

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ В МЕЛКОВОДНОМ ВОЛНОВОДЕ СО ВЗВОЛНОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

© 2024 г. М. А. Раевский^а, В. Г. Бурдуковская^{а, *}

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

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

Поступила в редакцию 30.05.2023 г.

После доработки 12.10.2023 г.

Принята к публикации 19.12.2023 г.

Аналитически и численно исследуется влияние развитого ветрового волнения на коэффициент усиления вертикальной антенны в мелководных океанических волноводах. Предложен алгоритм расчета модельной корреляционной матрицы сигнала на апертуре вертикальной антенной решетки, учитывающий интерференционную структуру акустического поля в звуковом канале. Коэффициент усиления антенны анализируется для трех методов пространственной обработки: стандартного метода ФАР (фазированной антенной решетки), метода оптимальной линейной обработки и метода оптимальной квадратичной обработки. Приведены результаты численного моделирования для гидрологических условий Баренцева моря в зимний период. Основное внимание уделяется зависимости от скорости ветра и характеристик донного грунта значений коэффициента усиления антенной решетки, “сглаженных” на масштабе интерференционной структуры акустического поля в волноводе. Подробно анализируется влияние межмодовых корреляций на результаты моделирования коэффициента усиления при различных способах обработки сигнала. Показано, что игнорирование межмодовых корреляций в случае вертикальной антенны приводит к принципиально ошибочным результатам при оптимальных методах обработки.

Ключевые слова: мелкое море, ветровое волнение, многократное рассеяние, межмодовые корреляции, вертикальная антенна, коэффициент усиления

DOI: 10.31857/S0320791924020116, **EDN:** YMZLNO

ВВЕДЕНИЕ

Исследование эффективности линейных антенн при обнаружении сигнала удаленного источника на фоне океанических шумов является одной из важных прикладных задач акустики мелкого моря [1]. При этом необходимо оценить потенциальные возможности применения антенных решеток (АР) как с горизонтальным, так и с вертикальным распределением приемных элементов. После достаточно подробного исследования этой задачи для плоскостойкого волновода [2–7] возникает естественный вопрос о влиянии на характеристики АР флуктуаций среды распространения, которые приводят к декорреляции сигнала из-за флуктуаций волнового фронта, затуханию межмодовых корреляций, трансформации интенсивности акустических мод, что в итоге влияет как на коэффициент усиления АР, так и на ее направленность. В мелком море основным источником флуктуаций сигнала являются ветровое волнение и фоновые

внутренние волны (т.е. случайные волны, постоянно присутствующие как фон). В этом плане достаточно подробно исследовано влияние ветрового волнения на коэффициент усиления горизонтальной АР при различных способах пространственной обработки [8–11] и на угловой отклик [12]. Аналогичным образом изучалось воздействие на характеристики горизонтальной АР флуктуаций скорости звука, обусловленных случайными фоновыми внутренними волнами [13]. В то же время влияние флуктуаций среды распространения на характеристики вертикальной АР в мелком море остаются практически неисследованными. Исключение составляют работы [14, 15], где проводились численные расчеты коэффициента усиления вертикальной АР для модельных корреляционных матриц сигнала, не отражающих физическую природу флуктуаций среды. Кроме того, в этих работах пренебрегается межмодовыми корреляциями, что, как показано ниже, может приводить к принципиально неверным результатам.

В данной работе мы рассмотрим влияние ветрового волнения с эмпирическим частотным спектром JONSWAP на эффективность пространственной обработки сигнала в мелком море с использованием вертикальной АР. Основное внимание уделяется зависимости коэффициента усиления АР от расстояния до источника и интенсивности ветрового волнения. Корреляционная матрица сигнала на апертуре антенны анализируется в приближении многократного рассеяния и с учетом межмодовых корреляций. В качестве помехи используется разработанная ранее теоретическая модель ветрового шума, учитывающая генерацию шумового поля приповерхностными дипольными источниками и его рассеяние на ветровом волнении. Для сравнения приводятся результаты численного моделирования и для традиционной модели пространственно некоррелированного шума. Рассмотрен также актуальный вопрос о правомерности использования корреляционной матрицы сигнала, сглаженной по интерференционной структуре акустического поля в волноводе. Отметим, что именно сглаженные корреляционные матрицы сигнала ранее использовались практически во всех работах по этой тематике (за исключением [12]).

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Рассмотрим поле точечного тонального источника в океаническом волноводе со взволнованной свободной поверхностью. Будем считать, что волновод является горизонтально однородным с произвольно выбранным профилем скорости звука и также произвольной плоскостной структурой дна. Поскольку для прикладных задач акустики мелкого моря наиболее интересен низкочастотный диапазон $f \leq 500$ Гц, для которого затухание в донном грунте и в водной среде относительно мало [1] и возможно распространение звука на десятки и сотни километров, будем в дальнейшем использовать модовое разложение акустического поля. Представим поле точечного источника в виде разложения по ортонормированным собственным функциям $\varphi_p(z)$ невозмущенного волновода:

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

где a_p — амплитуды мод, k_p — действительная часть волновых чисел, ω_0 — частота излучения, r — расстояние в горизонтальной плоскости от источника до точки наблюдения. В отсутствие ветрового волнения амплитуды разложения a_p (с точностью до коэффициента, зависящего от уровня излучения) имеют вид $a_p = \varphi_p(z_u)$. При наличии ветрового волнения верхняя граница волновода является случайной функцией горизонтальных координат x, y и времени t и описывается уравнением $z = \zeta(x, y, t)$,

соответственно, амплитуды a_p также являются случайными функциями переменных x, y, t . В этом случае обычно анализируются 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 вертикальной АР необходимо вычислить функцию когерентности поля давления с вертикальным разнесением точек наблюдения:

$$\begin{aligned} & \langle p(\mathbf{r}, z_1, t) p^*(\mathbf{r}, z_2, t) \rangle = \\ & = \sum_{p, q} \langle a_p(\mathbf{r}, t) a_q^*(\mathbf{r}, t) \rangle \frac{\varphi_p(z_1) \varphi_q(z_2)}{\sqrt{k_p k_q r}} \times \\ & \times \exp\left[i(k_p - k_q)r\right]. \end{aligned} \quad (2)$$

Эта функция является квазислучайной, т.е. меняется нерегулярным образом при изменении расстояния от источника до антенны. Именно поэтому в работах [8–11] было предложено вычислять функции когерентности, усредненные по интерференционным осцилляциям поля. Для описания таких “сглаженных” по интерференционной структуре вертикальных функций когерентности достаточно анализировать интенсивность мод:

$$N_p(\mathbf{r}) = \langle |a_p(\mathbf{r}, t)|^2 \rangle \quad (3)$$

(в случае стационарного ветрового волнения и тонального сигнала N_p не зависит от времени). Соответственно, после усреднения по интерференционным осцилляциям, т.е. усреднения по r скользящим окном формулы (2), имеем более простое выражение:

$$\begin{aligned} & \langle p(\mathbf{r}, z_1, t) p^*(\mathbf{r}, z_2, t) \rangle = \\ & = \sum_p N_p(\mathbf{r}) \frac{\varphi_p(z_1) \varphi_p(z_2)}{k_p r}. \end{aligned} \quad (4)$$

Аналогичное описание горизонтальных корреляций акустических мод использовалось ранее в работах [8–11], где исследовалось влияние ветрового волнения на эффективность пространственной обработки сигналов на апертуре горизонтальной АР.

