

УДК 551.463

ВЛИЯНИЕ МЕЖМОДОВЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ОКЕАНИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ СО ВЗВОЛНОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

© 2022 г. М. А. Раевский^а, В. Г. Бурдуковская^{а, *}

^аИнститут прикладной физики РАН,
ул. Ульянова 46, Нижний Новгород, 603950, БОКС-120 Россия

*e-mail: bvg@appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 21.04.2022 г.

После доработки 15.06.2022 г.

Принята к публикации 05.07.2022 г.

Исследуется влияние межмодовых корреляций на эффективность пространственной обработки сигнала в океанических волноводах со взволнованной поверхностью. Предложен алгоритм расчета корреляционной матрицы сигнала на апертуре горизонтальной антенной решетке (АР), учитывающий интерференционную структуру акустического поля в звуковом канале. Коэффициент усиления антенны анализируется для трех методов пространственной обработки: стандартного метода ФАР, метода оптимальной линейной обработки и метода оптимальной квадратичной обработки. Приведены результаты численного моделирования для гидрологических условий Баренцева моря в зимний период. Основное внимание уделяется интерференционным осцилляциям коэффициента усиления АР и зависимости от параметров задачи его значений, “сглаженных” на масштабе интерференционной структуры акустического поля в волноводе.

Ключевые слова: акустический волновод, ветровое волнение, многократное рассеяние, межмодовые корреляции, антенна, алгоритмы обработки

DOI: 10.31857/S0320791922060107

ВВЕДЕНИЕ

Одним из актуальных направлений теоретических исследований в акустике мелкого моря является изучение эффективности методов пространственной обработки сигналов удаленных источников с использованием протяженных антенных решеток (АР) [1–6]. Для исследования эффективности обнаружения (либо оценки параметров) акустических сигналов на фоне помех необходимо разработать теоретические или эмпирические модели, позволяющие рассчитывать корреляционные матрицы сигнала и помехи на апертуре АР. В частности, модель сигнала должна учитывать не только волноводный характер акустического поля в звуковом канале, но и его флуктуации, обусловленные ветровым волнением, случайными внутренними волнами и т.д. В типичных условиях мелкого моря сезонный профиль скорости звука зачастую полностью или частично открыт к свободной поверхности. В этом случае определяющее значение в формировании статистических характеристик сигнала приобретают эффекты многократного рассеяния акустического сигнала на взволнованной морской поверхности [7, 8].

Поскольку сами алгоритмы обработки частично когерентных сигналов хорошо известны [9–12], то исследование их эффективности, по сути, требует лишь конкретизации корреляционных матриц сигнала и помехи на апертуре АР.

В дальнейшем мы ограничимся простейшей моделью шума, некоррелированного на приемных элементах антенны, и уделим основное внимание статистической модели сигнала в волноводе со взволнованной свободной поверхностью. Имея в виду частотный диапазон $f \leq 500$ Гц, где затухание звука в волноводе относительно мало, для акустического поля будем использовать модовое разложение, а при вычислении корреляционной матрицы сигнала на апертуре АР – уравнения для моментов амплитуд нормальных мод в волноводе с нерегулярной границей. Именно такой метод использовался в предыдущих работах [4–6], где исследовалось влияние ветрового волнения на эффективность пространственной обработки сигнала с применением горизонтальной АР. При этом вычислялись корреляционные функции сигнала, усредненные по интерференционной структуре акустического поля в волно-

воде и, соответственно, анализировались коэффициенты усиления антенны (при различных способах обработки сигнала), “сглаженные” на пространственном интервале, превышающем периоды интерференционных осцилляций поля. Такой упрощенный подход, предложенный в работах [13, 14], позволил, не анализируя межмодовые корреляции, ограничиться расчетом на основании уравнения переноса лишь автокорреляционных функций модовых амплитуд, и в итоге плавной зависимостью “антенного выигрыша” от расстояния между источником и АР. При этом неисследованными остались следующие важные вопросы:

1. метод анализа локальной (т.е. при конкретном значении расстояния от АР до источника) эффективности пространственной обработки сигнала;

2. отличие таких локальных характеристик АР (например, коэффициента усиления) от “сглаженных” по интерференционной структуре характеристик;

3. влияние межмодовых корреляций на коэффициент усиления АР и зависимость этого эффекта от уровня ветрового волнения и длины акустической трассы.

Кроме того, сама идея использования усредненной по интерференционной структуре корреляционной матрицы сигнала для вычисления “сглаженных” характеристик обнаружения сигнала хотя и представляется разумной, но, строго говоря, не обоснована. Вычисление коэффициента усиления антенны при различных способах обработки сигнала, является, вообще говоря, нелинейной операцией и не коммутирует с операцией пространственного усреднения локальных характеристик. Для его обоснования необходимо сравнить результаты такого подхода и более строгой процедуры усреднения на максимальном масштабе интерференции мод непосредственно локальных значений коэффициента усиления АР. Все эти вопросы рассматриваются (разумеется, не в полном объеме) в данной работе.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Рассмотрим акустическое поле, создаваемое тональным точечным источником в океаническом волноводе со взволнованной свободной поверхностью. Волновод предполагается горизонтально однородным с произвольным профилем скорости звука и также произвольной плоскостистой структурой дна. Для прикладных задач акустики мелкого моря наиболее интересен низкочастотный диапазон $f \leq 500$ Гц, где затухание в донном грунте относительно мало и возможно распространение звука на десятки и сотни километров. В этом случае удобно использовать модовое разложение акустического поля. Представим [15] поле точечного источника в дальней зоне в

виде разложения по ортонормированным собственным функциям $\varphi_p(z)$ невозмущенного волновода:

$$p(r, z, t) = \sum_p \frac{a_p \varphi_p(z)}{\sqrt{k_p r}} \exp[i(k_p r - \omega_0 t - \pi/4)], \quad (1)$$

где a_p – амплитуды мод, k_p – волновые числа, ω_0 – частота излучения, r – расстояние от источника до точки наблюдения. При учете затухания в среде распространения волновые числа являются комплексными, в этом случае k_p будет обозначать реальную часть волнового числа, а его мнимая часть будет выделяться отдельно. В отсутствие ветрового волнения амплитуды разложения a_p определяются глубиной источника z_n , т.е. (с точностью до коэффициента, зависящего от уровня излучения) $a_p = \varphi_p(z_n)$. При наличии ветрового волнения свободная поверхность волновода является случайной функцией горизонтальных координат x, y и времени t и описывается уравнением $z = \zeta(x, y, t)$. Соответственно, и амплитуды a_p являются случайными функциями переменных x, y, t . Для их описания обычно используются два первых момента $\langle a_p(\mathbf{r}, t) \rangle$ и $\langle a_p(\mathbf{r}_1, t) a_q^*(\mathbf{r}_2, t) \rangle$, где $\langle \dots \rangle$ означает операцию статистического усреднения по ансамблю реализаций случайной функции $\zeta(\mathbf{r}, t)$. Для пространственной обработки сигнала на апертуре горизонтальной АР необходимо вычислить функцию когерентности поля давления:

$$\begin{aligned} & \langle p(\mathbf{r}_1, z, t) p^*(\mathbf{r}_2, z, t) \rangle = \\ & = \sum_{p,q} \langle a_p(\mathbf{r}_1, t) a_q^*(\mathbf{r}_2, t) \rangle \frac{\varphi_p(z) \varphi_q^*(z)}{\sqrt{k_p k_q r_1 r_2}} \times \\ & \quad \times \exp[i(k_p r_1 - k_q r_2)], \end{aligned} \quad (2)$$

где z – глубина АР. Эта функция является квазислучайной, т.е. меняется нерегулярным образом при изменении расстояния от источника до антенны. Именно поэтому в работах [13, 14] было предложено вычислять функции когерентности, усредненные по интерференционным осцилляциям поля. Там же было показано, что для описания таких “сглаженных” по интерференционной структуре функций когерентности достаточно анализировать автокорреляционные функции мод:

$$N_p(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \langle a_p(\mathbf{r}_1, t) a_p^*(\mathbf{r}_2, t) \rangle \quad (3)$$

(в случае стационарного ветрового волнения и тонального сигнала N_p не зависит от времени). Соответственно,

$$\begin{aligned} & \langle p(\mathbf{r}_1, z, t) p^*(\mathbf{r}_2, z, t) \rangle = \\ & = \sum_p N_p(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \frac{\varphi_p^2(z)}{k_p \sqrt{r_1 r_2}} \exp[ik_p(r_1 - r_2)]. \end{aligned} \quad (4)$$

