухания σ таким образом, чтобы в точке расположения приемника $\mathbf{r}_0$ уровни прямого сигнала, рассчитанные в соответствии с (4) и (5), совпали

$$p^2(r_0) = p_0^2(2\chi_*/r_0H)\times 10^{-\sigma r_0} = \frac{p_0^2}{r_0^{3/2}}\sqrt{\frac{2\chi_*}{H}}. \tag{6}$$

Из условия (6) находим коэффициент затухания σ в виде

$$\sigma = \frac{-1}{r_0}\lg\sqrt{\frac{H}{2\chi_* r_0}}. \tag{7}$$

Для типовых параметров эксперимента (относительно однородный волновод в заливе Ладожского озера с глубинами $H \approx 20$ м, $\chi_* \approx 0.5$ (или $\chi_* \approx \approx 30°$), $r_0 = 400$ м, $f = 1.5$ кГц) с которым мы будем сопоставлять расчетные данные, затухание, согласно (7), составит[3] $\sigma = 0.0016$ или 0.016 дБ/м. Однако в ряде случаев будут проводиться расчеты полей рассеяния и при большем значении затухания σ.

С учетом эффектов затухания и данных эксперимента расчет нормированной СПМ реверберации на доплеровских частотах Ω будет проводиться для степенного закона спадания поля (5) с использованием выражения

$$p^2_{\text{norm}}(\mathbf{r}_0,\Omega) = \frac{2\pi^2k^2r_0^{3/2}}{H^3\chi_*}\sqrt{\frac{H}{2\chi_*}}\times$$
$$\times\sum_{m,n}\frac{\sin^2(\chi_m)\sin^2(\chi_n)}{\cos(\chi_m)\cos(\chi_n)}\int_S\frac{G^2(-\text{sign}\Omega\cdot\mathbf{K}_{m,n}(\mathbf{r}),|\Omega|)}{r^{3/2}|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|^{3/2}}ds, \tag{8}$$

а для экспоненциального затухания – с использованием выражения

$$p^2_{\text{norm}}(\mathbf{r}_0,\Omega) = \frac{2\pi^2k^2r_0\times 10^{\sigma r_0}}{H^3\chi_*}\sum_{m,n}\frac{\sin^2(\chi_m)\sin^2(\chi_n)}{\cos(\chi_m)\cos(\chi_n)}\times$$
$$\times\int_S\frac{G^2(-\text{sign}\Omega\cdot\mathbf{K}_{m,n}(\mathbf{r}),|\Omega|)}{r|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|\times 10^{\sigma(r+|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|)}}ds. \tag{9}$$

Возможны различные алгоритмы расчета нормированного спектра реверберации, выполняемые в соответствии с (1) или (8), (9). Оптимальным по быстродействию оказался описанный ниже способ, позволяющий предварительно произвести частичное суммирование входящих в выражения (1), (8) и (9) величин с близкими значениями $\mathbf{K}$, а затем рассчитывать спектр реверберации в виде скалярного произведения найденной матрицы на спектр волнения $G^2(\mathbf{K}, |\Omega|)$).

В указанном методе используются следующие операции. Выбирается определенная сетка разбиения $U\times V$ поверхности S. Вся поверхность акватории S, на которой расположена трасса распространения и по которой выполняется интегрирование выражений (1) или (8), (9), разбивается указанной сеткой на элементарные участки с фиксированной площадью Δs (рис. 1), при этом интеграл по площади заменяется суммой по номерам участков (u, v). Для каждого участка поверхности, характеризуемого вектором $\mathbf{r}_{uv} = \{x_u, y_v\}$, проведенным из источника в центр площадки, и каждой пары мод (m, n) рассчитывается, согласно (1), (8) или (9), массив слагаемых $S_{m,n,u,v}$ в виде

$$S_{m,n,u,v}(\mathbf{r}_0) = \frac{2\pi^2k^2r_0\Delta s\sin^2(\chi_m)\sin^2(\chi_n)}{H^3\chi_*\cos(\chi_m)\cos(\chi_n)r_{u,v}|\mathbf{r}_{u,v}-\mathbf{r}_0|}\times$$
$$\times\begin{cases}1\\ \sqrt{Hr_0/2\chi_*r_{u,v}|\mathbf{r}_{u,v}-\mathbf{r}_0|}\\ \exp(\sigma r_0-\sigma(r_{u,v}+|\mathbf{r}_{u,v}-\mathbf{r}_0|))\end{cases}. \tag{10}$$

Для каждого элемента $S_{m,n,u,v}$ в соответствии с (2) вычисляется волновой вектор поверхностного волнения $\mathbf{K}_{m,n}(r_{u,v})$. В области пространственных частот фиксируется шаг дискретизации ΔK_x, ΔK_y и сетка $K_{i,j,}$, в узлах которой заданы или измерены значения спектра волнения $G^2(\mathbf{K}, \Omega)$. Далее в соответствии со значениями векторов $\mathbf{K}_{m,n}(r_{u,v})$ производится сортировка членов $S_{m,n,u,v}$ по i, j ячейкам, привязанным к узловым точкам вектора $\mathbf{K}$, в которых задана матрица ветрового волнения. Все члены $S_{m,n,u,v}$, попавшие в одну i, j ячейку, суммируются, образуя двумерную матрицу $W_{i,j}(\mathbf{r}_0)$ или $W(\mathbf{K}_{i,j},\mathbf{r}_0)$

$$W(\mathbf{K}_{i,j},\mathbf{r}_0) = \sum_{m,n,u,v}S_{m,n,u,v}, \tag{11}$$

[2] Дистанция, на которой изменения интенсивности поля переходит от сферического закона ($1/r^2$) к степенному ($1/r^{3/2}$).

[3] В эксперименте с использованием вертикальной антенны измерялся угол захвата χ_* и на дистанции 30–150 м от точки $\mathbf{r}_0$ определялся закон спадания поля. Было также установлено, что на частотах $f \sim 1$ кГц экспериментальные точки на указанной дистанции лучше всего ложатся на закон спадания интенсивности поля $r^{-3/2}$.