Здесь мы откажемся от этого приближения и будем анализировать эффективность пространственной обработки сигнала на произвольном удалении вертикальной АР от источника. При этом нам требуется вычисление парного коррелятора $\langle a_p(\mathbf{r}, t) a_q^*(\mathbf{r}, t) \rangle$. В многомодовом волноводе с нерегулярной акустически мягкой границей для него

было получено уравнение переноса [16], которое является относительно сложным для непосредственного решения его аналитическими и численными методами. В то же время анализ этого уравнения показал [17], что для прогнозирования межмодовых корреляций в мелком море при типичных скоростях ветра можно использовать

соотношение $\langle a_p(\mathbf{r}, t) a_q^*(\mathbf{r}, t) \rangle \approx \langle a_p(\mathbf{r}, t) \rangle \langle a_q^*(\mathbf{r}, t) \rangle$, т.е. при $q \neq p$ парный коррелятор модовых амплитуд приближенно равен произведению когерентных компонент модовых амплитуд. Таким образом для вертикальной корреляционной функции поля давления получаем выражение:

$$\begin{aligned} \langle p(\mathbf{r}, z_1, t) p^*(\mathbf{r}, z_2, t) \rangle = & \sum_p \sum_{q \neq p} \langle a_p(\mathbf{r}, t) \rangle \langle a_q^*(\mathbf{r}, t) \rangle \frac{\Phi_p(z_1) \Phi_q(z_2)}{\sqrt{k_p k_q} r} \exp[i(k_p - k_q)r] + \\ & + \sum_p N_p(\mathbf{r}, t) \frac{\Phi_p(z_1) \Phi_p(z_2)}{k_p r}. \end{aligned} \quad (5)$$

При этом следует учитывать, что средние значения модовых амплитуд затухают с расстоянием r по закону [16]:

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

Здесь γ_p — декремент затухания когерентной компоненты модовой амплитуды a_p , $\operatorname{Im} k_p$ — мнимая часть волнового числа, обусловленная потерями в донном грунте и водной среде, причем выражение для γ_p учитывает рассеяние данной моды как в другие моды дискретного спектра, так и в моды сплошного спектра. Автокорреляционная функция $N_p(\mathbf{r})$ рассчитывается в приближении “рассеяние вперед” на основании уравнения переноса. Следует отметить, что в приведенных аналитических выражениях и при дальнейшем численном моделировании учитываются все моды дискретного спектра и все моды сплошного спектра. Подробнее методика учета мод сплошного спектра обсуждается в работе [16].

Введем декартову систему координат в горизонтальной плоскости, где начало координат совпадает с горизонтальными координатами источника и ось x проходит через АР и $x = r$ соответствует координате антенны. Уравнение переноса [16] для $N_p(x)$ имеет вид:

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

где W_{pp_2} — вероятность перехода между модами, описывающая эффекты взаимного рассеяния мод, локализованных в волноводе. Функции γ_p и W_{pp_2} выражаются через частотный спектр ветрового волнения $B(\Omega)$ следующим образом:

$$\gamma_p = \frac{g^2}{8\pi k_p} \left(\frac{d\Phi_p}{dz} \right)^2 \int_0^{k_0} \eta \sqrt{k_0^2 - \eta^2} d\eta \int_{-\pi}^{\pi} B(\Omega) \Omega^{-3} d\Phi, \quad (8)$$

$$\Omega = \sqrt{g} \left[(k_p - \eta \cos \Phi)^2 + \eta^2 \sin^2 \Phi \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (9)$$

$$W_{pp_2} = \frac{g^2}{8k_p k_{p_2}} \left(\frac{d\Phi_{p_2}}{dz} \right)^2 \left(\frac{d\Phi_p}{dz} \right)^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{B(\tilde{\omega})}{\tilde{\omega}^3} dk_y, \quad (10)$$

$$\tilde{\omega} = \sqrt{g} \left(k_y^2 + (k_p - k_{p_2})^2 \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (11)$$

где g — ускорение свободного падения, $k_0 = \omega/c(0)$, $d\Phi_p/dz$ — производная собственной функции при $z = 0$. При этом предполагается, что угловой спектр ветрового волнения является изотропным. Для анизотропного волнения уравнения (7)–(11) имеют более сложный вид [9]. Очевидно, что эффекты рассеяния на ветровом волнении наиболее важны для гидрологии зимнего типа, когда ось канала находится либо на поверхности, либо на сравнительно небольшой глубине, в противном случае производные $d\Phi_p/dz$ в формулах (8), (10) экспоненциально малы.

Для получения конкретных результатов для частотного спектра $S(\Omega)$ будем использовать общепринятую модель JONSWAP [18].

В дальнейшем нам потребуется корреляционная матрица сигнала на апертуре вертикальной АР. Выражение для элементов корреляционной матрицы следует из (5) и может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned} N_{mn} = & C_m C_n^* + \sum_p (k_p r)^{-1} \Phi_p(z_m) \Phi_p(z_n) \times \\ & \times [N_p(r) - \Phi_p^2(z_u) \exp\{-2(\gamma_p + |\operatorname{Im} k_p|)r\}], \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} C_m = & \sum_p (k_p r)^{-\frac{1}{2}} \Phi_p(z_u) \Phi_p(z_m) \times \\ & \times \exp[ik_p r - (\gamma_p + |\operatorname{Im} k_p|)r], \end{aligned}$$

где z_n — глубина размещения элементов антенны. При получении формулы (12) мы перешли к независимому суммированию по номерам мод путем добавления в двойной сумме слагаемого с $q = p$ (и соответственно вычитанию того же выражения). Нетрудно видеть, что выражение для N_{mn} представляет собой суперпозицию матриц, обусловленных когерентной компонентой поля (первое слагаемое) и его рассеянной компонентой (второе слагаемое). Усреднение выражения (12) по r приводит к более простой формуле:

$$N_{mn} = \sum_p (k_p r)^{-1} \varphi_p(z_m) \varphi_p(z_n) N_p(r), \quad (13)$$

соответствующей матрице, сглаженной по интерференционной структуре. Такое же выражение может быть получено и без пространственного усреднения (12), если изначально предполагать некоррелированность акустических мод.