Именно такое описание пространственных корреляций акустических мод использовалось ранее во всех работах [3–6], где исследовалось влияние ветрового волнения на эффективность пространственной обработки сигналов на апертуре горизонтальной АР. Тем самым, как предполагалось в этих работах, анализировались характеристики АР (в основном, ее коэффициент усиления), усредненные по интерференционной структуре акустического поля в волноводе, т.е. на масштабе

$$L = 2\pi \max \left[(k_p - k_q)^{-1} \right].$$

Здесь мы откажемся от этого приближения и будем анализировать эффективность пространственной обработки сигнала на произвольном удалении АР от источника. Для этого нам потребуется вычисление межмодовой корреляционной функции $\langle a_p(\mathbf{r}_1, t) a_q^*(\mathbf{r}_2, t) \rangle$. В многомодовом волноводе с нерегулярной свободной поверхностью для нее было получено уравнение переноса [14], которое является все же весьма сложным для непосредственного решения его аналитическими и численными методами. В то же время качественный анализ этого уравнения показал [14, 16], что для прогнозирования межмодовых корреляций в мелком море при типичных скоростях ветра можно использовать приближенное соотношение

$$\langle a_p(\mathbf{r}_1, t) a_q^*(\mathbf{r}_2, t) \rangle \approx \langle a_p(\mathbf{r}_1, t) \rangle \langle a_q^*(\mathbf{r}_2, t) \rangle,$$

т.е. при $q \neq p$ корреляционная функция равна произведению когерентных компонент модовых амплитуд, что существенно упрощает вычисление локальных функций пространственной когерентности поля давления на апертуре АР. Применимость этого приближения для условий распространения в мелком море обсуждается в [16]. Таким образом, для локальной корреляционной функции поля давления получаем выражение:

$$\begin{aligned} & \langle p(\mathbf{r}_1, z, t) p^*(\mathbf{r}_2, z, t) \rangle = \\ & = \sum_p \sum_{q \neq p} \langle a_p(\mathbf{r}_1, t) \rangle \langle a_q^*(\mathbf{r}_2, t) \rangle \frac{\Phi_p(z) \Phi_q(z)}{\sqrt{k_p k_q r_1 r_2}} \times \\ & \quad \times \exp[i(k_p r_1 - k_q r_2)] + \\ & + \sum_p N_p(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \frac{\Phi_p^2(z)}{k_p \sqrt{r_1 r_2}} \exp[ik_p(r_1 - r_2)]. \end{aligned} \quad (5)$$

При этом следует учитывать, что средние значения модовых амплитуд затухают с расстоянием r по закону [14]:

$$\langle a_p(\mathbf{r}, t) \rangle = \varphi_p(z_n) \exp[-(\gamma_p + |\operatorname{Im} k_p|)r], \quad (6)$$

где γ_p – декремент затухания когерентной компоненты модовой амплитуды a_p , в котором учтено рассеяние энергии данной моды как в другие моды дискретного спектра, так и в моды сплошного

спектра, $\operatorname{Im} k_p$ – мнимая часть волнового числа, обусловленная потерями в донном грунте и водной среде. Автокорреляционная функция $N_p(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ рассчитывается на основании уравнения переноса.

Введем декартову систему координат в горизонтальной плоскости, где начало координат совпадает с горизонтальными координатами источника и ось x проходит через центр АР. Абсциссу центра антенны обозначим R . В дальнейшем будем рассматривать функцию автокорреляции мод с поперечным разнесением точек наблюдения

$$N_p(\rho, x) = \left\langle a_p\left(-\frac{\rho}{2}, x\right) a_p^*\left(\frac{\rho}{2}, x\right) \right\rangle.$$

Уравнение переноса [13] для $N_p(\rho, x)$ имеет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N_p(\rho, x)}{\partial x} = \\ & = \sum_{p_2} W_{pp_2}(\rho, x) N_{p_2}(\rho, x) - 2(\gamma_p + |\operatorname{Im} k_p|) N_p(\rho, x), \end{aligned} \quad (7)$$

где W_{pp_2} – вероятность перехода между модами, описывающая эффекты взаимного рассеяния мод, локализованных в волноводе. Явный вид функций γ_p и W_{pp_2} приведен в работе [14] и в случае изотропного ветрового волнения выражается через его частотный спектр.

В дальнейшем нас будет интересовать коэффициент усиления АР при ее расположении в дальней зоне по отношению к источнику. В этом случае в формуле (5) для всех медленноменяющихся функций от r можно пренебречь отличием расстояния от источника до элементов антенны и учесть его только в фазовых множителях. Кроме того, путем добавления в двойной сумме по p и q слагаемого с $p = q$ перейдем в формуле (5) к независимому двойному суммированию по номерам мод. В дальнейшем нам потребуется корреляционная матрица сигнала на апертуре АР. Будем считать, что АР состоит из M элементов с межэлементным расстоянием d и ориентирована под углом φ_A в направлении на источник (угол отсчитывается от нормали к ее апертуре). Выражение для элементов корреляционной матрицы следует из (5) и может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned} N_{mn} & = C_m C_n^* + \sum_p (k_p R)^{-1} \varphi_p^2(z) \times \\ & \times [N_p(\rho = d|m-n|\cos\varphi_A, R) \times \\ & \times \exp[ik_p d(m-n)\sin\varphi_A] - \\ & - \varphi_p^2(z_n) \exp\{-2(\gamma_p + |\operatorname{Im} k_p|)R\}], \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} C_m & = \sum_p (k_p R)^{-\frac{1}{2}} \varphi_p(z_n) \varphi_p(z) \times \\ & \times \exp[ik_p R + ik_p d \sin\varphi_A m - (\gamma_p + |\operatorname{Im} k_p|)R]. \end{aligned}$$

Усреднение этого выражения по R на масштабе интерференционной структуры L приводит к формуле:

$$N_{mn} = \sum_p (k_p R)^{-1} \varphi_p^2(z) \times \quad (9)$$

$$\times N_p(\rho = d|m-n|\cos\varphi_A, R) \exp[ik_p d(m-n)\sin\varphi_A],$$

которая использовалась в предыдущих работах при расчете корреляционной матрицы сигнала. Отметим, что при получении (8), (9) пренебрегается кривизной фазовых фронтов акустических мод, что справедливо для расстояния $R \gg kL^2/8\pi$. При пространственной обработке сигнала на апертуре АР удобно использовать нормированную корреляционную матрицу с матричными элементами

$$\tilde{N}_{mn}(R) = \frac{N_{mn}(R)}{\sqrt{N_{mm}(R)}\sqrt{N_{nn}(R)}}, \quad (10)$$

т.е. межэлементными коэффициентами корреляции сигнала на апертуре АР.

Для количественной оценки эффективности пространственной обработки мы выберем коэффициент усиления антенны G , который стандартно определяется как величина выходного отношения сигнал/шум (ОСШ), отнесенная к величине ОСШ на отдельном элементе. Естественно, величина G зависит не только от вида корреляционной матрицы $\|N_{mn}\|$, но и метода пространственной обработки. Для сравнения мы выберем три метода пространственной обработки: стандартный метод формирования диаграммы направленности (ФАР), компенсированной в направлении на источник сигнала (величину G такой обработки обозначим G_0), метод оптимальной линейной обработки (коэффициент усиления обозначим G_1) и метод оптимальной квадратичной обработки (коэффициент усиления обозначим G_2). Поскольку нас интересует эффект, обусловленный статистической моделью сигнала, то в качестве помехи рассмотрим простейший вариант шума, некоррелированного на элементах АР. В этом случае, учитывая нормировку матрицы сигнала $\|N_{mn}\|$ и некоррелированность шума на всех элементах АР, для коэффициентов G_i имеем следующие выражения:

$$G_0(R) = \frac{1}{M} \times \quad (11)$$

$$\times \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M N_{mn}(R) \exp[-ik_A d(m-n)\sin\varphi_A],$$

$$G_1(R) = \lambda_1(R), \quad G_2(R) = \left[\sum_i \lambda_i^2(R) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

где $k_A = \omega/c(z_A)$, $\lambda_i(R)$ – собственные значения корреляционной матрицы $\|N_{mn}\|$, $\lambda_1(R)$ – макси-

мальное собственное значение. Аналогичные формулы приведены в работах [4, 5], но несколько в ином виде. Учитывая, что для нормированной матрицы сигнала $\sum_i \lambda_i(R) = \sum_n N_{nn}(R) = M$, нетрудно убедиться в тождественности соответствующих выражений. Что касается способа обработки, то метод ФАР не требует пояснений. Оптимальная линейная обработка состоит в скалярном умножении вектора сигнала на собственный вектор матрицы $\|N_{mn}\|$, соответствующий максимальному собственному значению $\lambda_1(R)$. Оптимальная квадратичная обработка сигнала является многоканальной и учитывает вклад всех собственных векторов корреляционной матрицы сигнала. При этом организуется несколько каналов обработки (число их равно рангу корреляционной матрицы), в каждом канале входной сигнал умножается на один из собственных векторов, после чего квадраты полученных для всех каналов скалярных произведений с весами, равными соответствующим собственным значениям $\lambda_i(R)$, поступают на сумматор и выход антенны. Очевидно, что значительного увеличения коэффициента усиления G_2 в сравнении с G_1 можно ожидать, если в результате декорреляции сигнала у матрицы $\|N_{mn}\|$ появятся несколько собственных значений, сопоставимых с $\lambda_1(R)$ (напомним, что для полностью когерентного сигнала матрица $\|N_{mn}\|$ имеет лишь одно ненулевое собственное значение).