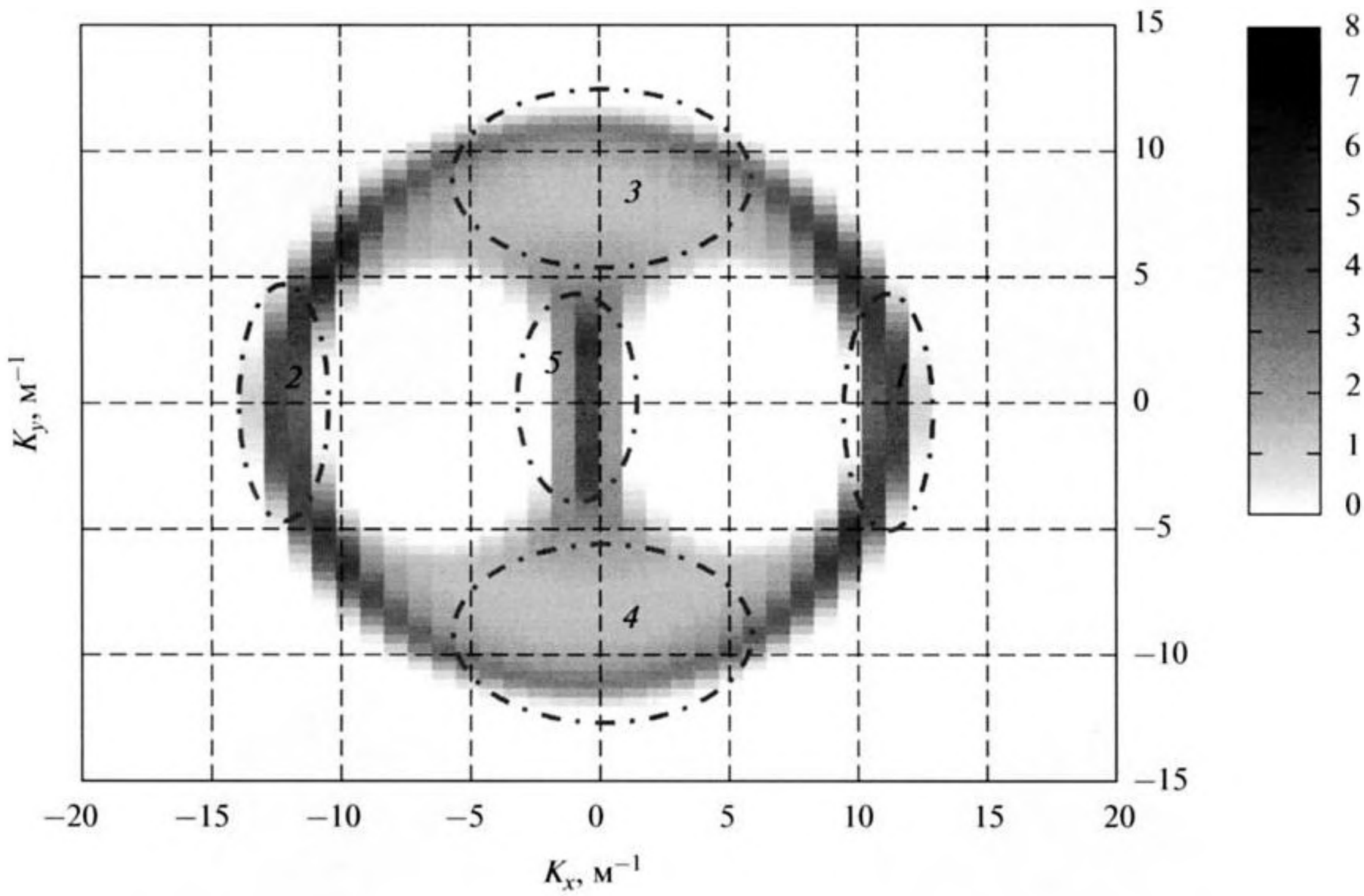

Рис. 2. Распределение функции $W(\mathbf{K})$ (в дБ отн. 1 м$^{-4}$), рассчитанное, согласно (3), без затухания для параметров: $\chi_* = 26.7°$, $H = 20$ м, скорость звука $C = 1500$ м/с, $f = 1500$ Гц, число мод $N = M = 18$, $r_0 = 400$ м. Интегрирование производилось по прямоугольнику с координатами по X от −1000 до +1400 м, по Y от −800 до +800 м. Размер элементарной площадки: $\Delta x = 1.5$ м, $\Delta y = 1$ м.

где для каждой пары индексов i, j суммирование производится только по тем значениям m, n, u, v, для которых выполняются условия

$$\begin{cases} \Delta K_x i \le \left(\mathbf{K}_{m,n}\left(r_{u,v}\right)\right)_x < \Delta K_x (i+1), \\ \Delta K_y i \le \left(\mathbf{K}_{m,n}\left(r_{u,v}\right)\right)_y < \Delta K_y (i+1). \end{cases}$$

Путем такого предварительного суммирования производится переход от 4-мерной матрицы $S_{m,n,u,v}$ к двумерной $W(\mathbf{K}_{i,j}, \mathbf{r}_0)$.

При приеме сигнала ненаправленным гидрофоном итоговое значение нормированной СПМ реверберации $p^2_{\text{norm}}(\mathbf{r}_0, \Omega)$ в точке $\mathbf{r}_0$ находится для положительных и отрицательных значений частот Ω как скалярное произведение (по переменным i, j) спектра волнения $G^2(-\text{sign}\Omega \cdot \mathbf{K}_{i,j}, |\Omega|)$ и найденной матрицы $W(\mathbf{K}_{i,j}, \mathbf{r}_0)$

$$p^2_{\text{norm}}(\mathbf{r}_0, \Omega) = \sum_{i,j} W(\mathbf{K}_{i,j}, \mathbf{r}_0) G^2(-\text{sign}\Omega \cdot \mathbf{K}_{i,j}, |\Omega|). \quad (12)$$

Выражение (12) демонстрирует линейную связь спектра реверберации со спектром ветрового волнения, что обусловлено выполнением условия Рэлея. Другими словами, область пространства играет роль линейного фильтра, который преобразует многомерный спектр ветрового волнения (входной сигнал) в спектр реверберации (выходной сигнал), при этом $W(\mathbf{K}_{i,j}, \mathbf{r}_0)$ играет роль амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра. Так, в случае $W(\mathbf{K}_{i,j}, \mathbf{r}_0) = \text{const}$ спектр реверберации будет полностью совпадать с одномерной СПМ ветрового волнения $G^2(|\Omega|)$, представленной, например, в виде спектра Пирсона–Московитца [6]

$$\begin{aligned} p^2_{\text{norm}}(\mathbf{r}_0, \Omega) &= C_1 \sum_{i,j} G^2(-\text{sign}\Omega \cdot \mathbf{K}_{i,j}, |\Omega|) = \\ &= C_2 G^2(|\Omega|) = C_2 \frac{\alpha g^2}{|\Omega|^5} \exp\left[-\beta (g/V|\Omega|)^4\right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Для обратного рассеяния, как показано в [1], матрица $W(\mathbf{K}_{i,j}, \mathbf{r}_0)$ близка к АЧХ двумерного узкополосного фильтра, настроенного на пространственную частоту $2k$ ($W(\mathbf{K}_{i,j}, \mathbf{r}_0) \to C_3(\theta)\delta(|\mathbf{K}_{i,j}| - 2k)$). При этом в реверберационном сигнале будут присутствовать только отдельные компоненты спектра ветрового волнения вблизи частоты пропускания $\Omega = \sqrt{2kg}$, определяемой дисперсионной зависимостью.

Рассмотрим преобразование трехмерного спектра волнения в спектр реверберации для общего случая – бистатической схемы локации. На рис. 2 для иллюстрации изображена функция $W(\mathbf{K}_{i,j}, \mathbf{r}_0)$, рассчитанная для трассы с указанными ранее параметрами (глубина 20 м, протяженность

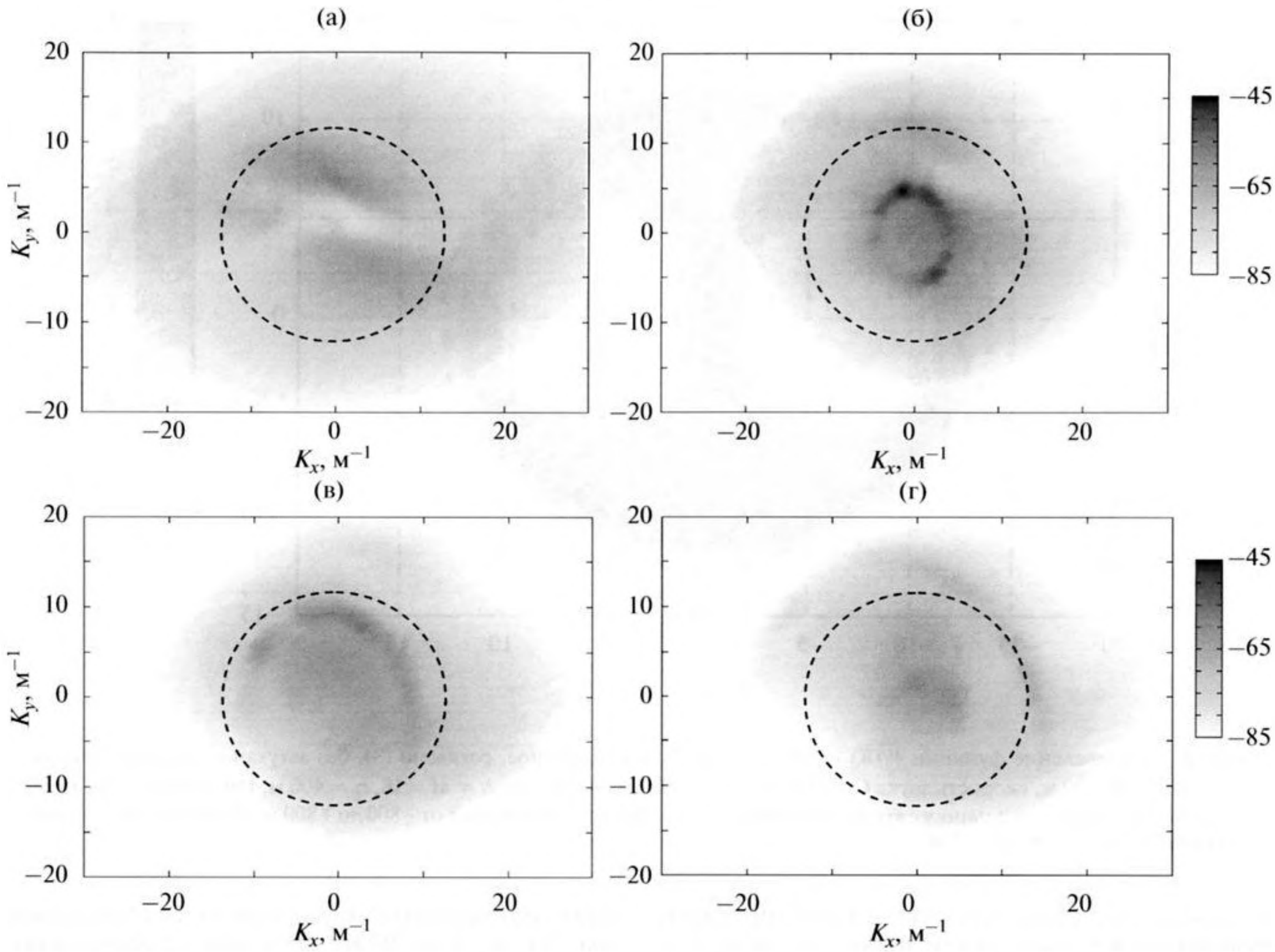

Рис. 3. Сечения СПМ ветрового волнения $G^2(\mathbf{K}, |\Omega|)$ (в дБ отн. 1 м^4/Гц) на частотах $\Omega/2\pi = 0.5$, 1, 1.5 и 2 Гц (рис. 3а–3г соответственно). Ось X и проекция K_x ориентированы в направлении от источника к приемной антенне (см. рис. 1). Пунктир соответствует кругу с радиусом $K = 2k$ для $f = 1500$ Гц (см. рис. 2).