Наряду со статистической моделью сигнала при исследовании эффективности АР требуется также и конкретизация статистической модели помехи, в качестве которой далее будут рассматриваться океанические шумы. В работах [8–11], где анализировалось влияние ветрового волнения на характеристики горизонтальной антенны, использовалась простейшая модель шума, некоррелированного на элементах АР. В этом случае корреляционная матрица шума, обозначаемая R , предполагается единичной (с точностью до коэффициента, определяемого интенсивностью шума). Наряду с такой простой моделью “белого” шума в дальнейшем будет использоваться более реалистичная модель [19] динамического шума, обусловленного ветровыми приповерхностными источниками дипольного характера. При этом учитываются эффекты генерации шумового поля дипольными источниками, равномерно распределенными по поверхности, рассеяния акустических мод на ветровом волнении и затухание в донном грунте. Используя эти результаты, получим выражение корреляционной матрицы шума на апертуре вертикальной АР.

Поле давления для шума мы также представим в виде разложения по собственным модам плоскостного волновода

$$P(r, z, t) = \sum_p k_p^{-1/2} b_p(r, t) \varphi_p(z). \quad (14)$$

Будем анализировать пространственную функцию корреляции шума с вертикальным разнесением точек наблюдения:

$$\langle P(\mathbf{r}, z_1, t) P^*(\mathbf{r}, z_2, t) \rangle = R(z_1, z_2). \quad (15)$$

Она не зависит от горизонтальных координат и времени в силу статистической однородности

и стационарности шумового поля. Вследствие некоррелированности нормальных мод шума, генерируемого распределенными по поверхности источниками, $R(z_1, z_2)$ выражается через $I_p = \langle |b_p|^2 \rangle$:

$$R(z_1, z_2) = \sum_p k_p^{-1} \varphi_p(z_1) \varphi_p(z_2) I_p. \quad (16)$$

Для интенсивности I_p мод шумового поля имеем [19] уравнение переноса с дипольными источниками:

$$\sum_{p_2} W_{pp_2} I_{p_2} - 2(\gamma_p + |\operatorname{Im} k_p|) I_p + Q_p = 0, \quad (17)$$

где для γ_p и W_{pp_2} имеем те же выражения (8)–(11). Функция Q_p определяется пространственным спектром $S(k_x, k_y)$ дипольного момента давления на свободной поверхности [20]

$$Q_p = \frac{\pi^3 S(k_x = 0, k_y = 0)}{2\rho_B^2 \omega_0^2} \left(\frac{d\varphi_p}{dz} \right)^2, \quad (18)$$

где ρ_B — плотность воды.

Корреляционная матрица динамического шума R определяется решением уравнения (17) и ее элементы имеют вид:

$$R_{mn} = \sum_p k_p^{-1} \varphi_p(z_m) \varphi_p(z_n) I_p. \quad (19)$$

Перейдем далее к анализу характеристик вертикальной АР в зависимости от выбранного метода обработки сигнала. Будем считать, что АР состоит из M эквидистантных элементов с межэлементным расстоянием d , для которого будем использовать стандартное значение, равное половине длины волны на частоте f_0 . Для количественной оценки эффективности пространственной обработки сигналов выберем коэффициент усиления антенны G , который стандартно определяется как величина выходного отношения сигнал/шум (ОСШ), отнесенная к величине ОСШ на отдельном приемном элементе. Очевидно, величина G зависит не только от вида корреляционных матриц сигнала и шума, но и метода пространственной обработки. Для сравнения мы рассмотрим три известных метода пространственной обработки: 1 — стандартный метод ФАР (соответствующий коэффициент усиления обозначим G_0), 2 — метод оптимальной линейной обработки (коэффициент усиления обозначим G_1), 3 — метод оптимальной квадратичной обработки (коэффициент усиления обозначим G_2). При этом для коэффициента усиления G_0 имеем выражение

$$G_0 = \frac{\sum_m \sum_n N_{mn}}{\sum_m \sum_n R_{mn}} \frac{\sum_n R_{nn}}{\sum_n N_{nn}}, \quad (20)$$

где вместо ОСШ на каком-то одном произвольно выбранном элементе АР используется значение ОСШ, усредненное по апертуре АР. Отметим, что формула (20) не предполагает использования какого-либо дополнительного амплитудно-фазового распределения (АФР) на элементах антенны. Более подробно этот момент обсуждается далее. Коэффициенты усиления G_1 и G_2 оптимальной обработки выражаются через собственные значения матрицы $S = R^{-1}N$, что соответствует дополнительной операции пространственной декорреляции (“выбеливания”) шума [21–24]. Соответствующие выражения имеют вид:

$$G_1 = \frac{\lambda_1}{\sum_i \lambda_i} M, \quad G_2 = \frac{\left[\sum_i \lambda_i^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\sum_i \lambda_i} M, \quad (21)$$

где λ_i — собственные значения матрицы S , пронумерованные в порядке их убывания (λ_1 — максимальное из них). В дальнейшем для сравнения будут приводиться и результаты вычисления коэффициентов усиления АР на фоне динамического шума и на фоне “пространственно белого” шума, для которого матрица шума R является диагональной, и в формулах (21) фигурируют собственные значения матрицы сигнала N .

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ввиду сложности задачи конкретные результаты были получены путем численного моделирования. При этом очевидно, что интересующие нас эффекты наиболее значимы для мелкого моря. Рассмотрим результаты численных расчетов коэффициентов усиления G_i для звукового канала со слабым положительным градиентом скорости звука, типичным 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. Для модели дна будем использовать жидкое полупространство (при этом не учитывается влияние сдвиговых волн). Параметры донного грунта в мелком море отличаются большим разнообразием, но все же можно считать, что для верхнего слоя донного грунта типичны неконсолидированные либо полуконсолидированные осадки. В связи с этим, мы приведем результаты расчетов для двух моделей дна [1]: неконсолидированные осадки с типичными параметрами $\rho_0 = 2$ г/см³, $c_l = 1800$ м/с,