Для получения конкретных результатов требуется также уточнить вид спектра ветрового волнения. В дальнейшем для частотного спектра изотропного волнения будем использовать общепринятую модель JONSWAP [17].

Прежде чем обсуждать результаты численного моделирования коэффициентов усиления G_i на основе приведенных выше формул, приведем некоторые качественные соображения о соотношении двух способов вычисления коэффициентов усиления G_1 и G_2 : на основании формулы (8), либо формулы (9). Полученное в данной работе выражение для локальной корреляционной матрицы $\|N_{mn}\|$ является не только более общим, но и физически наглядным, поскольку в явном виде разделяет вклад когерентной компоненты поля (диадная матрица $\|C_m C_n^*\|$) и вклад его рассеянной компоненты. Соответственно, более наглядно и описание коэффициентов усиления G_1 и G_2 при оптимальной обработке сигнала. На малом удалении АР от источника рассеянная компонента пренебрежимо мала. В этом случае сигнал можно считать когерентным и матрица $\|N_{mn}\| = \|C_m C_n^*\|$. Как известно, диадная матрица имеет лишь одно ненулевое значение, которое с учетом нормиров-

ки (10) равно M . С увеличением дистанции R эффекты многократного рассеяния накапливаются, вследствие этого относительный вклад рассеянной компоненты поля монотонно растет и появляются другие ненулевые значения λ_i . Поскольку $\sum_i \lambda_i = M$, отсюда следует, что λ_1 , а значит и коэффициент усиления G_1 уменьшается с дистанцией, а выигрыш квадратичной обработки, т.е. G_2/G_1 монотонно растет.

Описание коэффициентов усиления G_1 и G_2 с помощью усредненной по интерференционной структуре матрицы (9) не столь наглядно. Более того, если на значительном удалении оно удовлетворительно описывает “сглаженные” по дистанции результаты (см. следующий раздел), то на малом удалении АР от источника может приводить к неточным результатам. Действительно, для ориентированной под углом к источнику антенны даже на малых расстояниях, когда рассеянная компонента поля пренебрежимо мала и сигнал когерентен, матрица (9) не является диадной, т.е. обладает не одним, а несколькими ненулевыми собственными значениями. В этом случае $G_1 = \lambda_1 < M$ и $G_2 > G_1$. Таким образом, возникает ложный эффект декорреляции сигнала, который обусловлен не физическим механизмом рассеяния на ветровом волнении, а процедурой пространственного усреднения корреляционной матрицы. Для перпендикулярно ориентированной антенны ($\varphi_A = 0$) этот эффект отсутствует, поскольку когерентные моды на апертуре АН синфазны и все матричные элементы $\tilde{N}_{mn} = 1$. Для такой матрицы имеется лишь одно ненулевое собственное значение $\lambda_1 = M$, а значит $G_2 = G_1 = M$. Конкретная величина обсуждаемой ложной декорреляции может быть оценена лишь путем численного моделирования, но, очевидно, что она монотонно растет с увеличением угла φ_A .

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ввиду сложности задачи конкретные результаты были получены путем численных расчетов. При проведении численного моделирования наряду с приведенными выше уравнениями и аналитическими выражениями использовалась стандартная модовая программа. При этом очевидно, что интересующие нас эффекты наиболее значимы для условий распространения звука в мелком море. Рассмотрим результаты численных расчетов коэффициентов усиления G_i для мелководного звукового канала со слабым положительным градиентом скорости звука, что, например, типично для Баренцева моря в зимний период. Предполагая профиль скорости звука линейным, выберем следующие параметры: $c(0) = 1490$ м/с, $c(H) = 1500$ м/с, глубина дна $H = 200$ м. Тип и параметры донного грунта в мелком море отличаются большим разнообразием [18], но все же можно считать, что для верхнего (толщиной не-

сколько десятков метров) слоя донного грунта типичны неконсолидированные либо полуконсолидированные осадки. В качестве модели дна будем использовать жидкое полупространство. Эта модель широко применяется при численном моделировании не только для неконсолидированных осадков, где модуль сдвига практически равен нулю, но и для полуконсолидированных осадков, где модуль сдвига существенно меньше модуля сжатия и, соответственно, роль сдвиговых волн сравнительно невелика. Мы приведем результаты расчетов для двух моделей дна: неконсолидированные осадки с типичными параметрами $\rho_0 = 2$ г/см³, $c_l = 1800$ м/с, коэффициента затухания $\delta = 0.2$ дБ/км Гц и полуконсолидированные осадки с параметрами $\rho_0 = 2$ г/см³, $c_l = 2500$ м/с, $\delta = 0.1$ дБ/км Гц. Предполагаем, что источник с частотой излучения $f = 250$ Гц расположен на глубине $z_{\text{и}} = 100$ м. Горизонтальная АР с числом элементов $M = 51$ и межэлементным расстоянием $d = 3$ м расположена вблизи дна $z_A = 197$ м и ориентирована либо перпендикулярно к направлению на источник ($\varphi_A = 0$), либо под углом ($\varphi_A = 30^\circ$). Расчеты проводились для скорости ветра $V = 10$ и $V = 15$ м/с, т.е. умеренного и сильного ветрового волнения. На рис. 1 приведены результаты численного моделирования локальных коэффициентов усиления G_i в диапазоне расстояний $5 \leq R \leq 300$ км для антенны, ориентированной перпендикулярно к источнику. Анализируя эти результаты, отметим, прежде всего, что интерференционная изменчивость коэффициентов усиления порядка нескольких децибел, что существенно меньше интерференционных вариаций интенсивности самого поля в волноводе. При скорости ветра $V = 10$ м/с осцилляции значений G_0, G_1 не превышают 4–5 дБ. Коэффициент усиления G_2 , соответствующий оптимальной квадратичной обработке сигнала, имеет еще меньшие интерференционные осцилляции. На малых удалениях АР от источника ($R \leq 100$ км) они имеют значения порядка 2–2.5 дБ, а на значительных удалениях R порядка 200–300 км эти осцилляции не превышают 0.5–1 дБ. При скорости ветра $V = 15$ м/с максимальные интерференционные изменения всех коэффициентов усиления G_i не превышают одного децибела на малых удалениях АР от источника ($R \leq 50$ км) и практически отсутствуют при $R \geq 100$ км, что объясняется быстрым затуханием межмодовых корреляций при сильном ветровом волнении.

Для сравнения приведем результаты расчетов при $V = 10$ м/с интерференционной структуры интенсивности когерентной компоненты самого акустического поля, нормированной на значение, полученное при некогерентном суммировании мод:

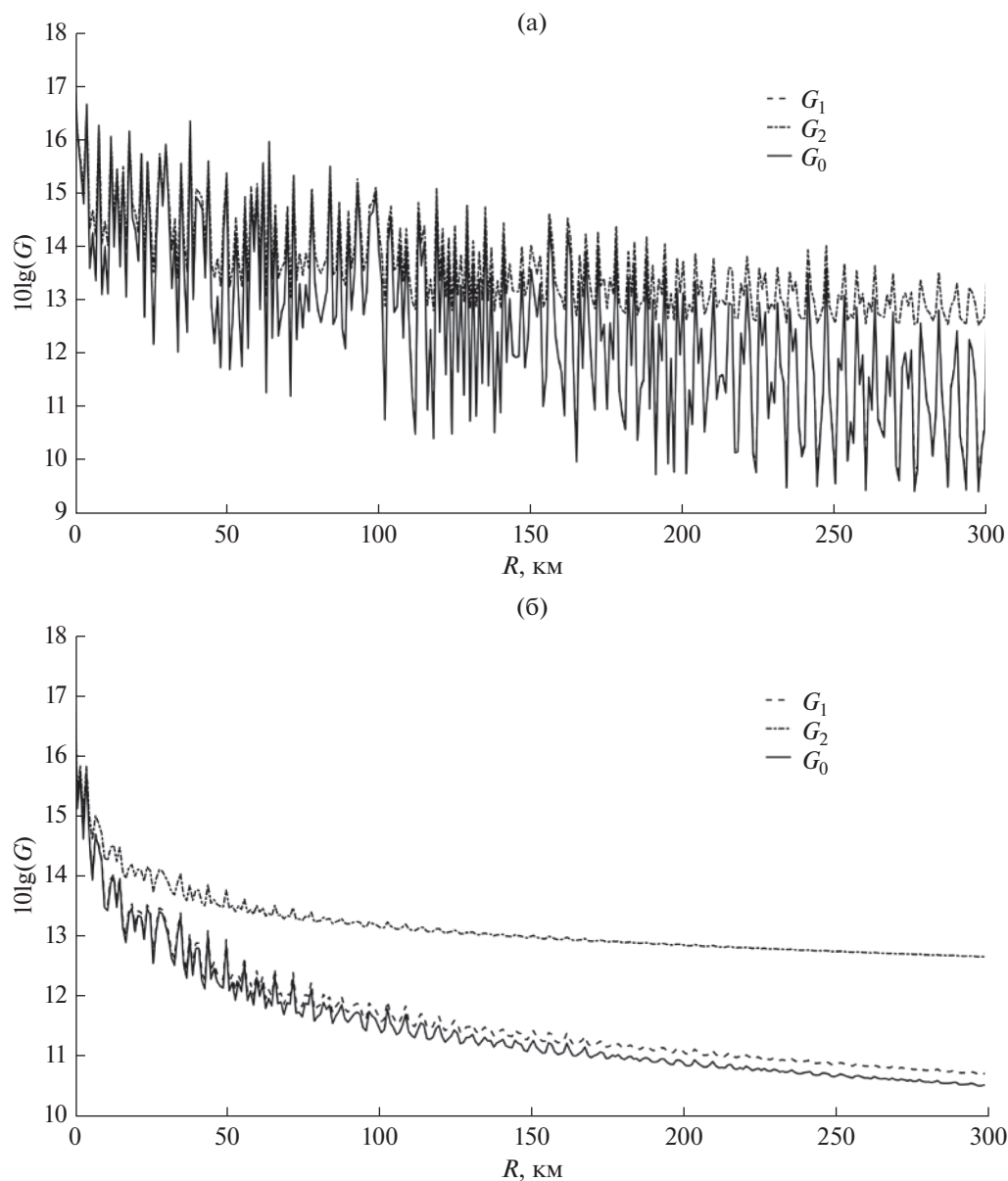


Рис. 1. Локальные коэффициенты усиления G_i для антенны, ориентированной перпендикулярно к источнику, при скорости ветра (а) – $V = 10 \text{ м/с}$ и (б) – $V = 15 \text{ м/с}$ (неконсолидированные донные осадки).

$$I(R) = \frac{\left| \sum_P (k_p R)^{\frac{1}{2}} \varphi_p(z_n) \varphi_p(z) \exp[ik_k R - (\gamma_p + |\text{Im } k_p|) R] \right|^2}{\sum_P (k_p R)^{-1} \varphi_p^2(z_n) \varphi_p^2(z) \exp\{-2(\gamma_p + |\text{Im } k_p|) R\}}. \quad (13)$$

Результаты расчетов $I(R)$ при скорости ветра $V = 10 \text{ м/с}$ и на глубине z_A приведены на рис. 2. Видно, что интерференционные осцилляции интенсивности акустического поля в волноводе весьма значительны и имеют характерные значения порядка 25–30 дБ. Таким образом, интерференционная изменчивость коэффициентов уси-

ления G_i существенно меньше, чем интерференционные вариации самого акустического поля.

Наряду с локальными значениями коэффициентов усиления АР при различных способах пространственной обработки представляют интерес и их значения, “сглаженные” на некотором интервале Δr , полученные путем усреднения локаль-

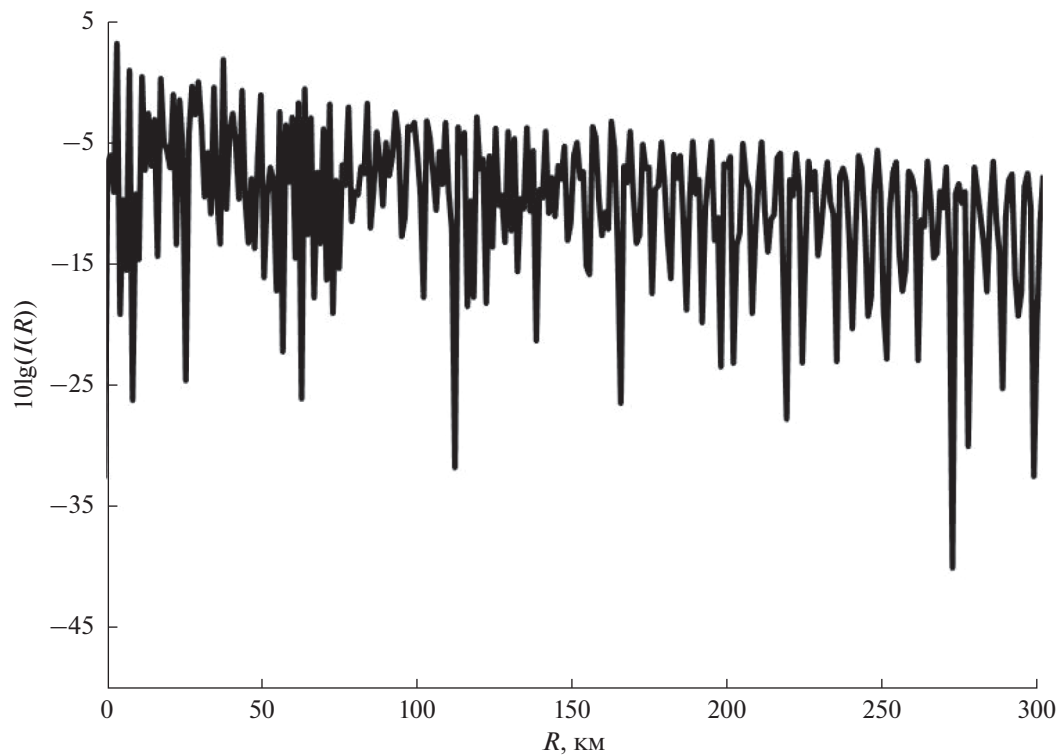


Рис. 2. Нормированная интенсивность когерентной компоненты акустического поля при скорости ветра $V = 10$ м/с.

ных значений скользящим окном. Результаты этой процедуры, обозначенные \bar{G}_i , при $\Delta r = 10$ км приведены на рис. 3–4. Там же для сравнения показаны расчетные кривые коэффициентов усиления, полученные аналогично тому, как это делалось в работах [4–6], т.е. с использованием усредненных по интерференционной структуре корреляционных функций сигнала, не учитывающих межмодовые корреляции. Сравнение этих результатов показывает, что при скорости ветра $V = 15$ м/с соответствующие значения коэффициентов усиления G_i практически совпадают. При скорости ветра $V = 10$ м/с имеется некоторое отличие “сглаженных” на интервале Δr коэффициентов усиления G_i и аналогичных значений, полученных на основе усредненной по интерференционной структуре корреляционной функции сигнала, но это отличие невелико (менее децибела). Впрочем, и это малое отличие, по-видимому, может быть устранено путем уточнения процедуры пространственного “сглаживания” коэффициентов усиления на интервале Δr . Что касается изменения с дистанцией “сглаженных” по интерференционной структуре коэффициентов усиления, то результаты линейной обработки (G_1) и метода ДН (G_0) практически совпадают и монотонно спадают от значения 17 дБ, соответствующего когерентному сигналу, до 10.5–11 дБ на расстоянии $R = 300$ км. Выигрыш квадратичной обработки (отношение G_2/G_1) растет с расстоянием по мере увеличения

степени декорреляции сигнала и достигает 2 дБ при $R = 300$ км.

