

ВЛИЯНИЕ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ АНТЕННЫ В УСЛОВИЯХ МЕЛКОГО МОРЯ

© 2017 г. Н. А. Завольский, А. И. Малеханов*, М. А. Раевский, А. В. Смирнов

*Институт прикладной физики РАН
603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова 46*

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

Поступила в редакцию 11.12.2016 г.

Анализируется влияние статистических эффектов распространения акустического сигнала, возбуждаемого тональным источником в канале мелкого моря со взволнованной поверхностью, на эффективность горизонтальной фазированной антенной решетки. В качестве характеристик антенны рассматриваются функция углового отклика при заданном направлении на источник и коэффициент усиления выходного отношения сигнал/шум (антенный выигрыш). Численное моделирование выполнено применительно к зимним гидрологическим условиям Баренцева моря в широкой области параметров, определяющих условия формирования пространственных корреляций сигнала. Полученные результаты демонстрируют основные физические эффекты влияния ветрового волнения на характеристики антенны и позволяют дать количественный прогноз эффективности работы протяженных горизонтальных антенн в реалистичных условиях мелкого моря.

Ключевые слова: дальнейшее распространение звука, многомодовый сигнал, ветровое волнение, пространственные корреляции, фазированная антенная решетка, угловой отклик антенны, коэффициент усиления антенны.

DOI: 10.7868/S0320791917040165

1. ВВЕДЕНИЕ

На характеристики приемной горизонтальной антенны в мелком море влияют (наряду с ее конструктивными особенностями) два основных фактора: многомодовый характер распространения звуковых сигналов и статистические эффекты рассеяния звука на взволнованной морской поверхности, объемных флуктуациях среды и нерегулярных структурах дна. Влияние многомодового распространения на характеристики направленности антенны в детерминированной постановке задачи исследовано весьма подробно в работах В.А. Елисеєвнина и ряда других авторов [1–7]. По существу, основной эффект здесь заключается в “рассыпании” функции углового отклика антенны на отдельные парциальные компоненты, отвечающие проекциям продольных волновых чисел мод дискретного спектра на ось антенны, и их интерференции на выходе сумматора антенны. Результат такой интерференции оказывается чувствительным к фазовым соотношениям мод и, следовательно, к расстоянию до источника сигнала.

Существенно менее подробно исследовано влияние случайных неоднородностей подводного звукового канала на эффективность работы горизонтальных антенн, что обусловлено как значи-

тельной сложностью описания статистических эффектов многократного рассеяния звука в условиях волноводного распространения, так и недостаточной изученностью самих флуктуаций в акваториях мелкого моря в силу значительной региональной вариативности их статистических характеристик [8]. С учетом определенных модельных предположений такое влияние было рассмотрено ранее применительно к условиям глубоководных океанических волноводов [9–11] и волноводов мелкого моря [9, 12], но в целом это направление исследований представляется далеким от своего завершения. Отметим в этой связи отличительную особенность распространения звука в каналах мелкого моря, которые, как правило, полностью или частично открыты к обеим границам. Она заключается в том, что наряду с влиянием объемных неоднородностей принципиально важным для них становится учет влияния ветрового волнения и взаимодействия звука с донными породами. Последние два “граничных” фактора распространения звука в мелком море являются наиболее характерными и потому существенными с точки зрения количественных оценок их совместного влияния на эффективность антенны. Что же касается объемных неоднородностей, например, случайного поля внутренних волн, то

достаточно универсальные статистические модели для них практически отсутствуют (в отличие от каналов глубокого океана), и поэтому корректный учет их влияния требует обобщения натуральных данных *in situ*.