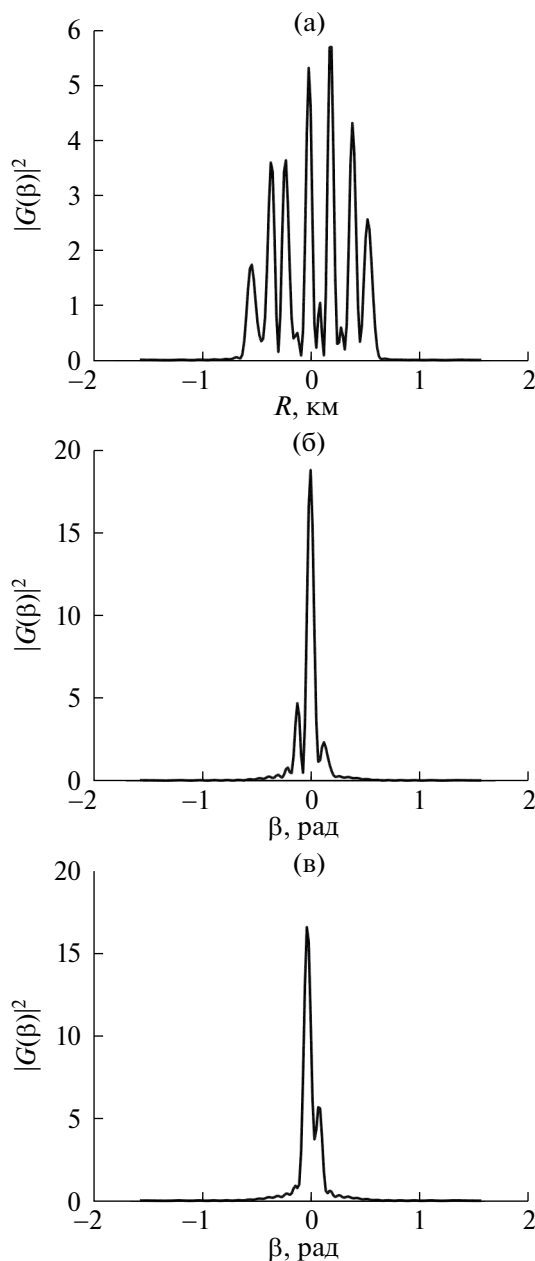


Рис. 1. Угловой отклик синфазной АР на различном удалении от источника: (а) — $R = 20$ км, (б) — $R = 100$ км, (в) — $R = 300$ км.

коэффициентом 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 и на той же глубине находится центр вертикальной антенны с числом элементов $M = 25$ и межэлементным расстоянием $d = 3$ м. Расчеты проводились для скорости ветра $V = 10$ м/с и $V = 15$ м/с, т.е. умеренного и сильного ветрового волнения. Основное

внимание при этом уделялось зависимости коэффициента усиления АР от расстояния до источника в широком диапазоне значений $5 \leq r \leq 500$ км. Проанализируем вначале результаты численных расчетов для модели дна, соответствующей неконсолидированным осадкам, т.е. $c_l = 1800$ м/с, $\delta = 0.2$ дБ/км Гц.

Предварительно рассмотрим изменение с расстоянием r дисперсии углового отклика антенны $G(\beta)$:

$$|G(\beta)|^2 = \frac{\sum_{mn} N_{mn} \exp[ik_0 d(m-n)\sin\beta]}{\sum_m N_{mm}}, \quad (22)$$

где вертикальный угол β отсчитывается от нормали к антенной решетке. На рис. 1 приведены результаты расчетов этой величины при скорости ветра $V = 10$ м/с на малом, среднем и большом удалении АР от источника. Из результатов моделирования следует, что на малом удалении АР угловой спектр имеет характерную ширину $\Delta\beta \approx 0.5$ рад (что равно критическому углу звукового канала) и несколько интерференционных максимумов, положение которых меняется с расстоянием. С увеличением

дистанции, вследствие эффектов рассеяния и затухания высших мод, угловой спектр сужается и концентрируется вблизи $\beta = 0$. Таким образом, если нас интересует повышение эффективности вертикальной АР (увеличение ее коэффициента усиления) на значительном удалении от источника, то введение каких-либо дополнительных АФР на ее апертуре, ориентированных на локальные интерференционные максимумы, не представляется целесообразным. Именно поэтому мы не использовали их в выражении для G_0 , соответствующем методу ФАР.

Перейдем теперь к обсуждению непосредственно результатов численного моделирования коэффициентов усиления АР, соответствующих как методу ФАР (G_0), так и оптимальным методам обработки (G_1 и G_2). Чтобы продемонстрировать влияние статистической модели шума, результаты расчетов приведем и для динамического (ветрового) шума и для “пространственно белого” шума (некоррелированного на элементах АР).

Для получения более наглядной зависимости коэффициентов G_i от дистанции и скорости ветра будем рассматривать результаты расчетов, сглаженные по интерференционной структуре (конкретно

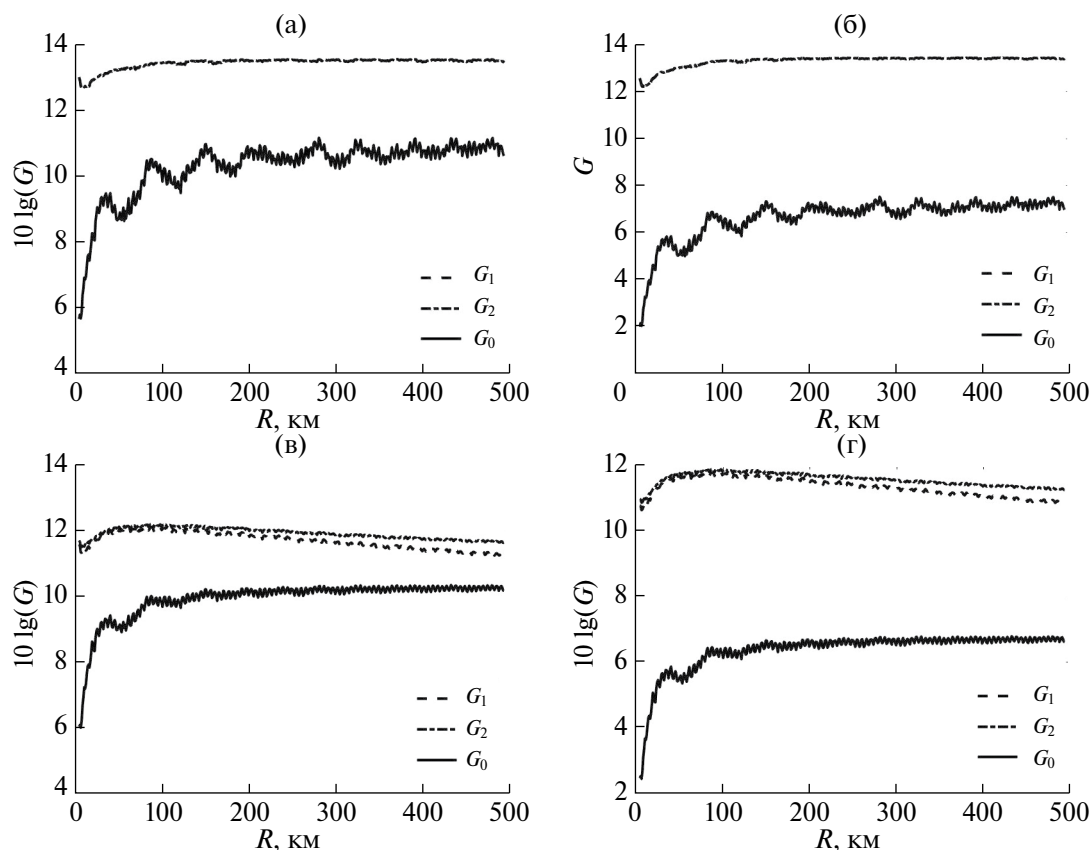


Рис. 2. Сглаженные коэффициенты усиления АР при скорости ветра (а, б) — $V = 10$ м/с и (в, г) — $V = 15$ м/с на фоне (а, в) — некоррелированного шума и (б, г) — динамического шума. Неконсолидированные донные осадки.