Зависимость локальных значений коэффициентов усиления G_i от расстояния до источника при ориентации антенны под углом $\varphi_A = 30^\circ$ приведена на рис. 5. Нетрудно видеть, что интерференционные осцилляции локальных коэффициентов G_i аналогичны случаю перпендикулярно ориентированной антенны. Для коэффициентов G_1 и G_0 они имеют характерные значения порядка 4–5 дБ при $V = 10$ м/с, а при $V = 15$ м/с не превышают одного децибела на малых расстояниях $R \leq 50$ км и практически отсутствуют на более значительном удалении АР от источника. Интерференционные осцилляции коэффициента G_2 , соответствующего оптимальной квадратичной обработке, при $V = 10$ м/с порядка 2–3 дБ на расстоянии $R \leq 100$ км и не превышают 1–2 дБ на удалении $R = 200$ –300 км. При скорости ветра $V = 15$ м/с интерференционные осцилляции G_2 менее децибела при $R \leq 100$ км и практически отсутствуют при дальнейшем удалении АР от источника. Следует также отметить, что на малых расстояниях G_0 существенно меньше G_1 , т.е. для АР, ориентированной под углом к источнику, метод ДН проигрывает оптимальной линейной обработке, поскольку не предполагает фазовой компенсации для каждой из акустических мод на апертуре АР [4]. При увеличении R модовый

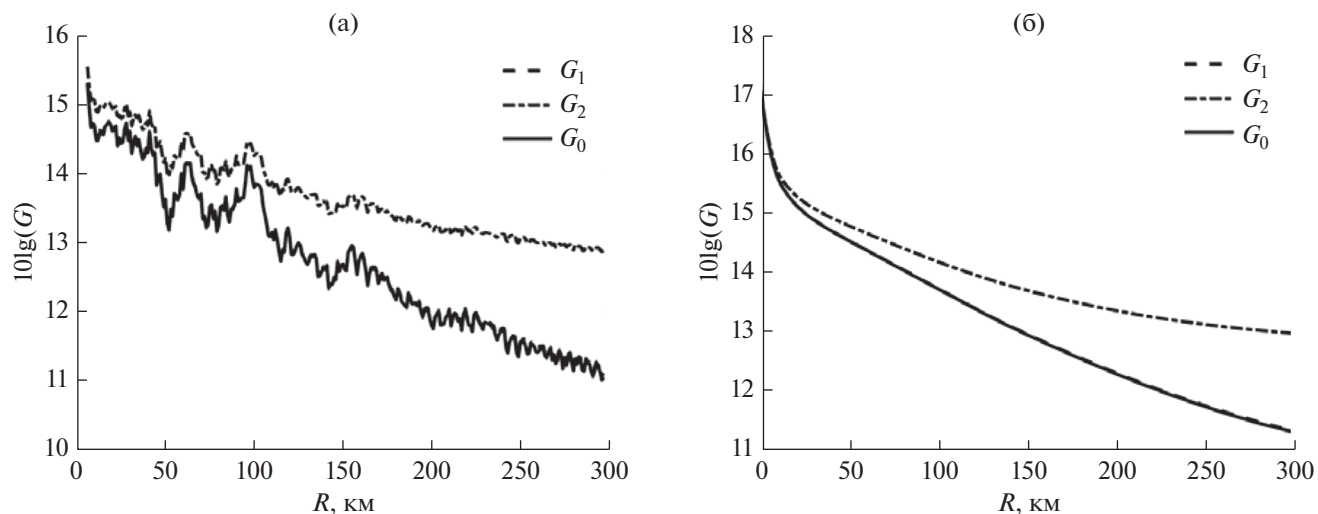


Рис. 3. Результаты численного моделирования при $\varphi_A = 0$, $V = 10$ м/с локальных коэффициентов усиления G_i : (а) – “сглаженных” на масштабе $\Delta r = 10$ км и (б) – коэффициентов усиления, полученных без учета межмодовых корреляций.

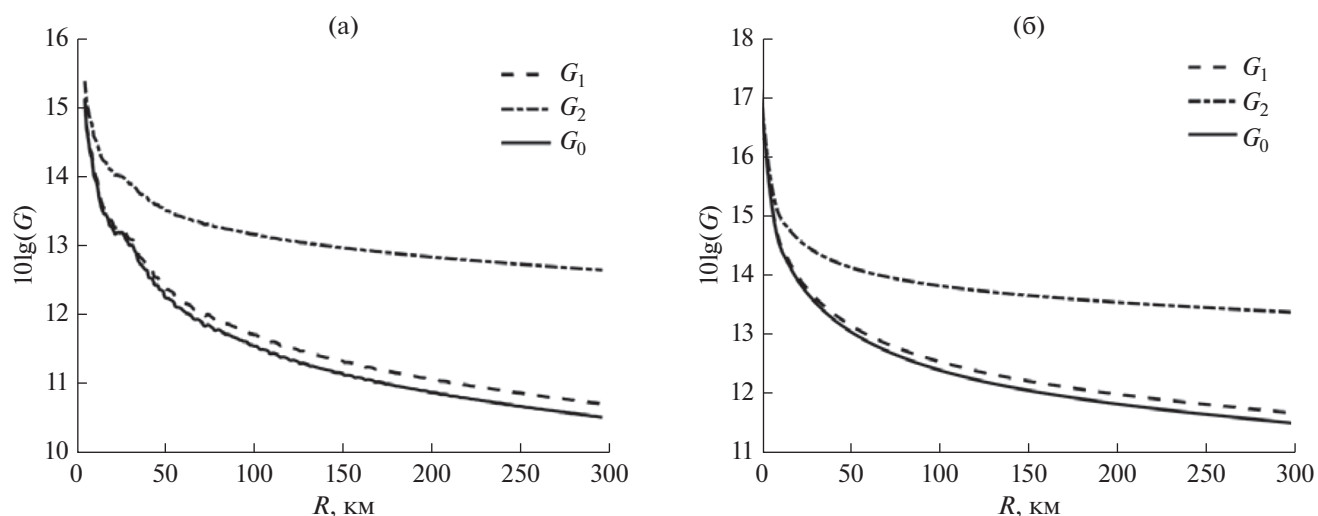


Рис. 4. То же, что на рис. 3, но для скорости ветра $V = 15$ м/с.

спектр сигнала сужается из-за затухания (вследствие рассеяния и потерь) энергии высших акустических мод, и значения G_0 и G_1 практически совпадают, отличие порядка 0.3–0.5 дБ. На рис. 6–7 приведены результаты расчета “сглаженных” на интервале $\Delta r = 10$ км значений G_i и, для сравнения, аналогичные результаты расчетов коэффициентов усиления с использованием корреляционной матрицы сигнала, усредненной по интерференционной структуре (т.е. не учитывающей межмодовые корреляции). Сравнение соответствующих значений коэффициентов усиления указывает на их малые отличия (в пределах 0.5 дБ) на расстояниях $R = 10$ –300 км. Обсуждавшийся выше эффект ложной декорреляции проявляется

на малом удалении антенны от источника $R < 10$ км, однако влияние его относительно невелико. Как видно на рис. 6б, 7б, при $R = 5$ км значение $G_1 = 16$ дБ, т.е. на 1 дБ меньше значения $10\lg(M) = 17$ дБ, соответствующего когерентному сигналу, а G_2/G_1 не превышает 0.3 дБ. Что касается величины монотонного уменьшения с расстоянием “сглаженных” значений коэффициентов усиления для G_0 и G_1 , то она равна 6 дБ на удалении $R = 300$ км и, соответственно, 4 дБ для коэффициента усиления G_2 . Таким образом, выигрыш квадратичной обработки достигает и в этом случае двух децибел.

Аналогичные расчеты, проделанные при различной глубине источника и АР, показывают, что