трассы 400 м, частота 1.5 кГц) и шаге квантования $K_x = 0.92$ 1/м, и $K_y = 0.35$ 1/м. На рис. 3 представлены сечения СПМ ветрового волнения $G^2(\mathbf{K}, |\Omega|)$, измеренной с применением оптической схемы и соответствующих технических средств [7] на той же трассе в период проведения акустического эксперимента[4]. Как следует из (12), значения спектра реверберации для дистанции 400 м будут определяться скалярным произведением представленных на рис. 2 и 3 матриц: для отрицательных значений Ω – произведением $W(\mathbf{K}_{i,j}, \mathbf{r}_0)$ на $G^2(K_{i,j}, |\Omega|)$, для положительных значений Ω – произведением $W(\mathbf{K}_{i,j}, \mathbf{r}_0)$ на $G^2(-K_{i,j}, \Omega|)$.

Укажем на характерные особенности матрицы $W(\mathbf{K}_{i,j})$. Во-первых, на плоскости (K_x, K_y) отличные от нуля составляющие матрицы $W(\mathbf{K}_{i,j})$ расположены внутри окружности с радиусом $2k (K < 2k)$, что следует из принятой нами модели брэгговского рассеяния. Из этого также следует, что вклад в реверберацию при частоте локационного сигнала $f = Ck/2\pi$ будут давать компоненты спектра волнения, попадающие в круги радиуса $2k$, изображенные пунктиром на рис. 3а–3г. Во-вторых, внутри окружности радиуса $2k$ находятся еще две области (светлые круги на рис. 2), где $W(\mathbf{K}_{i,j})$ также обращается в нуль. Расстояние (перемычка) между краями областей составляет $4k\sin^2(\chi_*/2)$. При увеличении угла захвата волновода размер внутренних областей, где $W(\mathbf{K}_{i,j})$ обращается в нуль, уменьшается.

[4] Измерение трехмерного спектра волнения производилось с использованием относительно новой схемы, заключающейся в видеосъемке участка взволнованной поверхности и преобразовании видеоизображения в пространственно-временную зависимость рельефа волн. Указанное преобразование выполняется на основе калибровочных кривых, полученных от локальных измерительных датчиков – "оптических вешек" [1, 2, 7].

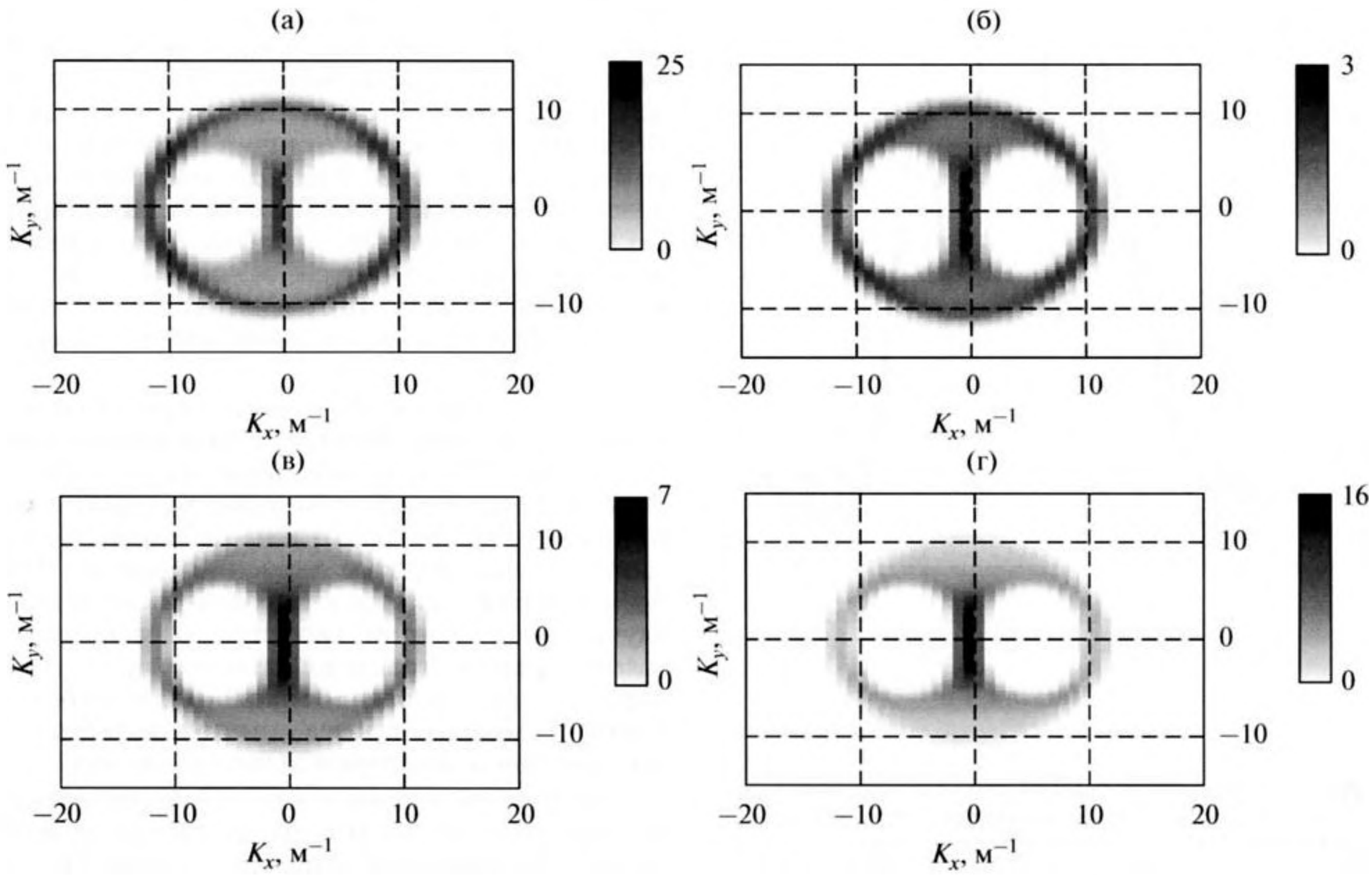

Рис. 4. Рассчитанные распределения функции $W(\mathbf{K})$: (а) без затухания для $r_0 = 400$ м; (б–г) с экспоненциальным затуханием 0.016 дБ/м для расстояний между источником и приемником $r_0 = 100$, 200 и 400 м соответственно.

Для ненулевых значений матрицы $W(\mathbf{K}_{i,j})$ можно выделить следующие характерные области пространственных частот. Например, для отрицательных значений Ω участки пространственных частот *1* и *2* (рис. 2) отвечают за вклад в реверберацию звука от областей пространства *1* и 2 (рис. 1), расположенных вдоль трассы распространения[5]. Значительные по площади участки с номерами *3* и *4* (рис. 2) соответствуют рассеянным полям, приходящих с боковых по отношению к трассе областей взволнованной поверхности с теми же номерами *3* и *4* (рис. 1).

И, наконец, рассеяние на поверхности, лежащей непосредственно между излучателем и приемником, соответствует участку пространственных частот с номером *5* (рис. 2). Следует отметить, что матрица $W(\mathbf{K}_{i,j})$ практически симметрична относительно начала координат ($W(\mathbf{K}_{i,j}) = W(-\mathbf{K}_{i,j})$).