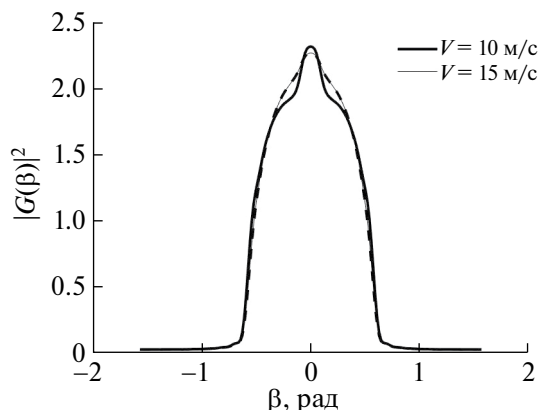


Рис. 3. Угловой отклик АР на поле динамического шума для двух скоростей ветра.

на интервале $\Delta r = 10$ км). На рис. 2 приведены соответствующие результаты для двух значений скорости ветра. Заметим при этом, что значение $G = 10 \lg M$, при $M = 25$ равное 14 дБ, соответствует коэффициенту усиления АР в свободном пространстве для когерентного сигнала на фоне белого шума. Нетрудно видеть, что результаты оптимальной обработки сигнала при умеренном ветровом волнении ($V = 10$ м/с) на фоне белого шума близки к этому предельному значению, проигрывая ему 0.5–1 дБ.

Результаты расчетов на фоне динамического шума (частично коррелированного на элементах АР) для оптимальной обработки сигнала приводят к близким результатам, что является прямым следствием упомянутой выше дополнительной операции “выбеливания” шума при вычислении коэффициентов G_1 и G_2 . Что касается коэффициента усиления G_0 , соответствующего методу ФАР (в нашем случае синфазная обработка сигнала для всех элементов АР), то здесь результаты моделирования имеют качественно другой характер: с увеличением дистанции значение G_0 растет от 5.5 до 11 дБ в случае белого шума и, соответственно, от 2 до 7 дБ в случае динамического шума. Увеличение коэффициента усиления G_0 с дистанцией объясняется затуханием (вследствие рассеяния и потерь в донном грунте) сигнальных мод с высокими номерами и сужением углового спектра сигнала (см. рис. 1). Вследствие этого эффекта на значительном удалении АР от источника $r \approx 200$ км значения G_0 приближаются к значениям оптимальной обработки (G_1 и G_2), хотя и проигрывают около 2 дБ. Для объяснения отличия результатов расчетов G_0 на фоне белого и динамического шума, которое составляет около 4 дБ, на рис. 3 приведены результаты моделирования углового отклика АР на поле динамического шума. Видно, что характерная ширина углового отклика порядка 0.5 рад, что равно

критическому углу волновода при $c_l = 1800$ м/с. Отличие этой величины от характерной ширины углового спектра “пространственно белого” шума (т.е. π) и объясняет разницу 4 дБ в результатах приведенных расчетов.

При сильном ветровом волнении (см. рис. 2в, 2г) результаты расчетов имеют качественно такой же характер, но наблюдаются и некоторые отличия. Значения коэффициентов усиления при оптимальной линейной и квадратичной обработке уже заметно отличаются, причем выигрыш квадратичной обработки растет с дистанцией и достигает 0.5 дБ. При этом на удалении $r > 100$ км от источника коэффициенты G_1 и G_2 монотонно снижаются. Коэффициент G_0 хотя и растет с дистанцией, но его увеличение не превышает 4 дБ. Отличие результатов расчетов G_1 и G_2 для белого и динамического шума по-прежнему незначительно. Для G_0 оно составляет те же 4 дБ, что объясняется малым отличием углового спектра динамического шума при $V = 10$ и $V = 15$ м/с (см. рис. 3).

Рассмотрим теперь результаты численного моделирования для другой модели дна, соответствующей полуконсолидированным осадкам: $c_l = 2500$ м/с, $\rho_0 = 2$ г/см³, $\delta = 0.1$ дБ/км Гц. На рис. 4 приведены результаты соответствующих расчетов, полученных путем усреднения на интервале $\Delta r = 10$ км локальных коэффициентов усиления G , вычисляемых с учетом межмодовых корреляций. Прежде всего отметим, что значения коэффициента G_0 для модели динамического шума и “белого” шума отличаются уже на 1.5–2 дБ, а не на 4 дБ. Это объясняется увеличением критического угла волновода, соответственно, ширины вертикального углового спектра динамического шума. При увеличении скорости звука в дне расширяется и модовый спектр сигнала и, соответственно, усиливаются эффекты рассеяния акустических мод на ветровом волнении (что нетрудно видеть из приведенных выше выражений для W_{mn} и γ_n). Вследствие этого при сильном ветре $V = 15$ м/с коэффициенты усиления G_1 и G_2 на 2–3 дБ меньше аналогичных значений, вычисленных для модели неконсолидированных осадков, а выигрыш квадратичной обработки, в сравнении с линейной, достигает 1.5 дБ. Соответственно уменьшаются и предельные значения G_0 , соответствующие большому удалению АР от источника: 8 дБ для “белого” шума и 6.5 дБ для динамического шума. При умеренном ветре $V = 10$ м/с различие результатов, полученных для двух моделей дна, несколько меньше; например, значения, соответствующие оптимальной обработке G_1 и G_2 различаются на децибел при $r \sim 200$ –300 км, причем сами G_1 и G_2 практически совпадают. Интересно также отметить, что в случае полуконсолидированных осадков коэффициенты оптимальной обработки G_1 и G_2 заметно растут