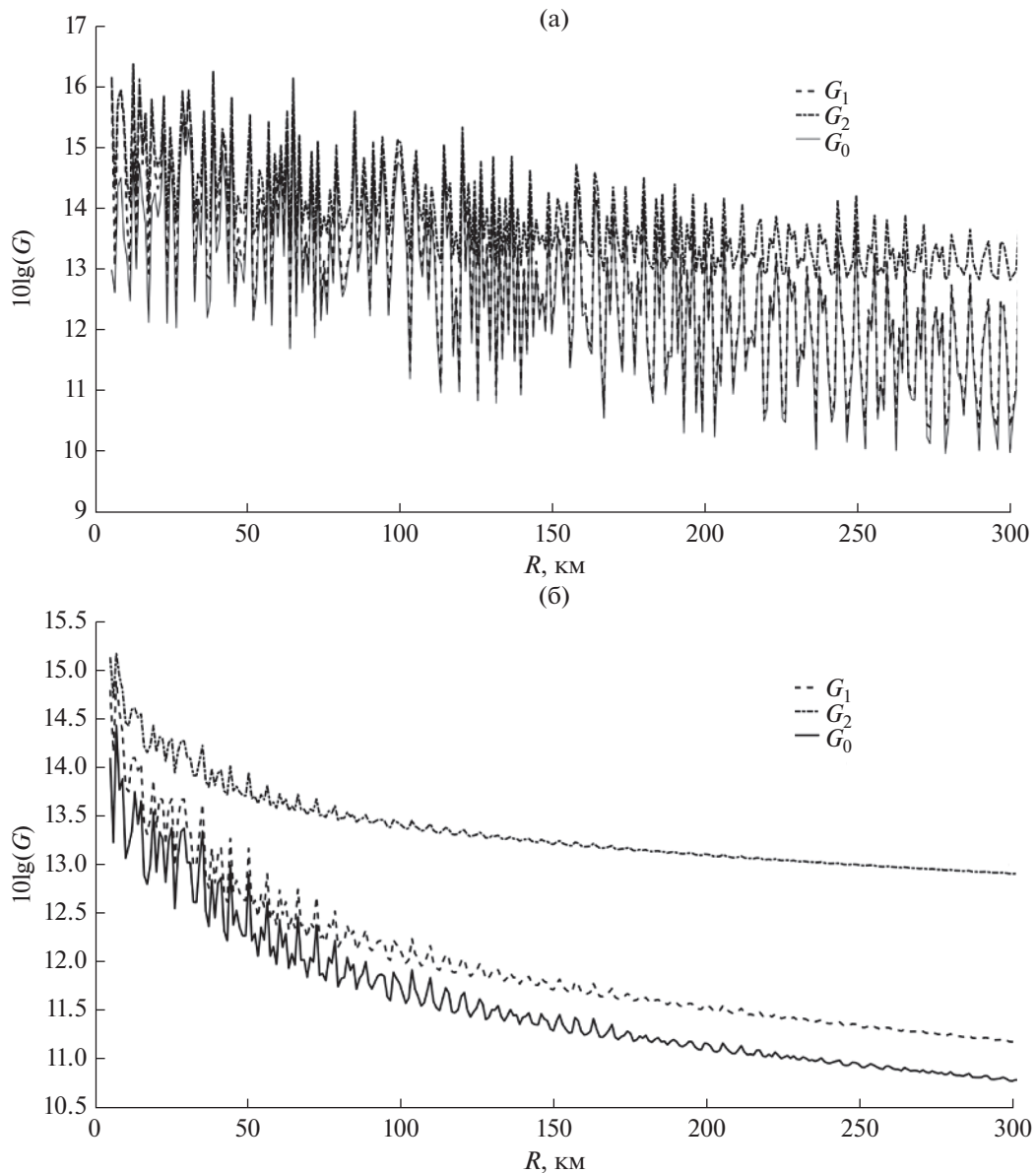


Рис. 5. Локальные коэффициенты усиления G_i для антенны, ориентированной под углом $\varphi_A = 30^\circ$, при скорости ветра (а) – $V = 10$ м/с и (б) – $V = 15$ м/с (неконсолидированные донные осадки).

и величина интерференционных осцилляций коэффициентов усиления G_i и скорость их монотонного спада при увеличении R зависят также от глубины источника и антенны. Например, при $z_{и} = z_A = 197$ м величины интерференционных осцилляций превышают значения, приведенные на рис. 1, и достигают на начальном участке трассы ($R \leq 50$ км) 5–6 дБ при $V = 10$ м/с и 2 дБ при $V = 15$ м/с.

Чтобы продемонстрировать зависимость рассматриваемых эффектов от характеристик донного грунта, приведем результаты численного моделирования для полупространства с параметрами, соответствующими полуконсолидированным осадкам ($c_i = 2500$ м/с, $\delta = 0.1$ дБ/км Гц) при попереч-

ной ориентации антенны, расположенной на глубине $z_A = 197$ м ($z_{и} = 100$ м). На рис. 8 приведены значения локальных коэффициентов усиления G_i при умеренном и сильном ветровом волнении. Нетрудно видеть, что качественный характер изменения с расстоянием коэффициентов усиления не изменился. Результаты метода ФАР практически совпадают с результатами оптимальной линейной обработки. При скорости ветра $V = 10$ м/с интерференционные осцилляционные коэффициенты усиления G_0 и G_1 достигают 4 дБ и несколько уменьшаются (до 2 дБ) на максимальных удалениях антенны. Осцилляции результатов оптимальной квадратичной обработки и в этом случае

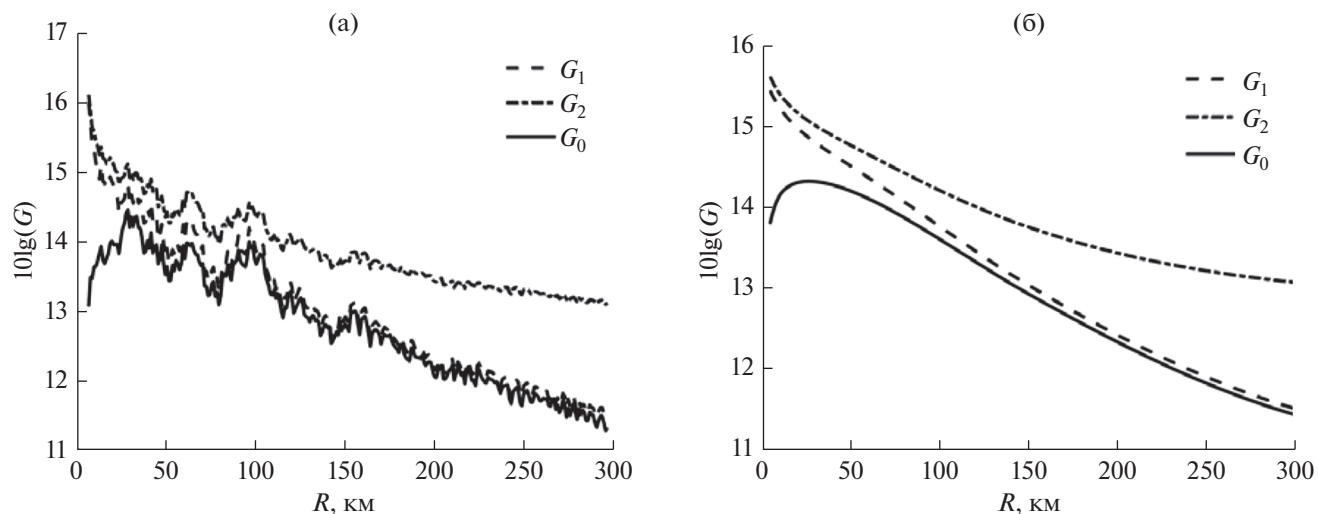


Рис. 6. Результаты численного моделирования при $\phi_A = 30^\circ$, $V = 10$ м/с локальных коэффициентов усиления G_i : (а) – “сглаженных” на масштабе $\Delta r = 10$ км и (б) – коэффициентов усиления, полученных без учета межмодовых корреляций.

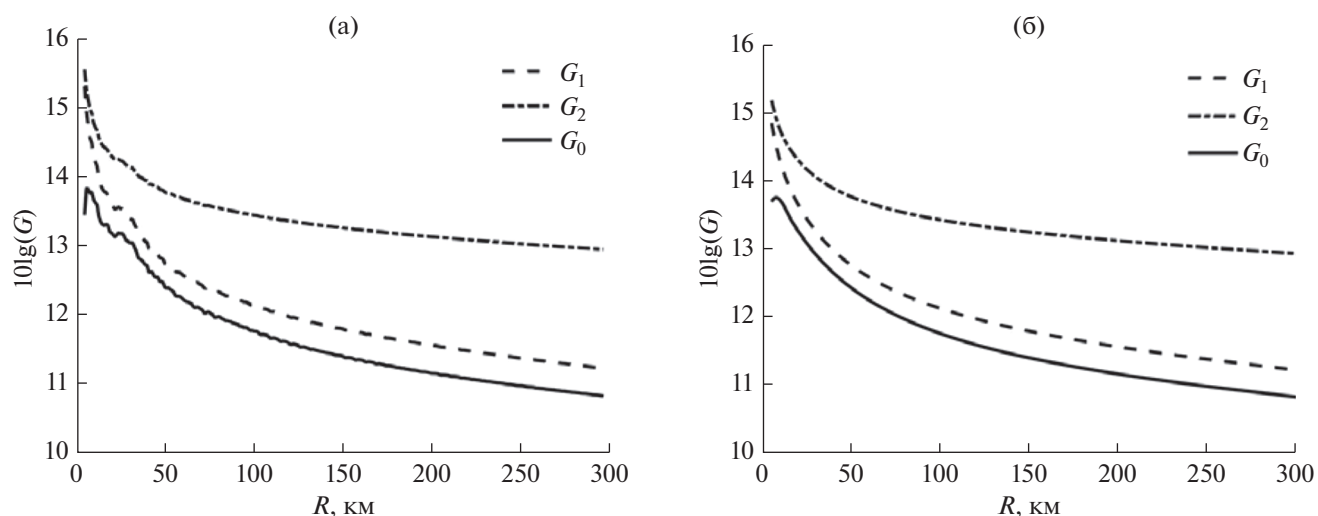


Рис. 7. То же, что на рис. 6, но для скорости ветра $V = 15$ м/с.