Рисунок 4 иллюстрирует влияние на структуру $W(\mathbf{K}_{i,j})$ таких факторов, как длина трассы и соотношение длины трассы к характерной дистанции, на которой начинает сказываться затухание. Расчет выполнялся для следующих параметров: экспоненциальное затухание 0 и 0.016 дБ/м, расстояние r_0 между источником и приемником: 100 м (б), 200 м (в) и 400 м (а, г); интегрирование проводилось по площади 2400×1600 м^2 с элементарной площадкой 1.5×1 м^2. Параметры волновода: угол захвата 35°, глубина 20 м, скорость звука 1500 м/с, частота 1500 Гц, количество точек в спектре волнения 124×124. Как видно из рис. 4, при введении потерь и увеличении дистанции большую роль начинают играть низкие пространственные частоты ветрового волнения и соответствующая им область акватории, расположенная непосредственно между излучателем и приемным устройством (участки *5* на рис. 1 и 2). При малых дистанциях или отсутствии значительного затухания большой вклад в реверберацию могут давать высокие пространственные частоты спектра волнения (рис. 4а, 4б), удовлетворяющие равенству $|\mathbf{K}| \approx 2k$, что соответствует обратному рассеянию звука с расстояний, превышающих длину трассы распространения. Исходя из дисперсионного соотношения, этот эффект должен приводить к подъему компонент временного спектра на частотах $\Omega \approx \pm\sqrt{2kg}$. Для нашего случая ($f = 1500$ Гц) ожи-

[5] Для отрицательных значений доплеровских частот Ω участок спектра *1* на рис. 2 соответствует рассеянию от области *1* (рис. 1), для положительных значений Ω – спектр *1* соответствует рассеянию от области *2*.

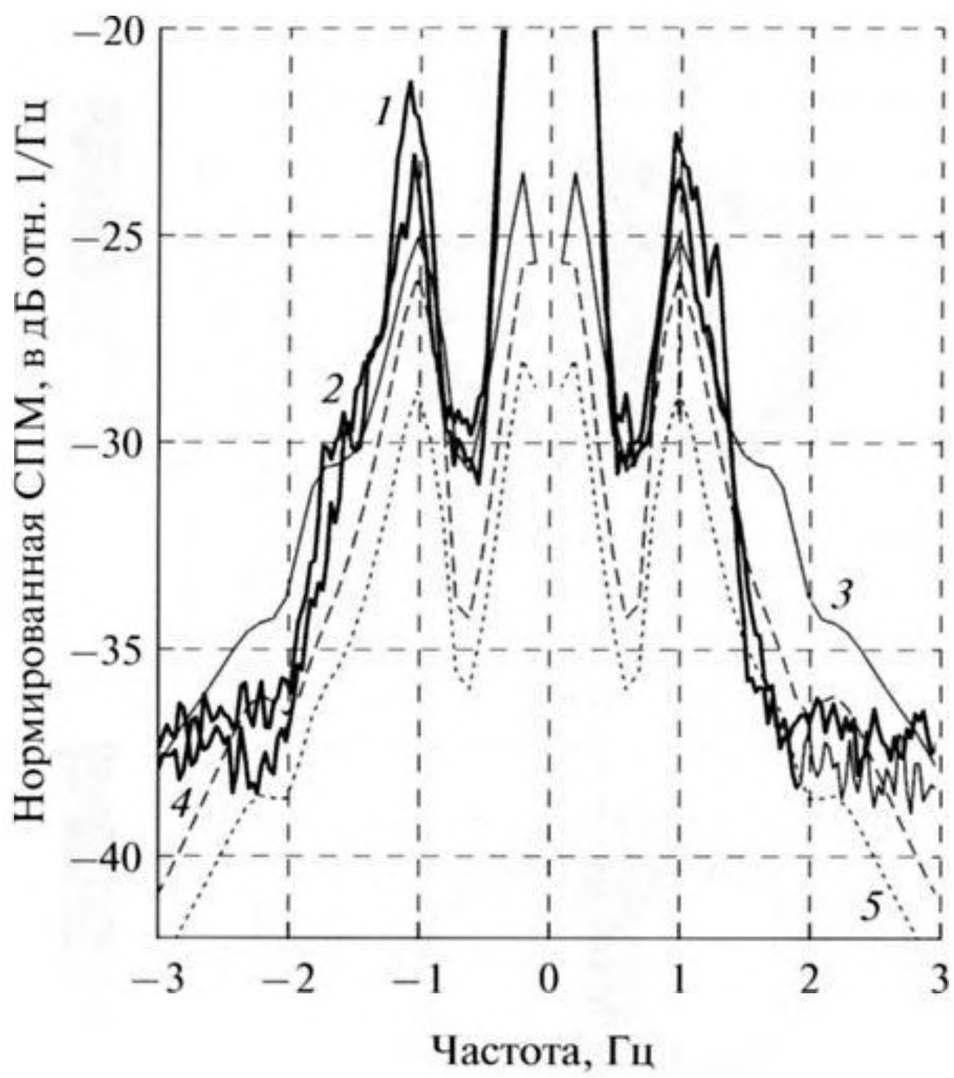

Рис. 5. Нормированная СПМ реверберации: *1* и *2* – экспериментальные данные, измеренные с интервалом 8 минут; *3*, *4* и *5* – расчетные данные для угла захвата $\chi_* = 35°$ без затухания (*3*), с экспоненциальным затуханием (*4*) и со степенной зависимостью потерь на распространение $r^{-3/2}$ (*5*).

даемый подъем спектра $p^2_{\text{norm}}(\mathbf{r}_0, \Omega)$ из-за рассеяния на дистанциях $r \gg r_0$ может наблюдаться на частотах $\Omega/2\pi \approx \pm 1.8$ Гц.

На рис. 5 представлены расчетные и экспериментальные данные по спектрам реверберации для несущей частоты $f = 1.5$ кГц. Эксперимент выполнялся при слабом ветровом волнении в заливе оз. Ладога в августе 2010 г. Максимумы спектра волнения (рис. 3б) и спектра реверберации (рис. 5) находились в районе частот 1.0–1.1 Гц. В экспериментах максимальное значение амплитуды ветрового волнения составило ~0.1 м, что для частоты $f = 1.5$ кГц с большим запасом обеспечило выполнение условия Рэлея.

Для условий проведения эксперимента по данным о трехмерном спектре волнения (отдельные сечения приведены на рис. 3) был выполнен, используя выражения (10)–(12), расчет нормированного спектра реверберации для всех трех составных частей выражения (10): без затухания, с экспоненциальным затуханием 0.016 дБ/м и с законом спадания интенсивности поля $1/r^{3/2}$. В расчет закладывался угол захвата волновода $\chi_* = 35°$ и параметры стационарной трассы: $H = 20$ м, $r_0 = 400$ м, $f = 1500$ Гц. Как видно из сравнения экспериментальных и расчетных зависимостей, представленных на рис. 5, в энергонесущем диапазоне частот ветрового волнения ($|\Omega/2\pi| < 2$ Гц) ближе к экспериментальным данным находятся расчетные спектры, полученные без учета затухания или с учетом экспоненциального затухания. В максимуме спектров отличия расчета и эксперимента составили 2–3 дБ. Для диапазона доплеровских частот $|\Omega/2\pi| > 2$ Гц, который для частоты $f = 1.5$ кГц соответствует, вообще говоря, рассеянию звука на гармониках основных частот поверхностного волнения, отличие экспериментальных и расчетных зависимостей (рис. 5) составило 3–5 дБ.

Следует также отметить, что предсказанный подъем компонент спектра реверберации в районе частоты 1.8 Гц наблюдается на экспериментальных кривых в области отрицательных значений доплеровских частот и не наблюдается в области положительных значений частот. Такая несимметрия спектров реверберации возможна в случае несимметрии областей рассеяния или условий распространения звуковых волн слева и справа от трассы распространения, что соответствует условиям проведения эксперимента в ограниченной акватории залива оз. Ладога.

Рассмотрим вопрос о влиянии длины трассы распространения на амплитуду спектра реверберации. Из общих соображений понятно, что если характерная дистанция до основной области рассеивателей значительно превышает расстояние между источником и приемником, то уровень нормированного спектра будет расти с расстоянием за счет уменьшения уровня прямого сигнала, на который происходит нормировка спектра. В противоположном случае, например при наличии значительного затухания, основная область рассеяния сосредоточена между излучателем и приемником, при этом изменение расстояния будет сказываться и на уровне рассеянного сигнала, и на уровне прямого, используемого для нормировки спектра.