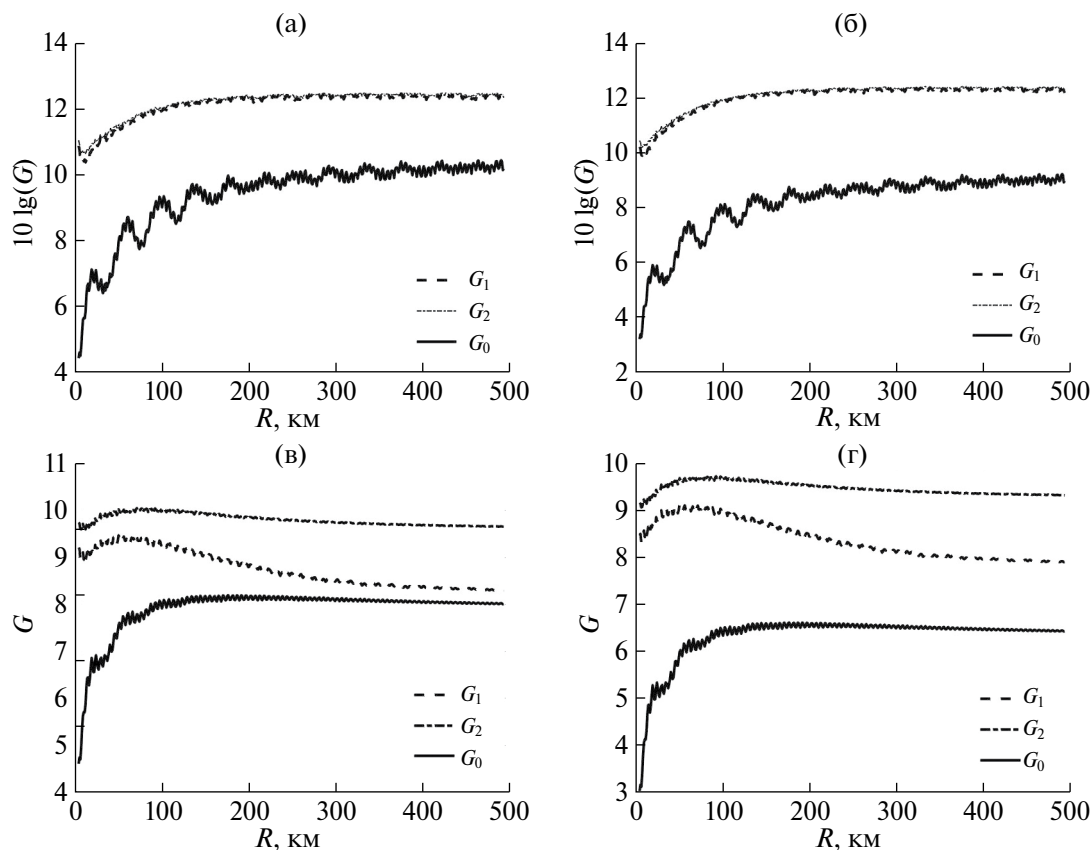


Рис. 4. Результаты расчетов, аналогичные приведенным на рис. 2, для полуконсолидированных донных осадков.

с расстоянием при умеренном ветре ($V = 10$ м/с) и спадают при сильном ветре ($V = 15$ м/с).

Рассмотрим теперь важный вопрос о степени влияния межмодовых корреляций на результаты пространственной обработки с применением вертикальной АР. Для этого сравним данные численного моделирования в случае неконсолидированных осадков (см. рис. 2) с аналогичными результатами, полученными с использованием усредненной по интерференционной структуре корреляционной матрицы сигнала (13), не учитывающей межмодовые корреляторы. Результаты этих расчетов приведены ниже на рис. 6.

Предварительно рассмотрим коэффициенты усиления G_i в регулярном плоскостном волноводе без ветрового волнения ($V = 0$). Соответствующие результаты для двух моделей океанического шума приведены на рис. 5. Видно, что данные расчетов коэффициентов усиления G_1 и G_2 , полученные с использованием упрощенной модели корреляционной матрицы сигнала, усредненной по интерференционной структуре (12) существенно отличаются от физически понятных значений $G_2 = G_1 = M$, полученных на основании модели,

учитывающей межмодовые корреляции (т.е. формулы (13)). Напротив, результаты расчетов коэффициента усиления G_0 , полученных на основе формулы (13), и сглаженные результаты моделирования по формуле (12) практически совпадают. Чтобы понять с чем это связано, обратимся к формулам для корреляционной матрицы сигнала, учитывающей межмодовые корреляторы (12) и упрощенной матрицы (13), полученной путем усреднения по интерференционной структуре. Для регулярного волновода в выражении (12) отсутствует второе слагаемое, соответствующее рассеянной компоненте сигнала, и декремент $\gamma_n = 0$. При этом матрица (12) является диадной, т.е. имеет одно ненулевое собственное значение. Отсюда, с учетом операции выбеливания, следует, что $G_2 = G_1 = M$ и для “пространственно белого” и для динамического шума. Усредненная по интерференционной структуре матрица сигнала (13), как нетрудно видеть, уже не является диадной, т.е. имеет ряд ненулевых собственных значений, что и объясняет результаты расчетов, приведенных на рис. 5в, 5г. Все это можно интерпретировать как проявление эффекта псевдодекорреляции, возникающей вследствие неадекватного использования операции усреднения

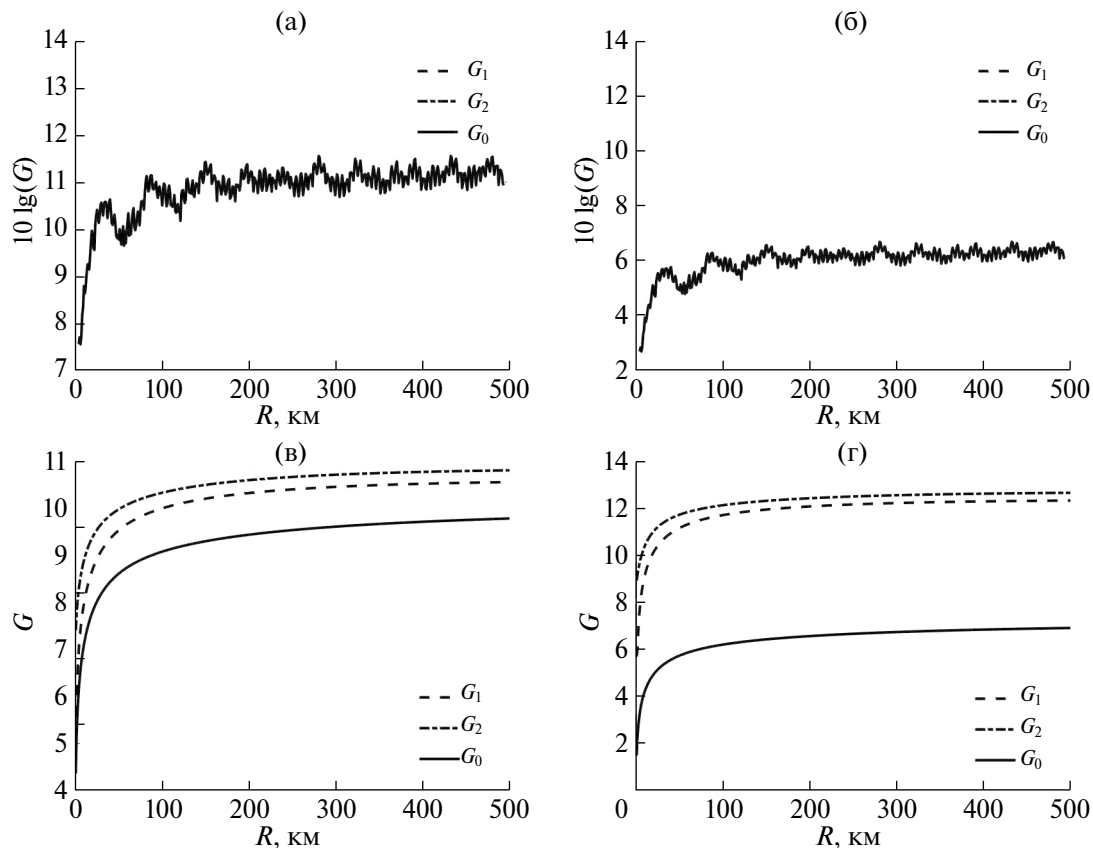


Рис. 5. Коэффициенты усиления АР в регулярном волноводе ($V=0$): пространственно сглаженные результаты моделирования с использованием (а, б) — точной корреляционной матрицы сигнала и (в, г) — упрощенной матрицы, не учитывающей межмодовые корреляции. (а, в) — Некоррелированный шум, (б, г) — динамический шум.