существенно меньше и имеют значения порядка 2 дБ, а на максимальном удалении не превышают 0.5 дБ. При скорости ветра $V = 15$ м/с осцилляции коэффициентов усиления G_0 и G_1 не превышают 2 дБ на малых удалениях АР от источника и практически отсутствуют при $R \geq 100$ км. Осцилляции коэффициента усиления G_2 вообще незначительны и не превышают децибелла на малых расстояниях R . “Сглаженные” на интервале $\Delta r = 10$ км значения коэффициентов усиления при скорости ветра $V = 15$ м/с практически совпадают с результатами расчетов с использованием усредненной по интерференционной структуре корреляцион-

ной матрицы сигнала (см. рис. 10). Аналогичное сопоставление результатов при $V = 10$ м/с (рис. 9) указывает на некоторые отличия, не превышающие децибелла, что, по-видимому, также может быть устранено путем уточнения процедуры усреднения локальных значений коэффициентов G_i . Основное отличие этих результатов от предыдущих расчетов для неконсолидированных донных осадков заключается в более заметном спадании коэффициентов усиления с увеличением дистанции R . При скорости ветра $V = 10$ м/с G_0 и G_1 уменьшаются вследствие декорреляции сигнала на 8 дБ, а коэффициент G_2 – на 5.5 дБ, т.е. выиг-

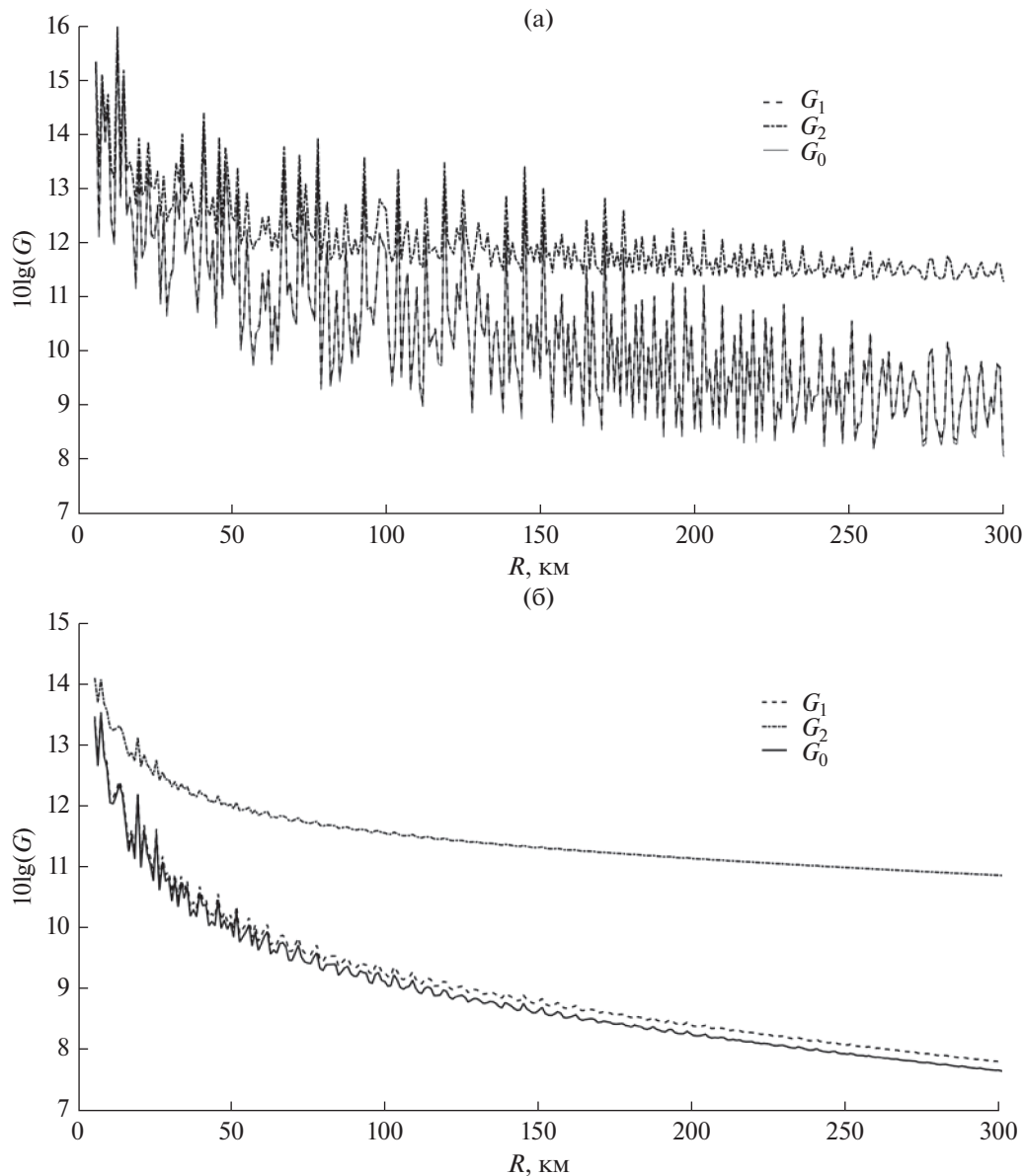


Рис. 8. Локальные коэффициенты усиления G_i для антенны, ориентированной перпендикулярно к источнику, при скорости ветра (а) – $V = 10$ м/с и (б) – $V = 15$ м/с (полуконсолидированные донные осадки).

рыш квадратичной обработки достигает 2.5 дБ. При сильном ветровом волнении ($V = 15$ м/с) спадание коэффициентов G_0 и G_1 равно 9 дБ при $R = 300$ км, а G_2 – соответственно 6 дБ, при этом выигрыш оптимальной квадратичной обработки сигнала в сравнении с оптимальной линейной достигает 3 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследуется влияние ветрового волнения на эффективность пространственной обработки низкочастотных акустических сигналов в мелком море с использованием горизонтальной

антенной решетки. Основное внимание уделяется влиянию межмодовых корреляций на интерференционные осцилляции коэффициента усиления антенны и сравнению локальных (т.е. вычисленных при конкретном расположении АР относительно источника) и пространственно “сглаженных” значений коэффициента усиления. Анализируются три метода пространственной обработки сигнала: ФАР, оптимальная линейная обработка и оптимальная квадратичная обработка, для которых рассчитаны соответствующие коэффициенты усиления G_0 , G_1 и G_2 . Конкретные результаты получены путем численного моделирования для зимней гидрологии Баренцева моря. Чтобы продемонстрировать зависимость

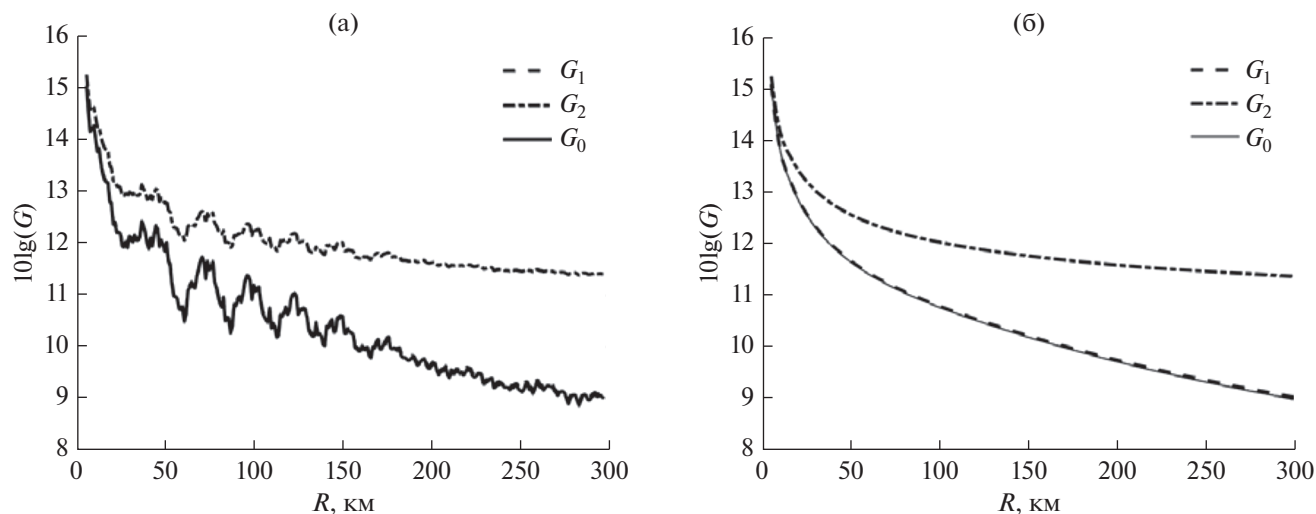


Рис. 9. Результаты численного моделирования ($\varphi_A = 0$, $V = 10$ м/с, полуконсолидированные донные осадки) локальных коэффициентов усиления G_i : (а) — “сглаженных” на масштабе $\Delta r = 10$ км и (б) — коэффициентов усиления, полученных без учета межмодовых корреляций.