На рис. 6а, 6б для двух доплеровских частот приведены графики расчетных зависимостей нормированных уровней реверберации от дистанции при наличии и отсутствии затухания. Как видно из рисунка, затухание в среде при прочих равных условиях ослабляет на 3–4 дБ нормированный уровень реверберации. Зависимость от расстояния в обоих случаях (с затуханием и в его отсутствие) практически идентичная: нормированный уровень реверберации возрастает на 2–3 дБ при удвоении расстояния (более медленное нарастание реверберации наблюдается при наличии затухания).

И, наконец, последний вопрос об угловой зависимости спектра реверберации. Естественно было бы ожидать, что в этом случае наличие или отсутствие затухания будет существенным образом влиять на азимутальные углы прихода реверберационного сигнала. Другими словами, при

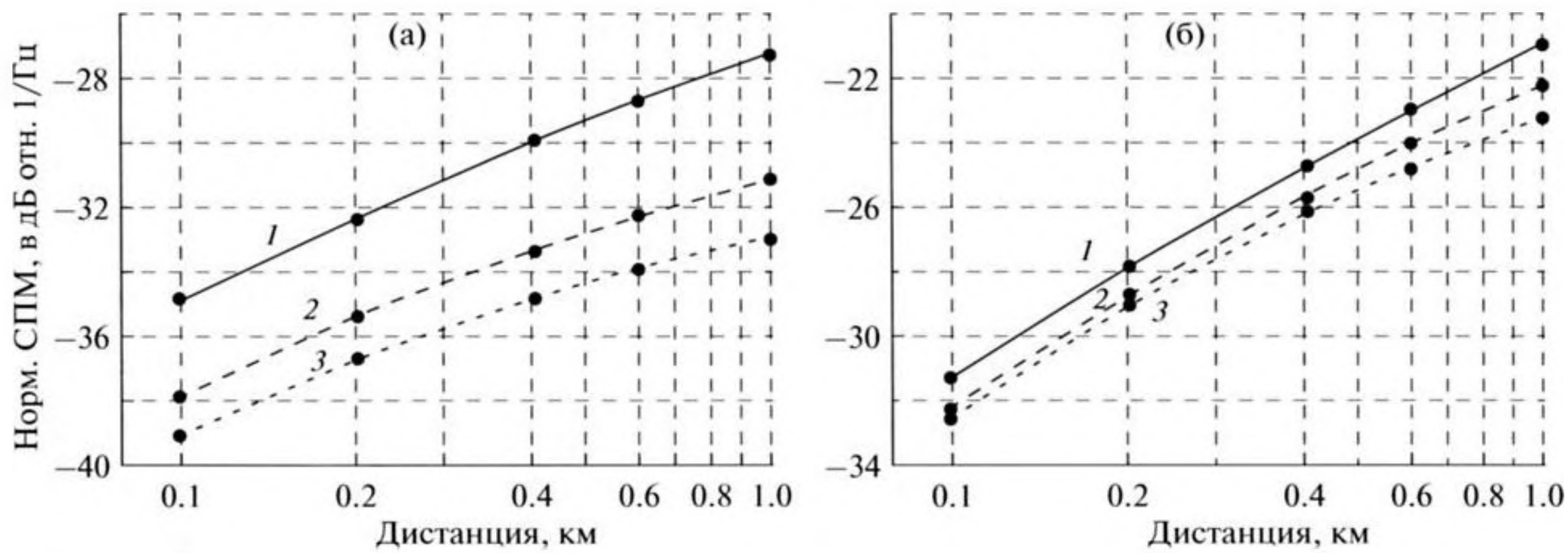

Рис. 6. Зависимость от дистанции расчетных значений нормированной СПМ реверберации на доплеровских частотах 0.6 (а) и 1 Гц (б) при затухании 0, 0.016 и 0.032 дБ/м (кривые *1*, *2* и *3* соответственно). Площадь интегрирования при расчете реверберации 2400 × 1600 м^2 с элементарной площадкой 1.5 × 1 м^2.

наличии затухания ожидается, что основной вклад в реверберацию будет давать область рассеивателей *5*, изображенная на рис. 1. При этом основным сектором углов прихода реверберации будет направление на излучатель, а основным диапазоном – низкочастотная область доплеровских частот (рассеяние на малых пространственных частотах, соответствующих низким частотам ветрового волнения).

В процессе выполнения экспериментов по исследованию азимутальной зависимости реверберации прием прямого и рассеянного сигналов осуществлялся на стационарную горизонтальную линейную 32-элементную антенну длиной $D = 6.2$ м, расположенную в середине толщи воды на глубине $H = 10$ м. Ось антенны (направление от 1-го к 32-му гидрофону) была ориентирована под углом 19° к направлению на приемник (см. рис. 1). Пространственная обработка сигналов осуществлялась стандартным способом. Формировался веер диаграмм направленности, а выходной сигнал с каждого лепестка диаграммы подвергался спектральному анализу. Фазирование антенны по узкополосному сигналу выполнялось путем введения соответствующих сдвигов фаз в виде

$$p(t,\theta_l) = \frac{1}{32}\sum_{n=1}^{32} p_n(t)\exp(ik\Delta x(n-1)\cos\theta_l). \qquad (14)$$

Здесь $p(t, \theta_l)$ – выходной сигнал антенны, сфазированный в направлении θ_l (направление на излучатель $\theta = 161°$); $p_n(t)$ – гетеродинированный на нулевую частоту выходной сигнал с n-го гидрофона; Δx – расстояние между гидрофонами антенны ($\Delta x = 0.2$ м). Квантование по углу θ для указанных параметров антенны и частоты $f = 1.5$ кГц выполняется исходя из равенства $\cos\theta_l = \lambda l/D$ для значений $l = -6, -5, ..., 6$. Полученные значения углов θ_l и границы секторов приема сигнала приведены в таблице, 3-й и 4-й столбцы.

На рис. 7 представлены экспериментальные данные по СПМ выходных сигналов антенны (14), нормированные на усредненный (по гидрофонам) уровень прямого сигнала (размерность полученных величин 1/Гц). Отсчет по углу θ ведется относительно вектора, соединяющего 1-й гидрофон с 32-м (см. рис. 1). Сумма нормированных значений СПМ выходных сигналов антенны (верхняя кривая) совпадает с нормированной СПМ сигнала одиночного гидрофона (два практически неразличимых друг от друга графика изображены в левом верхнем углу рис. 7а). Как видно из рисунка, основная доля реверберационного сигнала (две кривые на рис. 7б) приходит из сектора углов (по θ) от 135° до 225° (с учетом того, что диаграмма направленности линейной антенны симметрична относительно ее оси). Другими словами, основная доля сигнала приходит с направлений, близких к направлению на источник ($\theta = 161°$). Спектры реверберационного сигнала с других направлений в диапазоне частот от −2 до +2 Гц не сильно (2–3 дБ) отличаются друг от друга.

Расчет азимутальной зависимости реверберации, в отличие от более ранних работ [8], выполнялся с использованием измеренных значений 3-D спектров поверхностного волнения. Расчет выполнялся следующим образом. Вся рассеивающая поверхность S, на которой производится расчет СПМ (выражения (1), (8) и (9)), а также вычисление двумерной матрицы $W_{i,j}(\mathbf{r}_0)$, разбивается согласно выбранному набору углов θ_l на угловые сектора площадью S_l, центры которых находятся в точке расположения приемной системы $\mathbf{r}_0$. Далее для каждого сектора независимо производится расчет двумерной матрицы $W_{i,j}(\mathbf{r}_0)$ и по

Значения центральных углов и границ секторов в системах отсчета, связанных с антенной (X_A, Y_A), и источником (X, Y)

Номер	Центр. угол в системе (X_A, Y_A), град	Границы секторов в системе (X_A, Y_A), град	Центральный угол в системе (X, Y), град	Границы секторов в системе (X, Y), град
1	±15	−27–27	4, 34	−8...46
2	±36	±(27–43)	−17, 55	−24...−8, 46...62
3	±50	±(43–56)	−31, 69	−37...−24, 62...75
4	±61	±(56–66)	−42, 80	−47...−37, 75...85
5	±71	±(66–76)	−52, 90	−47...−57, 85...95
6	±81	±(76–85)	−62, 100	−66...−57, 95...104
7	±90	±(85–95)	−71, 109	−76...−66, 104...114
8	±99	±(95–104)	−80, 118	−85...−76, 114...123
9	±109	±(104–114)	−90, 128	−95...−85, 123...133
10	±119	±(114–124)	−100, 138	−105...−95, 133...143
11	±130	±(124–136)	−111, 149	−117...−105, 143...155
12	±144	±(136–152)	−125, 163	−133...−117, 155...171
13	±165	152–207	−146, −4	171...226