Таким образом, мотивация данной работы связана с необходимостью дальнейшего исследования вопроса о влиянии наиболее характерных физических особенностей дальнего распространения звука в каналах мелкого моря на работу протяженных горизонтальных антенн. В условиях, когда подавляющее число акустических мод испытывают многократное рассеяние на взволнованной поверхности, естественно ожидать “накопления” статистических искажений распространяющегося сигнала с ростом дистанции. Вместе с тем неравномерное затухание мод, связанное с их проникновением в донные породы, может оказаться дополнительным и весьма критическим фактором, влияющим на результирующий пространственный масштаб корреляций сигнала на входе многоэлементной антенной решетки (АР). В данной работе мы анализируем влияние обоих этих факторов на выходные характеристики горизонтальной фазированной АР. В качестве таковых рассматриваются (1) статистически усредненный квадратичный угловой отклик АР, определяющий ее разрешающую способность и возможность локализации удаленного источника по угловой координате в горизонтальной плоскости канала, и (2) коэффициент усиления (антенный выигрыш), который определяет энергетическую эффективность АР по отношению к отдельному (ненаправленному) элементу. Путем численного моделирования в рамках модового формализма описания пространственных корреляций звукового поля демонстрируются зависимости этих характеристик от уровня ветрового волнения (расчетным параметром здесь является скорость ветра) и длины акустической трассы для типичных гидрологических условий Баренцева моря в зимний период.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Рассмотрим сигнальную компоненту поля на входе горизонтальной АР линейной конфигурации, которая создается точечным источником звука в подводном канале со взволнованной свободной поверхностью. Волновод предполагается горизонтально однородным с произвольным профилем скорости звука $c(z)$ и произвольной плоскостной структурой дна. Ограничимся при этом рассмотрением низкочастотного диапазона (ниже ~ 500 Гц), наиболее интересного для акустики мелкого моря с учетом возможностей дальнего распространения сигнала до нескольких сотен километров. Очевидно, что именно на зна-

чительных удалениях от источника можно ожидать наиболее существенного проявления статистических эффектов распространения.

Поле источника в дальней зоне на некоторой частоте спектра его излучения стандартно представим в виде разложения по ортонормированным собственным функциям $\Phi_p(z)$ невозмущенного волновода:

$$P(r, z, t) = \sum_p \frac{a_p \Phi_p(z)}{\sqrt{k_p r}} e^{i(k_p r - \omega t - \frac{\pi}{4})}. \quad (1)$$

Здесь a_p – модовые амплитуды, k_p – продольные волновые числа мод, ω_0 – частота излучения, r – горизонтальное расстояние от источника до точки наблюдения. Выражение (1) приведено в безразмерном виде с учетом известной асимптотики функции Ханкеля при значениях $k_p r \gg 1$ и с точностью до амплитуды источника и численного коэффициента, которые не важны для дальнейших расчетов. Без учета ветрового волнения, как и других случайных возмущений волновода, амплитуды мод являются детерминированными величинами и определяются глубиной источника z_H : $a_p = \Phi_p(z_H)$. Если присутствует ветровое волнение, свободная поверхность волновода является случайной функцией горизонтальных координат (x, y) и времени t , обозначаемой в дальнейшем $z = \zeta(x, y, t)$. Модовые амплитуды a_p при этом также становятся случайными функциями тех же переменных (x, y, t) .

Как следует из выражений, приведенных далее, статистические характеристики углового отклика АР определяются функцией взаимной корреляции акустического поля на разных приемных элементах (функцией когерентности). В свою очередь, последняя определяется пространственной функцией взаимных корреляций модовых амплитуд $\langle a_p(r_1, t) a_q^*(r_2, t) \rangle$, где $\langle \dots \rangle$ означает операцию статистического усреднения по ансамблю реализаций ветрового волнения (случайной функции $\zeta(x, y, t)$):

$$\begin{aligned} & \langle P(r_1, z_1, t) P^*(r_2, z_2, t) \rangle = \\ & = \sum_{p, q} \left\langle a_p(r_1, t) a_q^*(r_2, t) \right\rangle \frac{\Phi_p(z_1) \Phi_q^*(z_2)}{\sqrt{k_p k_q r_1 r_2}} e^{i(k_p r_1 - k_q r_2)}. \quad (2) \end{aligned}$$