корреляционной матрицы сигнала по интерференционной структуре (или изначального предположения об отсутствии межмодовых корреляций). То, что этот эффект не проявляется для метода ФАР, также понятно, поскольку он является линейной операцией по отношению к входному сигналу на элементах АР и поэтому коммутирует с операцией пространственного усреднения сигнала по интерференционной структуре (т.е. конечный результат не зависит от изменения их последовательности). Вычисление коэффициентов усиления G_1 и G_2 при оптимальной обработке, напротив, является нелинейной операцией и поэтому не коммутирует с операцией пространственного усреднения. Таким образом, изменение последовательности операций вычисления коэффициентов G_1 и G_2 и пространственного усреднения приводит к принципиально другому результату. Для получения правильных пространственно сглаженных коэффициентов усиления АР при оптимальной обработке сигнала необходимо сглаживать локальные значения самих величин G_1 и G_2 , а не использовать пространственно усредненную матрицу входного сигнала. Как видно на рис. 5, ошибка,

обусловленная псевдодекорреляцией, максимальна при расположении АР вблизи источника и достигает 8 дБ. При увеличении дистанции эта ошибка монотонно уменьшается, однако, и при большом удалении АР от источника (200–300 км) она существенна и имеет величину порядка 2 дБ.

Перейдем к сопоставлению аналогичных результатов при умеренном и сильном ветровом волнении. На рис. 6 приведены результаты численного моделирования коэффициентов усиления G_i с использованием упрощенной корреляционной матрицы сигнала (13), сглаженной по интерференционной структуре. Сравнение их с результатами расчетов, выполненных на основании корреляционной матрицы (12), учитывающей межмодовые корреляторы (см. рис. 2), показывает, что и в этом случае для коэффициента усиления G_0 , соответствующего методу ФАР, мы получаем близкие результаты, отличие в пределах 0.5 дБ. Что касается коэффициентов усиления G_1 и G_2 , соответствующих оптимальной обработке сигнала, то здесь результаты отличаются не только количественно, но и качественно (особенно на малых и средних дистанциях). На малых расстояниях $r \leq 50$ км значения

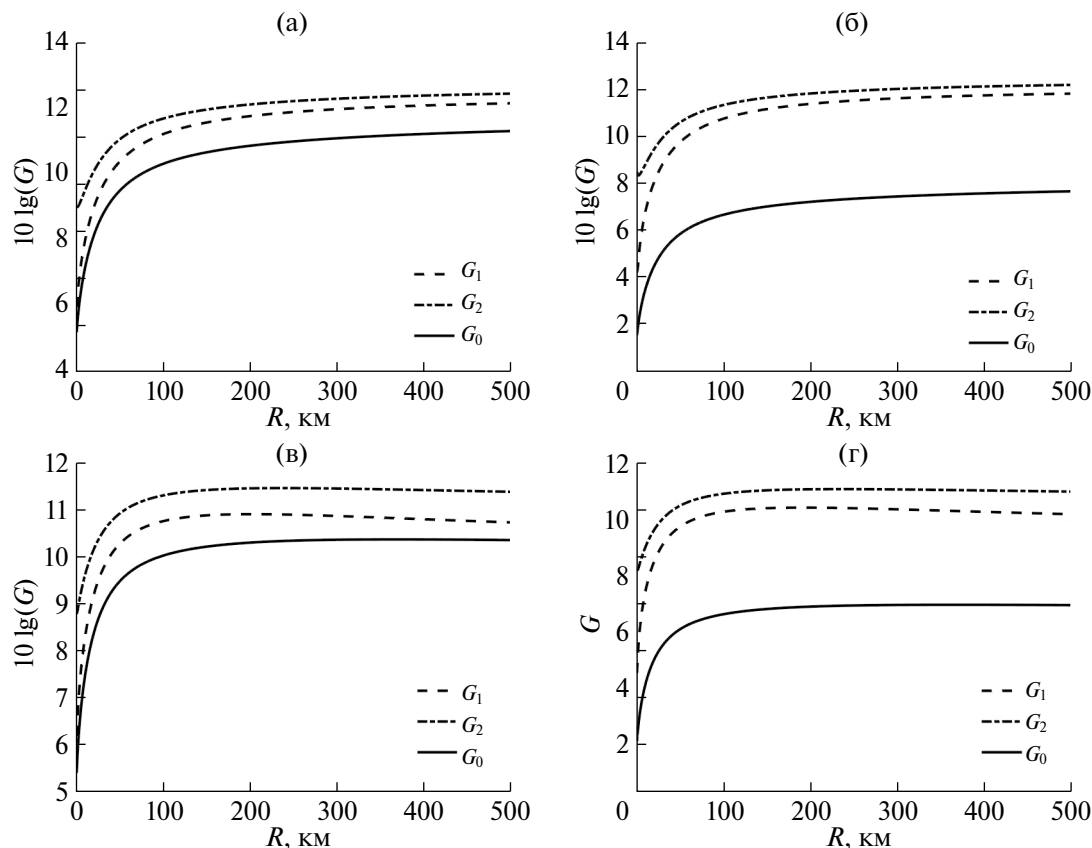


Рис. 6. Коэффициенты усиления АР, рассчитанные без учета межмодовых корреляций, при скорости ветра (а, б) — $V = 10$ м/с и (в, г) — $V = 15$ м/с на фоне (а, в) — некоррелированного шума и (б, г) — динамического шума. Неконсолидированные донные осадки.

G_1 и G_2 , рассчитанные на основании усредненной по интерференционной структуре матрицы сигнала (13), на 3–5 дБ меньше аналогичных, полученных с учетом межмодовых корреляций, причем значения, соответствующие оптимальной линейной и квадратичной обработке, не совпадают, как на рис. 2, а различаются на 3–4 дБ. Этот эффект также обусловлен в основном псевдодекорреляцией, поскольку фактическая декорреляция сигнала из-за эффектов многократного рассеяния акустических мод на ветровом волнении на малом удалении АР от источника не столь значима. Таким образом, можно сделать вывод, что в случае вертикальной приемной АР использование усредненной по интерференционной структуре корреляционной матрицы сигнала (или приближения некоррелированных мод) приводит к псевдодекорреляции сигнала и принципиально неверным результатам для оптимальной обработки, хотя и оправдано для метода ФАР. Отметим, что в случае горизонтальной АР, где эти соображения также необходимо учитывать, применение усредненной корреляционной матрицы сигнала может и не приводить к столь значительным ошибкам [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование влияния ветрового волнения на эффективность пространственной обработки узкополосных акустических сигналов с использованием вертикальной АР в мелком море. Проанализирована эффективность трех методов обработки: ФАР, т.е. фазированной антенной решетки (соответствующий коэффициент усиления обозначен G_0), оптимальной линейной обработки (G_1) и оптимальной квадратичной обработки (G_2). Для расчета корреляционной матрицы сигнала на апертуре вертикальной АР использовалась теоретическая модель, описывающая эффекты многократного рассеяния акустических мод на ветровом волнении и их затухание в донном грунте. При этом корреляционная матрица формируется как рассеянной, так и когерентной компонентами акустического поля и учитывает межмодовые корреляции. В качестве помехи рассматривались океанический шум, для которого использовались две модели: шум, некоррелированный на элементах АР, и динамический шум, генерируемый дипольными ветровыми источниками. В последнем случае теоретическая модель шума

учитывает генерацию шумового поля ветровыми дипольными источниками, его рассеяние на взволнованной поверхности и затухание в дне. Приведены результаты численного моделирования для Баренцева моря с гидрологией зимнего типа и различных акустических характеристиках донных осадков. При этом анализировались значения коэффициентов усиления G_i , сглаженные по интерференционной структуре (на интервале $\Delta r = 10$ км).