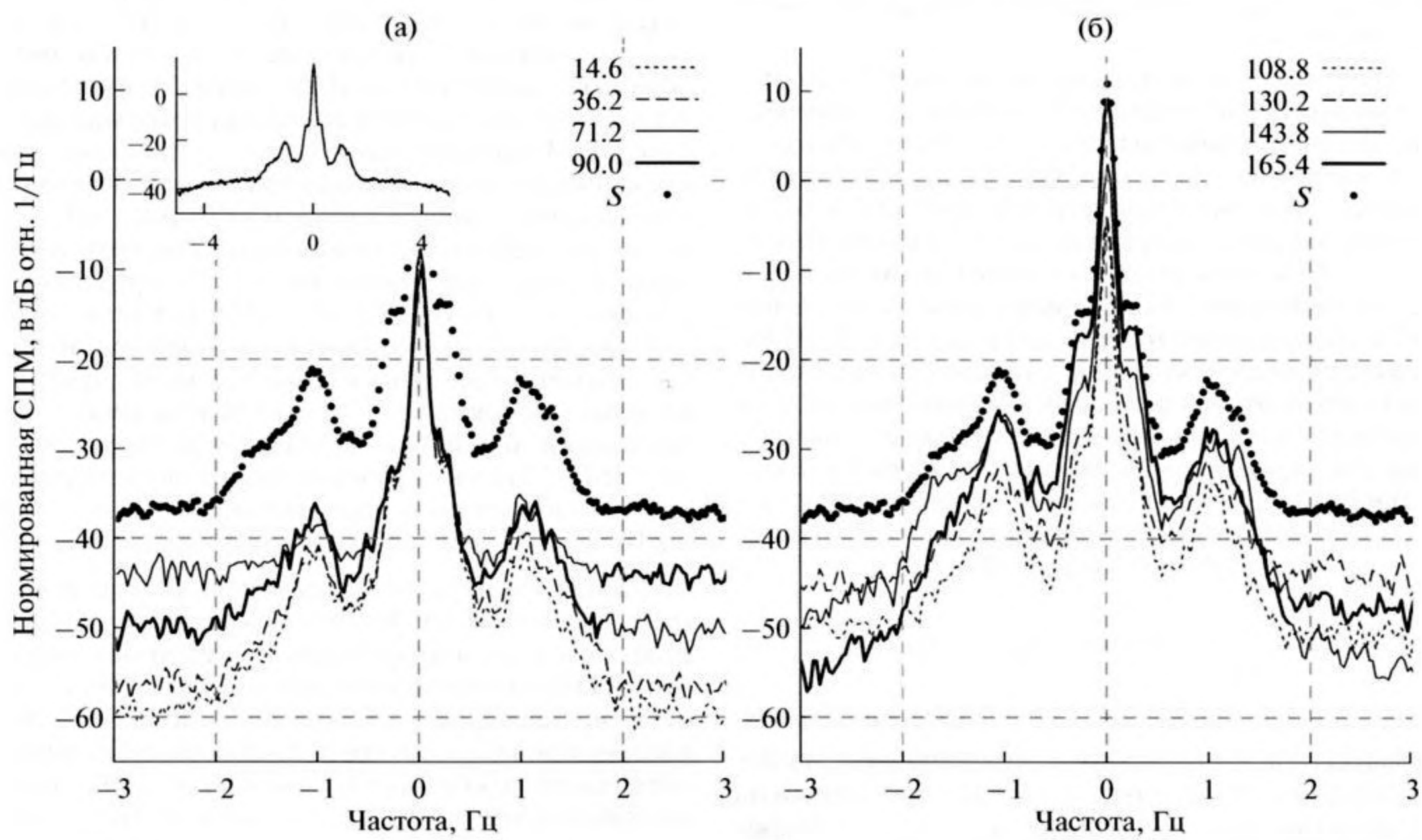

Рис. 7. Экспериментальные данные по нормированной СПМ выходных сигналов антенны, принятых с отдельных направлений (см. рис. 8): θ = 15°, 36°, 71°, 90° (рис. 7а) и θ = 109°, 130°, 144°, 165° (рис. 7б). Жирными точками (верхние кривые, идентичные для (а) и (б) обозначен результат суммирования спектров сигналов со всех секторов, входящих в диапазон углов 0°–180°. В левом верхнем углу изображены верхняя кривая рис. 7а (7б) и график нормированной СПМ реверберационного сигнала, принятого одиночным гидрофоном. Разрешение спектрального анализа $\Delta f = 0.0314$ Гц.

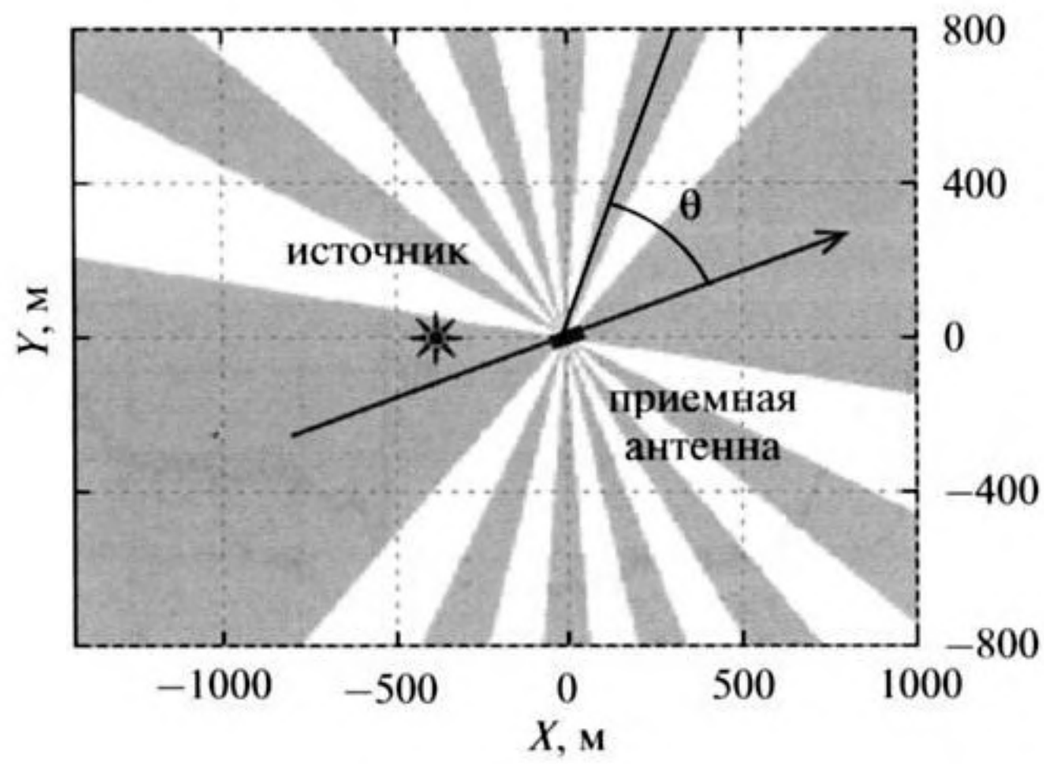

Рис. 8. Пример областей суммирования на рассеивающей поверхности при направленном приеме. Рамкой ограничена вся область суммирования, серым цветом показаны отдельные области суммирования (диаграммы), отвечающие значению $l = 0, \pm 2, \pm 4, \pm 6$. Точка (0, 0) соответствует центру приемной антенны, стрелкой показано направление приемной антенны (от 1-го гидрофона к 32-му).

ней, согласно (12), рассчитывается спектр реверберации, обусловленный рассеянием звука в конкретном угловом секторе.