Вследствие интерференционных явлений в многомодовом волноводе функция когерентности (2), а вместе с ней и характеристики АР, являются квазислучайными (слабо предсказуемыми) функциями расстояния до источника. Поэтому, если иметь в виду большой диапазон возможных дистанций, намного превышающий характерные (для заданного волновода) масштабы интерференции мод, для практических приложений наиболее интересным представляется исследование

характеристик АР, усредненных по интерференционной структуре сигнального поля. Для описания таких “сглаженных” корреляционных функций, как показано в работе [13], достаточно ограничиться рассмотрением автокорреляционных функций модовых амплитуд $\langle a_p(r_1, t) a_p^*(r_2, t) \rangle$ и однократным суммированием по модовым индексам в выражении (2). Отметим в этой связи, что в случайно-неоднородном канале с ростом дистанции происходит естественное ослабление взаимных корреляций модовых амплитуд и обусловленное этим сглаживание интерференционной структуры поля [14]; к этому же эффекту приводит и обеднение спектра энергонесущих мод вследствие их неравномерного затухания в канале. Следовательно, анализ пространственно-усредненных характеристик АР для больших дистанций дает вполне корректное представление и о локальных значениях интересующих нас величин.

Для дальнейшего анализа сглаженных по интерференционной структуре функций когерентности в горизонтальной плоскости канала нам потребуются автокорреляционная функция акустических мод с поперечным (относительно оси x , вдоль которой предполагается распространение сигнала) разнесением точек наблюдения:

$$N_p(\rho, x) = \left\langle a_p\left(-\frac{\rho}{2}, x\right) a_p^*\left(\frac{\rho}{2}, x\right) \right\rangle. \quad (3)$$

Для ее описания в волноводе с нерегулярной свободной поверхностью ранее было получено уравнение переноса, которое применительно к случаю точечного источника и изотропного волнения имеет вид [15]

$$\frac{\partial N_p(\rho, x)}{\partial x} = \sum_q W_{pq}(\rho, x) N_q(\rho, x) - 2(\gamma_p + \text{Im } k_p) N_p(\rho, x). \quad (4)$$

Здесь γ_p – декремент затухания когерентной компоненты модовой амплитуды $\langle a_p \rangle$, в котором учтено рассеяние энергии данной моды как в другие моды дискретного спектра, так и в моды сплошного спектра, $\text{Im } k_p$ – мнимая часть продольного волнового числа моды, обусловленная потерями энергии моды в донном грунте, W_{pq} – вероятность перехода между модами, описывающая эффекты взаимного рассеяния мод, локализованных в волноводе. Функции γ_p и W_{pq} выражаются через дву-

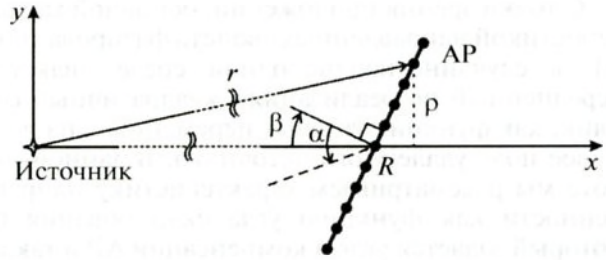


Рис. 1. Схема взаимной ориентации источника и АР в горизонтальной плоскости канала.

мерный пространственный спектр ветрового волнения $B_\zeta(k_x, k_y)$ следующим образом:

$$\gamma_p = \frac{1}{2k_p} \left(\frac{d\phi_p}{dz} \right)^2 \int_0^{k_0} \eta \sqrt{k_0^2 - \eta^2} d\eta \times \int_{-\pi}^{\pi} B_\zeta(k_p - \eta \cos \varphi, \eta \sin \varphi) d\varphi, \quad (5)$$

$$W_{pq}(\rho, x) = \frac{\pi}{2k_p k_q} \left(\frac{d\phi_p}{dz} \right)^2 \left(\frac{d\phi_q}{dz} \right)^2 \times \int_{-\infty}^{+\infty} B_\zeta(k_p - k_q, k_y) \cos\left(k_y \frac{x}{R} \rho\right) dk_y, \quad (6)$$

где $d\phi_p/dz$ – производная собственной функции волновода на невозмущенной поверхности $z = 0$, $k_0 = \omega_0/c(0)$.