Продемонстрирована высокая эффективность применения алгоритмов оптимальной обработки сигнала применительно к вертикальной АР в мелком море. Например, в случае некоррелированных донных осадков и АР с числом элементов $M = 25$ сглаженные коэффициенты усиления G_1 и G_2 слабо зависят от дистанции R и имеют значения 13 дБ при умеренном ветре $V = 10$ м/с и 11–12 дБ при сильном ветре $V = 15$ м/с в широком диапазоне $5 \text{ км} \leq R \leq 500 \text{ км}$. Эти результаты близки к предельному значению $10 \lg M$, соответствующему волноводу с регулярными параметрами. Метод ФАР (в нашем случае синфазная АР) существенно проигрывает оптимальным методам, особенно в случае динамического шума и на малом удалении АР от источника $R \leq 50$ км.

Особое внимание уделено влиянию на результаты обработки межмодовых корреляций. Показано, что традиционное использование корреляционной матрицы сигнала, сглаженной по интерференционной структуре (или предположение о некоррелированности акустических мод), в случае вертикальной АР приводит к принципиально неверным результатам при оптимальной обработке сигнала, хотя для метода ФАР не дает существенных ошибок. Приведено физическое объяснение этого эффекта как псевдодекорреляции сигнала на примере волновода с регулярными параметрами (т.е. в отсутствие флуктуаций среды распространения).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00383, <https://rscf.ru/project/20-19-00383/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 193 с.
2. Buckingham M.J. Array gain of a broadside vertical line array in shallow water // J. Acoust. Soc. Am. 1979. V. 65. № 1. P. 148–161.
3. Clay C.S. Comments on “Array gain of a broad side vertical array in shallow water” // J. Acoust. Soc. Am. 1979. V. 66. № 5. P. 1548–1551.
4. Hamson R.M. The theoretical gain limitations of a passive vertical line array in shallow water // J. Acoust. Soc. Am. 1980. V. 68. № 1. P. 156–164.
5. Елисеев В.А. О работе горизонтальной линейной антенны в мелком море // Акуст. журн. 1983. Т. 29. № 1. С. 44–49.
6. Елисеев В.А. Диаграмма направленности компенсированной излучающей горизонтальной линейной антенны в волноводе // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 3. С. 468–472.
7. Елисеев В.А. Усредненный отклик горизонтальной линейной антенны в мелком море // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 2. С. 193–197.
8. 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.
9. 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.
10. Раевский М.А., Бурдуковская В.Г. Пространственная обработка акустических сигналов в океанических волноводах на фоне шумов ветрового происхождения // Акуст. журн. 2023. Т. 69. № 1. 73–83.
11. Раевский М.А., Бурдуковская В.Г. Влияние межмодовых корреляций на эффективность пространственной обработки акустических сигналов в океаническом волноводе со взволнованной поверхностью // Акуст. журн. 2022. Т. 68. № 6. С. 625–637.
12. Завольский Н.А., Малеханов А.И., Раевский М.А., Смирнов А.В. Влияние ветрового волнения на характеристики горизонтальной антенны в условиях мелкого моря // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 5. С. 501–512.
13. Раевский М.А., Бурдуковская В.Г. Влияние случайных внутренних волн на характеристики горизонтальной антенны в мелком море // Акуст. журн. 2023. Т. 69. № 5. С. 584–594.
14. Labutina M.S., Malekhanov A.I. and Smirnov A.V. Estimation of efficiency of vertical antenna arrays in underwater sound channels // Phys. Wave Phenom. 2016. V. 24. № 2. P. 161–167.
15. Smirnov A.V., Malekhanov A.I. and Labutina M.S. Vertical array gain in a randomly inhomogeneous underwater sound channels: Effect of the array arrangement // POMA. 2021. V. 44.
16. Горская Н.С., Раевский М.А. О многократном рассеянии низкочастотных акустических волн на поверхностном волнении // Акуст. журн. 1986. Т. 32. № 2. С. 165–171.
17. Нечаев А.Г. Затухание интерференционной структуры акустического поля в океане со случайными неоднородностями // Акуст. журн. 1987. Т. 33. № 3. С. 535–538.
18. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 256 с.

19. Раевский М.А., Бурдуковская В.Г. Многократное рассеяние океанического шума на ветровом волнении в мелком море // Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 5. С. 514–520.
20. Kuperman W.A., Ingenito F. Spatial correlation of surface generated noise in a stratified ocean // J. Acoust. Soc. Am. 1980. V. 67. P. 1988–1996.
21. Монзиго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию / Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
22. Baker C.R. Optimum quadratic detection of a random vector in Gaussian noise // IEEE Trans. Commun. VOL.COM-14. 1966. № 6. P. 802–805.
23. 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.
24. Малеханов А.И., Таланов В.И. Об оптимальном приеме сигналов в многомодовых волноводах // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 5. С. 891–897.

Modeling the Gain of a Vertical Antenna in a Shallow Waveguide With a Wovled Surface

M. A. Raevski¹, V. G. Burdukovskaya¹, *

¹*Institute of Applied Physics RAS, st. Ulyanova 46, BOX-120, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

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

The influence of developed wind waves on the gain of a vertical antenna in shallow ocean waveguides is studied analytically and numerically. An algorithm is proposed for calculating the model correlation matrix of the signal at the aperture of a vertical antenna array, taking into account the interference structure of the acoustic field in the sound channel. The antenna gain is analyzed for three spatial processing methods: standard phased array antenna method, optimal linear processing method and optimal quadratic processing method. The results of numerical modeling for the hydrological conditions of the Barents Sea in winter are presented. The main attention is paid to the dependence of the antenna array gain values, “smoothed” on the scale of the interference structure of the acoustic field in the waveguide, on the wind speed and characteristics of the bottom soil. The influence of intermodal correlations on the results of gain modeling for various signal processing methods is analyzed in detail. It is shown that ignoring intermodal correlations in the case of a vertical antenna leads to fundamentally erroneous results with optimal processing methods.

Keywords: shallow sea, wind waves, multiple scattering, intermode correlations, vertical antenna, gain