Для исследования угловой зависимости реверберации разбиение на сектора делается равномерным по углу, а для сопоставления с антенными измерениями или составления прогнозных оценок конкретной приемопередающей системы ширина углового сектора выбирается исходя из длины антенны, ее ориентации и несущей частоты активного сигнала. На рис. 8 представлен общий вид секторов, конфигурация которых выбра-

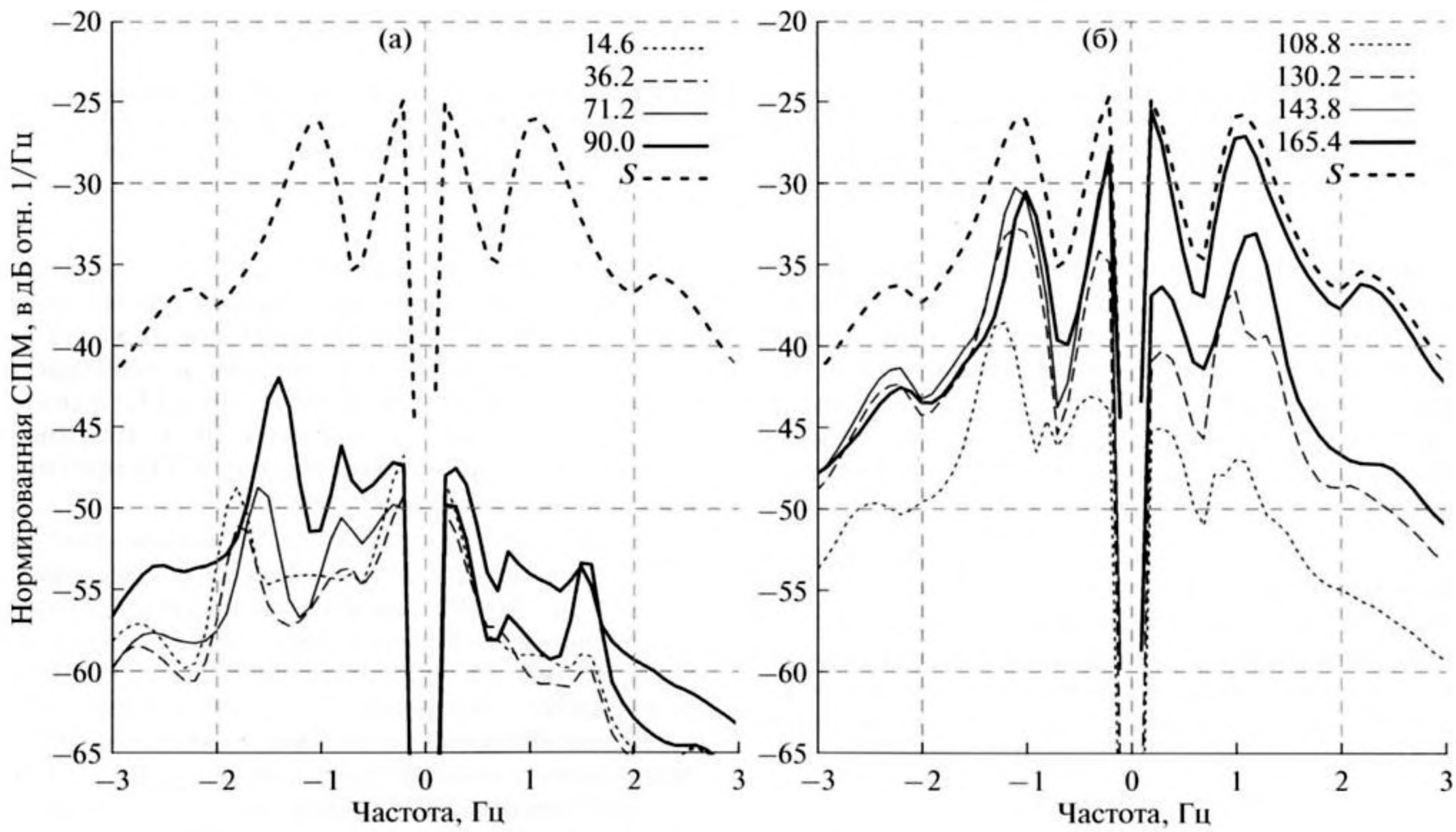

Рис. 9. Расчетные значения спектров реверберации для различных углов прихода сигнала на линейную антенну: результат суммирования по всей поверхности S (пунктирная линия S) и в секторах приема (линии с метками, обозначающими центральные углы секторов приема θ).

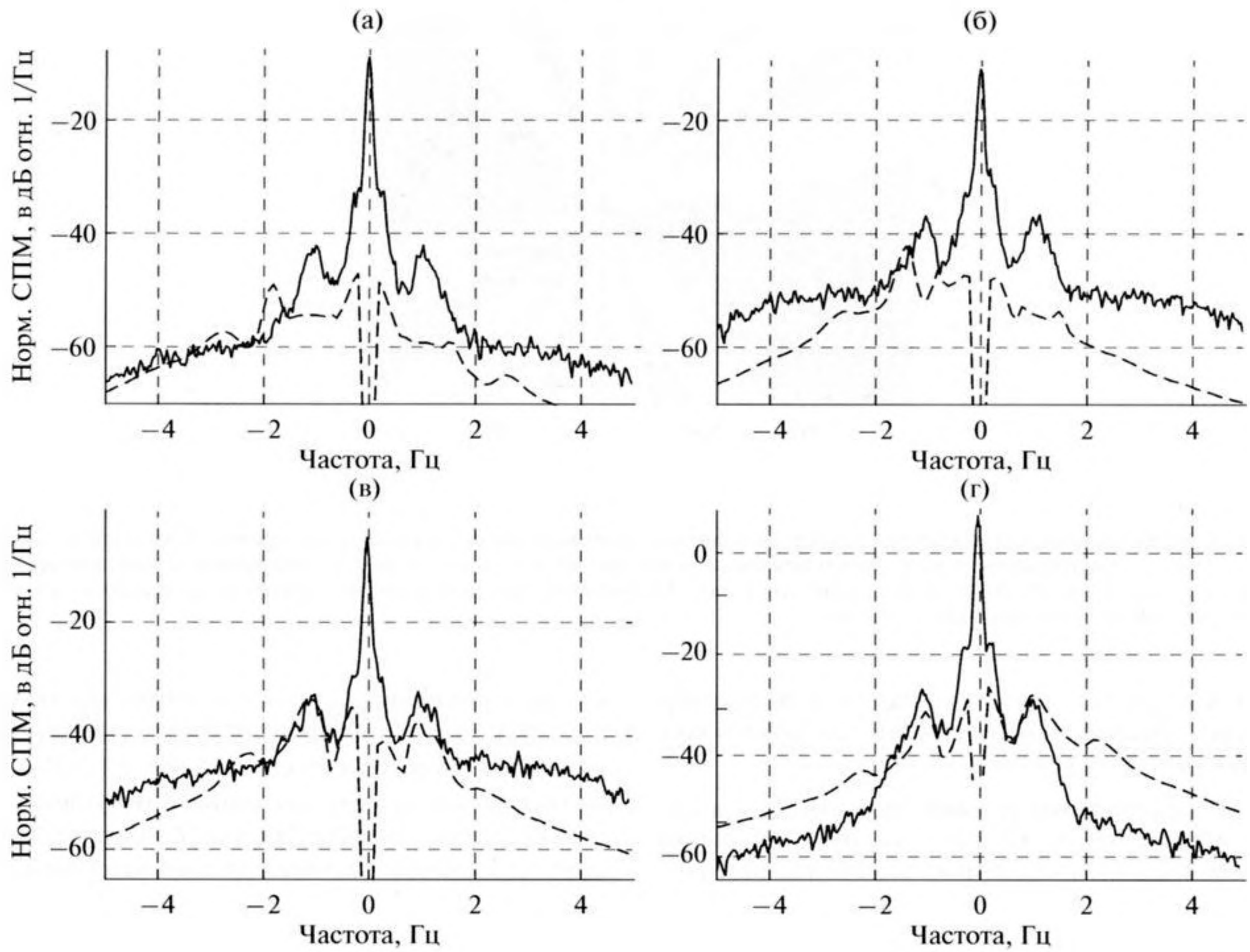

Рис. 10. Сопоставление экспериментальных и расчетных (пунктир) данных по спектрам реверберации для секторов линейной антенны, ориентированных в направлении θ: 0°, 90°, 130° и 180° (а), (б), (в) и (г) соответственно). Система координат связана с антенной, направление на излучатель соответствует фазированию антенны в направлении θ = 161°.

на (см. таблица) для указанных ранее параметров антенны $D = 6.2$ м, $f = 1.5$ кГц и ее расположения под углом 19° к направлению на источник. Изображение угловых секторов приема сигнала S_l, расположенных на S, приведено в системе координат, в которой производится расчет реверберации, т.е. ось X совпадает с направлением от излучателя к приемной системе (см. рис. 1).

На рис. 9 представлены результаты расчета спектров реверберации для указанных в таблице и на рис. 8 секторов. Расчеты выполнялись исходя из полного набора экспериментальных данных по трехмерному спектру ветрового волнения и реального расположения секторов S_l, показанных на рис. 8.