Подчеркнем, что уравнения (4)–(6) получены в предположении малости параметра Рэлея:

$$R_p = k_0 \sqrt{\langle \zeta^2 \rangle} \sin \theta_p \ll 1, \quad (7)$$

где θ_p – угол скольжения на поверхности $z = 0$ волны Бриллюэна, соответствующей моде с индексом p . Для локализованных в волноводе слабо затухающих мод $\sin \theta_p \ll 1$, а поскольку при не слишком сильных скоростях ветра ($V \leq 15$ м/с) и частотах ниже ~ 500 Гц величина $k_0 \sqrt{\langle \zeta^2 \rangle} \leq 1$, то условие (7) является физически оправданным.

Перейдем теперь к рассмотрению характеристик горизонтальной АР, состоящей из N эквидистантно расположенных элементов одинаковой чувствительности. Будем считать, что АР ориентирована под углом β к поперечной оси y (этот угол совпадает с направлением на источник, стандартно отсчитываемым от нормали к антенне) и расположена на глубине z_A , расстояние от источника до центра антенны обозначается R . Вид сверху на расположение АР и источника в горизонтальной плоскости (x, y) подводного канала показан на рис. 1.

С точки зрения приложений, основной характеристикой направленных свойств фазированной АР в случайно-неоднородной среде является усредненный по реализациям квадратичный отклик, как функция угловых переменных, на волновое поле удаленного источника. В данной работе мы рассматриваем характеристику направленности как функцию угла сканирования α , который задается углом компенсации АР и также отсчитывается от нормали к ее оси, при некотором фиксированном направлении на источник (значении угла β). Для краткости в дальнейшем эту зависимость будем называть откликом АР и обозначать $\langle |\Lambda(\alpha, R)|^2 \rangle$ (в работах [3, 4] аналогичная угловая зависимость в случае регулярного канала названа сканограммой). Полагая корреляционную функцию $N_p(\rho, x)$ (3) известной, для отклика фазированной АР нетрудно получить следующее выражение (здесь расстояние R и угол β являются параметрами):

$$\begin{aligned} & \langle |\Lambda(\alpha, R, \beta)|^2 \rangle = \\ & = \sum_p \sum_{m=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \frac{\Phi_p^2(z_A)}{k_p R} N_p(d(m-n)\cos\beta, R) \times (8) \\ & \quad \times \exp[id(m-n)(k_p \sin\beta - k_0 \sin\alpha)], \end{aligned}$$

где d – межэлементное расстояние, а число N элементов предполагается нечетным для симметрии АР относительно центрального элемента (очевидно, это предположение не является критичным для дальнейших результатов). При получении этого выражения, наряду с разностью фаз нормальных мод на различных элементах, учитывается, что поперечному разнесению точек наблюдения на величину ρ соответствует их разне-

сение вдоль оси антенны на величину $\rho/\cos\beta$, зависящую от направления на источник.

Для количественной оценки эффективности работы протяженной АР помимо углового отклика (8) особый интерес представляет коэффициент усиления (антенный выигрыш) G . Эта величина стандартно определяется как величина отношения сигнал/шум (ОСШ) на выходе сумматора АР, отнесенная к величине ОСШ на отдельном элементе. Для расчетов ОСШ необходимо сделать модельные предположения относительно пространственных корреляций аддитивного шума на входе АР. Для упрощения анализа будем предполагать, что шум является пространственно-белым, т.е. шумы океана, как и собственные шумы в каналах АР, являются взаимно-некоррелированными на разных элементах АР и имеют одинаковую для всех элементов интенсивность (конкретное ее значение не важно для расчетов коэффициента усиления). Отметим в этой связи, что модели корреляционных функций шумов реального океана и экспериментальные данные указывают на некоторые, хотя и незначительные, отличия горизонтального масштаба их пространственных корреляций от половины длины волны (см., например, [16, 17]). Это означает, что для АР с таким межэлементным расстоянием частичная корреляция шума в каналах с близкими номерами может наблюдаться, что имеет значение для расчетов выходного ОСШ, но не является принципиальным для нашего рассмотрения эффектов, связанных с сигнальным полем. С учетом сделанного предположения относительно шумов и в случае компенсации АР в направлении на источник (т.е. при условии $\alpha = \beta$) для величины G получается следующее выражение:

$$G(R, \beta) = \frac{\sum_p \frac{\Phi_p^2(z_A)}{k_p} \sum_{m=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} N_p(d(m-n)\cos\beta, R) \exp[id(m-n)(k_p - k_0)\sin\beta]}{N \sum_p \frac{\Phi_p^2(z_A)}{k_p} N_p(0, R)}. \quad (9)$$

При произвольном значении угла компенсации АР коэффициент усиления варьирует пропорционально величине отклика (8), от которой прямо зависит значение выходного ОСШ антенны.

Приведенные выше выражения позволяют провести численное моделирование характеристик фазированной АР для различных конкретных ситуаций и значений параметров. Прежде чем переходить к обсуждению результатов моделирования, отметим некоторые соображения общего характера, которые связаны с отмеченными

выше характерными условиями распространения звука в мелководных каналах.

В интересующем нас диапазоне частот и скоростей ветра, когда выполняется условие (7), в каждом акте рассеяния акустических мод на взволнованной поверхности лишь сравнительно небольшая часть энергии когерентной компоненты сигнала переходит в энергию хаотической (некогерентной) компоненты. Кроме того, как показывают оценки [18, 19], в этом случае вертикальная индикатриса рассеяния превышает кри-

тический угол волновода, следовательно, значительная часть хаотической компоненты соответствует модам сплошного спектра и излучается из волновода. Вследствие этого энергия хаотической компоненты относительно медленно накапливается с дистанцией, а это означает, что даже после многих актов рассеяния возбужденных источником мод когерентная компонента сигнала остается доминирующей. В результате на всех элементах АР сохраняется частичная корреляция сигнала, уровень которой может оставаться достаточно высоким в большом диапазоне расстояний до источника. Можно ожидать поэтому, что в такой ситуации статистические эффекты рассеяния не приводят к значительным искажениям углового отклика АР в области главного максимума и уменьшению ее разрешающей способности. Коэффициент усиления антенны при этом снижается также незначительно, что в совокупности означает относительно слабое влияние статистических эффектов на обсуждаемые характеристики антенны.

С дальнейшим увеличением расстояния (либо скорости ветра) рассеянная компонента акустического поля становится доминирующей, и в этом случае масштаб когерентности сигнала может оказаться меньше, и даже заметно меньше размеров протяженной АР. Именно в такой ситуации следует ожидать значительного уширения главного максимума углового отклика и ослабления выигрыша АР, т.е. тех эффектов, которые хорошо известны и характерны для антенн больших волновых размеров при наличии сильных фазовых флуктуаций волнового фронта [20].