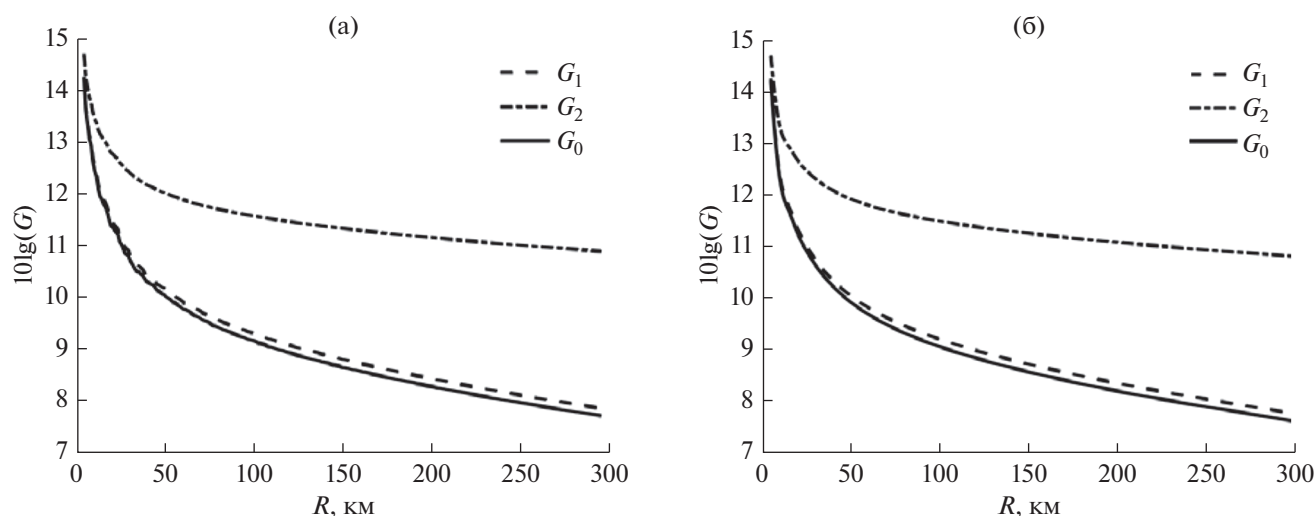


Рис. 10. То же, что на рис. 9, но для скорости ветра $V = 15$ м/с.

эффектов от характера донного грунта, расчеты проводились для неконсолидированных донных осадков с параметрами: продольная скорость звука $c_l = 1800$ м/с, плотность $\rho = 2$ г/см³, коэффициент затухания $\delta = 0.2$ дБ/км Гц, и полуконсолидированных с параметрами: $c_l = 2500$ м/с, $\rho = 2$ г/см³, $\delta = 0.1$ дБ/км Гц. На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы. Для перпендикулярно ориентированной (по отношению к источнику) антенны коэффициенты G_0 и G_1 практически совпадают. Для антенны, ориентированной под углом 30° , метод ФАР существенно проигрывает методу оптимальной линейной обработки на малых удалениях АР от источника, поскольку при фазовой компенсации не учитывает

модовый спектр акустического поля. Интерференционные осцилляции G_0 и G_1 имеют характерные значения порядка 4–6 дБ (в зависимости от глубины источника) при умеренной скорости ветра $V = 10$ м/с. Интерференционные осцилляции коэффициента усиления G_2 существенно меньше: порядка 2 дБ на малых удалениях от источника $R \leq 100$ км и порядка 0.5–1 дБ на значительном удалении $R \approx 200$ –300 км. При сильном ветровом волнении ($V = 15$ м/с) осцилляции коэффициентов усиления G_i : порядка одного децибела на удалении антенны от источника $R \leq 100$ км и практически отсутствуют на значительном удалении $R \sim 200$ –300 км. Этот эффект объясняется

быстрым затуханием с расстоянием межмодовых корреляций при сильном ветровом волнении.

Наряду с локальными значениями коэффициентов усиления G_i , вычисляются их значения, усредненные на пространственном интервале $\Delta r = 10$ км, и проведено их сравнение с аналогичными расчетами на основании “сглаженной” по интерференционной структуре корреляционной матрицы сигнала. Показано удовлетворительное совпадение результатов, что является, в некоторой степени, обоснованием подхода, который использовался в предыдущих публикациях [4–6].

На основании приведенных выше физических соображений и численного моделирования можно сделать вывод, что качественные результаты о поведении интерференционных вариаций и сглаженных значений коэффициента усиления АР, полученные в работе, имеют достаточно общий характер. В то же время результаты конкретных расчетов чувствительны к изменениям профиля волновода, акустических параметров дна, глубины расположения источника и АР. Кроме того, существенное влияние на эти результаты может оказать и анизотропный характер частотно-углового спектра волнения [5].

Данная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-19-00383.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J.* Fundamentals of shallow water acoustics. New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer; 2012.
2. *Jensen F.V., Kuperman W.A., Porter M.B., Schmidt H.* Computational ocean acoustics. New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer. 2011.
3. *Городецкая Е.Ю., Малеханов А.И., Сазонтов А.Г., Фарфель В.А.* Влияние эффектов дальнего распространения звука в случайно-неоднородном океане на потери усиления горизонтальной антенной решетки // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 5. С. 615–622.
4. *Завольский Н.А., Малеханов А.И., Раевский М.А.* Сравнительный анализ методов пространственной обработки сигналов, принимаемых горизонтальной антенной решеткой в канале мелкого моря со взволнованной поверхностью // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 5. С. 608–618.
5. *Бурдуковская В.Г., Малеханов А.И., Раевский М.А.* Влияние анизотропного ветрового волнения на эффективность пространственной обработки акустических сигналов в мелком море // Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 6. С. 617–625.
6. *Раевский М.А., Бурдуковская В.Г.* Пространственная обработка акустических сигналов в океанических волноводах на фоне шумов ветрового происхождения // Акуст. журн. 2023. Т. 69. № 1. (в печати).
7. *Раевский М.А., Хилько А.И.* О пространственно-временной когерентности низкочастотных акустических волн в мелком море с флуктуирующими параметрами // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 3. С. 369–376.
8. *Раевский М.А., Бурдуковская В.Г.* Эффекты многократного рассеяния акустических мод на анизотропном ветровом волнении в мелком море // Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 1. С. 65–71.
9. *Монзинго Р.А., Миллер Т.У.* Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
10. *Baker C.R.* Optimum quadratic detection of a random vector in Gaussian noise // IEEE Trans. Commun. Tech. 1966. V. 14. № 6. P. 802–805.
11. *Morgan D.R., Smith T.M.* Coherence effects on the detection performance of quadratic array processors, with applications to large-array matched-field // J. Acoust. Soc. Am. 1990. V. 87. № 2. P. 737–747.
12. *Малеханов А.И., Таланов В.И.* Об оптимальном приеме сигналов в многомодовых волноводах // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 5. С. 891–897.
13. *Артельный В.В., Раевский М.А.* О статистических характеристиках нормальных волн в волноводе с объемными неоднородностями // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1984. Т. 27. № 9. С. 1142–1150.
14. *Горская Н.С., Раевский М.А.* О многократном рассеянии низкочастотных акустических волн на поверхностном волнении // Акуст. журн. 1986. Т. 32. № 2. С. 165–171.
15. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. М.: Наука, 2007. 370с.
16. *Нечаев А.Г.* Затухание интерференционной структуры акустического поля в океане со случайными неоднородностями // Акуст. журн. 1987. Т. 33. № 3. С. 535–538.
17. *Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А.* Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеопиздат, 1985. 256 с.
18. *Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г.* Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 193 с.