При сопоставлении графиков рис. 7 и 9 (с экспериментальными и расчетными данными) виден ряд совпадений и отличий. Совпадение графиков наблюдается в секторе углов в направлении на источник и при формировании в целом уровня рассеянного сигнала (верхняя кривая). Также довольно хорошо совпадает ширина рукава спектров (~10 дБ) на частотах выше 2 и ниже −2 Гц. Значительные отличия в спектре реверберации наблюдаются в диапазоне от −2 до +2 Гц в секторах углов 0°–110°, т.е. по нормали к антенне и вдоль антенны по направлению оси X (в противоположную сторону от источника).

На рис. 10 для сравнения на одном графике представлены экспериментальные и расчетные данные по СПМ реверберационного сигнала, принимаемого линейной антенной с различных направлений. Из рисунков также следует вывод об относительно хорошем совпадении расчетных и экспериментальных спектров, соответствующих направлению на излучатель (рис. 10в, 10г) и плохое совпадение для направления от излучателя (рис. 10а) и поперек трассы (рис. 10б). В результате проведения дополнительных исследований удалось установить, что с большой долей вероятности расхождение экспериментальных и расчет-

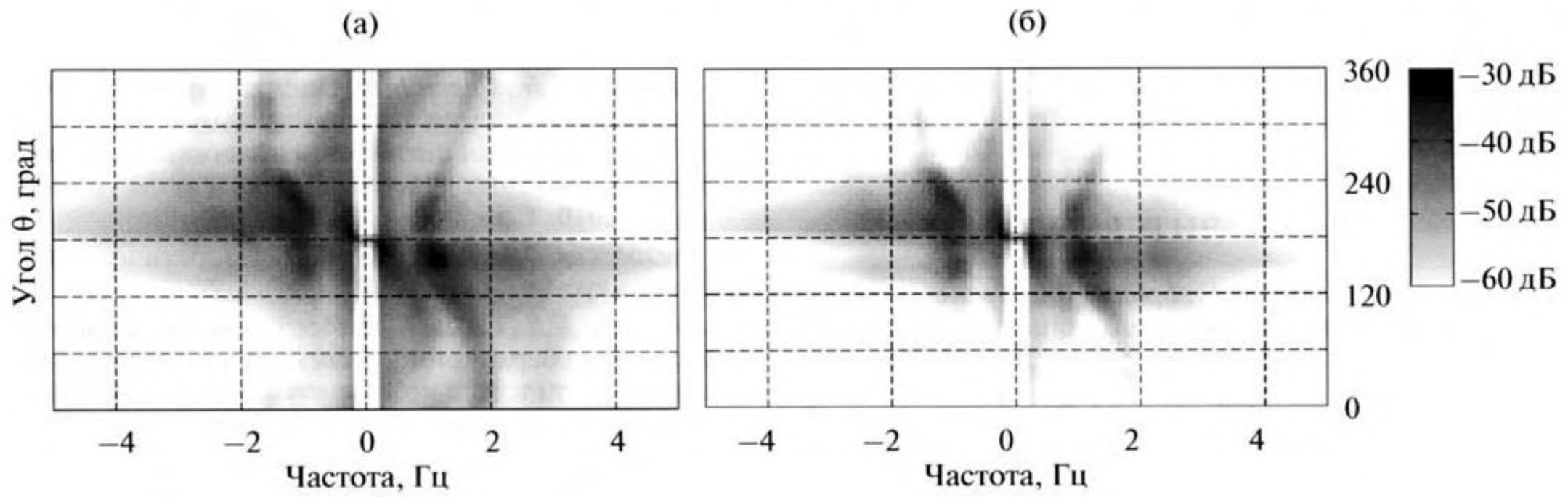

Рис. 11. Расчетные значения частотно-угловой зависимости реверберации, полученные при фиксированной ширине угловых секторов приемного устройства $\Delta\theta = 5°$ и значении затухания 0 и 0.03 дБ/м (рис. 11а и 11б соответственно).

ных значений обусловлено ограниченностью размера акватории по сравнению с длиной трассы[6].

В заключение приведем расчетные данные по угловой зависимости реверберации безотносительно к способу приема и характеристике направленности антенной системы. На рис. 11 в координатах азимут–доплеровская частота приведены расчетные данные уровня реверберации. При расчете использовались экспериментальные данные по трехмерным спектрам волнения и параметры трассы $H \approx 20$ м, $\chi_* \approx 32°$, $r_0 = 400$ м, $f = 1.5$ кГц, затухание 0 и 0.03 дБ/м (рис. 11а и 11б соответственно). Ширина сектора приема сигнала $\Delta\theta$ выбрана равной 5°. Направление на излучатель соответствует углу 180°.

На рис. 11а, 11б в обоих случаях видна сильная угловая анизотропия реверберационного сигнала. При отсутствии затухания анизотропия составляет ~20 дБ, а при затухании 0.03 дБ/м – порядка 30 дБ. Основной лепесток диаграммы направленности ориентирован, как и в экспериментальных данных, приблизительно в направлении на источник. На положительных частотах 20° вправо от пеленга на источник (пеленг ~160°), для отрицательных частот 20° влево (пеленг ~200°).

Интересно, что аналогичные результаты по разнонаправленному (относительно направления на источник) смещению максимумов для положительных и отрицательных значений частот наблюдались в серии натурных экспериментов [8]. Эксперименты выполнялись в шельфовой зоне с глубинами 60–80 м на дистанциях от 1.5 до 8 км при частоте сигнала подсветки 206, 246 и 420 Гц. Прием сигналов осуществлялся на горизонтальные линейные антенны. Как показали исследования, угол между направлениями максимумов диаграммы направленности реверберации для положительных и отрицательных значений частот составил 8°, 14° и 19° для доплеровских частот ±0.18, ±0.3 и ±0.24 Гц соответственно (в натурных экспериментах угол измерялся на доплеровских частотах, при которых уровень реверберации оказывался максимальным). Анизотропия диаграммы направленности реверберации составила от 15 до 25 дБ.

Рассматривая задачу по оценке параметров реверберации, возникающей из-за рассеяния тонального сигнала поверхностным волнением при его распространении на стационарных трассах, можно отметить следующие наблюдаемые или рассчитанные закономерности:

1. При использовании данных по трехмерным спектрам волнения предложенная схема расчета обеспечивает восстановление частотно-угловых характеристик реверберации с точностью ~3 дБ.

2. Нормированная спектральная плотность мощности реверберационного сигнала вне зависимости от характера затухания возрастает при увеличении дистанции на ~2–3 дБ при удвоении расстояния.

3. Вид спектра реверберации в направлении на излучатель в основном совпадает с локальным (в точке) спектром волнения, для других направлений возможно появление дополнительных максимумов в спектре, определяемых эффектами обратного рассеяния звука от удаленных областей поверхности.

4. По энергетике основной вклад в уровень реверберационного сигнала дает сектор углов, ориентированный на излучатель, причем положения

[6] Во-первых, приемная антенна располагалась в непосредственной близости от берега, поэтому обратного рассеяния из углового сектора вблизи 0° не существует. Во-вторых, при длине трассы 400 м характерная ширина залива также составляла ~300–400 м, а в расчетах реверберации закладывалась прямоугольная акватория с размерами ~2600 × 1600 м^2.

максимумов диаграммы направленности реверберации для положительных и отрицательных доплеровских частот различаются по углу на величину ~10–20 градусов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Салин Б.М., Салин М.Б., Spindel R.C.* Расчет спектра реверберационной помехи для доплеровской схемы локации // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 2. С. 258–266.
2. *Salin B.M., Salin M.B., Spindel R.C.* Investigation of the influence of wind waves on the spectral and angular characteristics of sea surface reverberation from a CW source // Proceedings of OCEANS 2010. Seattle, USA, 2010.
3. *Салин Б.М., Салин М.Б.* Методы и схемы расчета основных параметров реверберации, обусловленных рассеянием низкочастотных акустических волн на ветровом волнении с известными пространственно-временными характеристиками // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 6. С. 818–827.
4. *Бородина Е.Л., Салин Б.М.* Оценка влияния поверхностного волнения на спектральные характеристики тональных сигналов, распространяющихся на стационарных трассах в мелком море // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 5. С. 633–641.
5. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. М.: Наука, 2007. 374 с.
6. *Бородина Е.Л., Салин Б.М.* Исследование характеристик реверберационного сигнала на вертикальной антенне при тональной засветке мелководной акватории // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 6. С. 753–759.
7. *Бородина Е.Л., Салин М.Б.* Оценка пространственно-временных характеристик поверхностного волнения по видеоизображению // Изв. РАН. ФАО. 2010. Т. 46. № 2. С. 263–273.
8. *Бородина Е.Л., Салин Б.М.* Исследование азимутальной зависимости реверберационного сигнала при тональной засветке мелководной акватории // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 3. С. 380–389.