Кроме того, следует ожидать критического влияния такого параметра как направление на источник, поскольку с его ростом АР начинает “чувствовать” модовое уширение пространственного спектра сигнала. Действительно, для поперечной ориентации антенны все моды дискретного спектра не имеют проекций волновых чисел вдоль ее оси, следовательно, статистические эффекты могут проявиться только вследствие флуктуаций волновых фронтов отдельных мод. С ростом угла прихода “включается” продольный масштаб когерентности многомодового сигнала, который обусловлен ослаблением взаимных корреляций модовых амплитуд и, в отличие от поперечного масштаба, не связан с флуктуациями волновых фронтов отдельных мод [21]. Кроме того, при этом заметно проявляется детерминированный эффект искажения функции отклика [1–7], причем в наибольшей степени его влияния можно ожидать на относительно коротких дистанциях (в “почти регулярном” волноводе).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Численное моделирование выполнено нами для гидрологических условий Баренцева моря в зимний период, для которых характерны профили скорости звука со слабым положительным градиентом [8]. Расчеты проведены для волновода с линейным профилем скорости звука: $c(0) = 1500$ м/с, $c(H) = 1510$ м/с, глубина канала $H = 200$ м. В качестве модели дна выбрано жидкое полупространство с параметрами $\rho = 2$ г/см³, $c_1 = 1800$ м/с и отнесенным к частоте коэффициентом затухания $\delta = 0.2$ дБ/км Гц. Предполагалось, что источник излучает тональный сигнал с частотой $f = 250$ Гц и находится вблизи дна ($z_H = 197$ м); на этой же глубине расположена горизонтальная АР ($z_A = 197$ м) с межэлементным расстоянием $d = \lambda/2 = 3$ м (λ – длина волны, отвечающая рабочей частоте). Для расчетов были выбраны два существенно различных варианта по числу элементов АР: $N = 51$ (полная длина антенны 25λ) и $N = 201$ (100λ соответственно); ориентация АР (угол на источник) также задавалась различной: $\beta = 0^\circ$ и $\beta = 30^\circ$. При расчетах когерентных свойств сигнала на основе выражений (3)–(6) использовалась известная модель развитого изотропного ветрового волнения с эмпирическим спектром Пирсона–Московица [22]:

$$B(\kappa) = B_0 \kappa^{-4} \exp\left(-\frac{\kappa_*^2}{\kappa^2}\right), \quad (10)$$

где κ – волновые числа ветровых волн, $B_0 = 6 \times 10^{-4}$, $\kappa_* = 0.86 g/V^2$, g – ускорение свободного падения, V – скорость ветра. Расчеты проводились для двух значений скорости ветра V (10 и 15 м/с) в широком интервале удалений АР от источника, от 1 до 500 км. Параметры численного моделирования выбирались специально таким образом, чтобы продемонстрировать все отмеченные выше физические аспекты рассматриваемой задачи.

Обсуждение результатов моделирования начнем с анализа когерентных свойств принимаемого сигнала. На рис. 2 приведены нормированные корреляционные функции поля, “сглаженные” по интерференционной структуре, на различных расстояниях R от источника:

$$N(\rho, R) = \frac{\sum_p N_p(\rho, R) k_p^{-1} \Phi_p^2(z_A)}{\sum_p N_p(0, R) k_p^{-1} \Phi_p^2(z_A)}. \quad (11)$$

Видно, что при умеренных ветрах ($V = 10$ м/с, рис. 2а) частичная и весьма высокая когерентность поля (на уровне 0.5–0.7) сохраняется даже

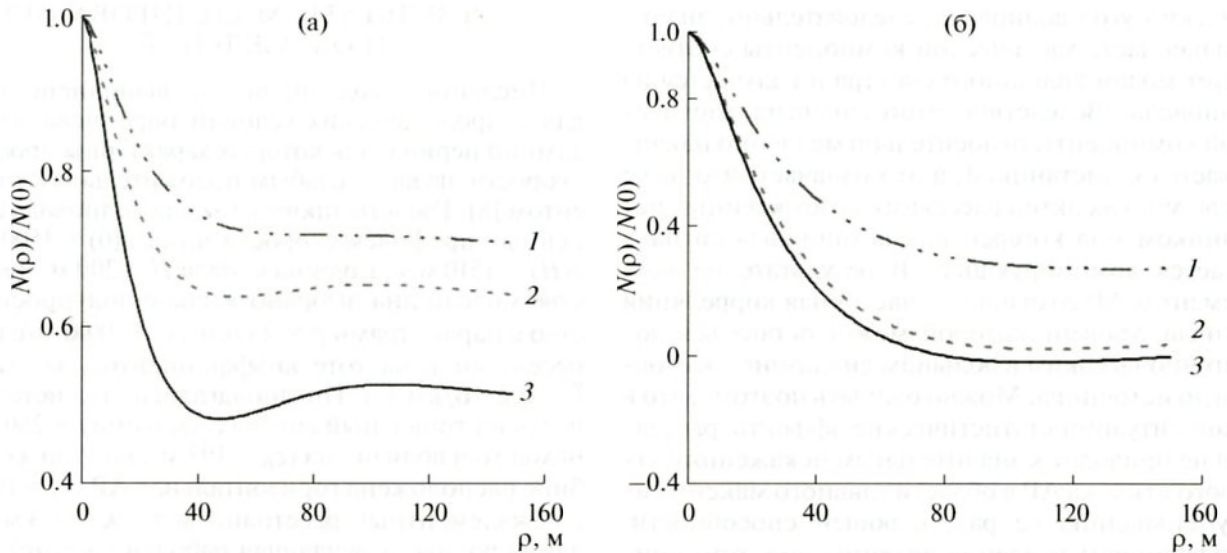


Рис. 2. Зависимость коэффициента пространственной корреляции сигнального поля от поперечного расстояния между точками наблюдения при скорости ветра (а) 10 и (б) 15 м/с и различных дистанциях: 1 – 100, 2 – 300, 3 – 500 км.

при больших удалениях от источника, т.е. статистические эффекты распространения достаточно медленно “накапливаются” с ростом дистанции. При более сильном ветре ($V = 15$ м/с, рис. 2б) и для значительных дистанций $R \geq 100$ км когерентность поля, напротив, сохраняется лишь на масштабе корреляции ветрового волнения. Следовательно, для больших АР (размер которых превышает $\sim 10\lambda$) влияние статистических эффектов в таких условиях должно оказаться значительным.

Рассмотрим теперь характеристики фазированной АР, используя для расчетов соответствующие выражения (8), (9). Сначала остановимся на случае поперечной ориентации АР (угол $\beta = 0^\circ$). Нормированные (на величину своего максимума) функции отклика при разных скоростях ветра и дистанциях приведены на рис. 3 для двух заданных размеров АР и значений скорости ветра; в силу симметрии отклика показаны только для углов $\alpha \geq 0$. Видно, что на коротких дистанциях (единицы и первые десятки километров), для которых эффекты рассеяния заведомо не столь велики, отклик АР сохраняет свою многолепестковую структуру, характерную для отклика антенны в однородном свободном пространстве. Статистические эффекты проявляются здесь лишь в исчезновении глубоких нулей регулярной функции отклика, которые, как известно, наиболее чувствительны к флуктуациям волнового фронта принимаемого сигнала [20]. Вместе с тем статистические искажения отклика АР с ростом дистанции сильно зависят от скорости ветра. При умеренных ветрах ($V = 10$ м/с) достаточно хорошо сохраняется форма главного максимума, а искажения проявляются лишь в области боковых лепестков – заметно по-

вышается их уровень и практически исчезает осциллирующая структура. В случае более сильного ветра ($V = 15$ м/с) наряду с этим видна существенная деградация отклика в области главного максимума – его уширение и резкое снижение контраста по отношению к фоновому уровню бокового поля, что приводит к значительному (на порядок) ослаблению разрешающей способности АР. Все это согласуется с приведенными выше физическими соображениями.

Аналогичным образом эффекты рассеяния влияют и на коэффициент усиления АР (9), который показан на рис. 4 в сравнении величиной $G = N$ (горизонтальный пунктир). Отметим, что для рассматриваемого нами сценария пространственно-белого шума эта величина представляет собой максимально возможный выигрыш АР, который достигается при условии полного согласования ее амплитудно-фазового распределения с волновым фронтом сигнала. Любые “расогласования” в такой ситуации (регулярного или статистического характера) приводят только к относительному уменьшению величины антенного выигрыша, что и демонстрируют приведенные нами зависимости. Видно, что на малых расстояниях (до ~ 10 км) эффект практически мал – снижение величины G относительно N не превышает ~ 1 дБ. С увеличением расстояния выигрыш АР ожидаемо снижается, причем в силу многомодового характера сигнального поля эти изменения имеют неравномерный (по дистанции) характер. Однако при умеренных ветрах это снижение все равно остается относительно небольшим, в пределах ~ 3 дБ, в то время как при сильном ветре оно весьма значи-

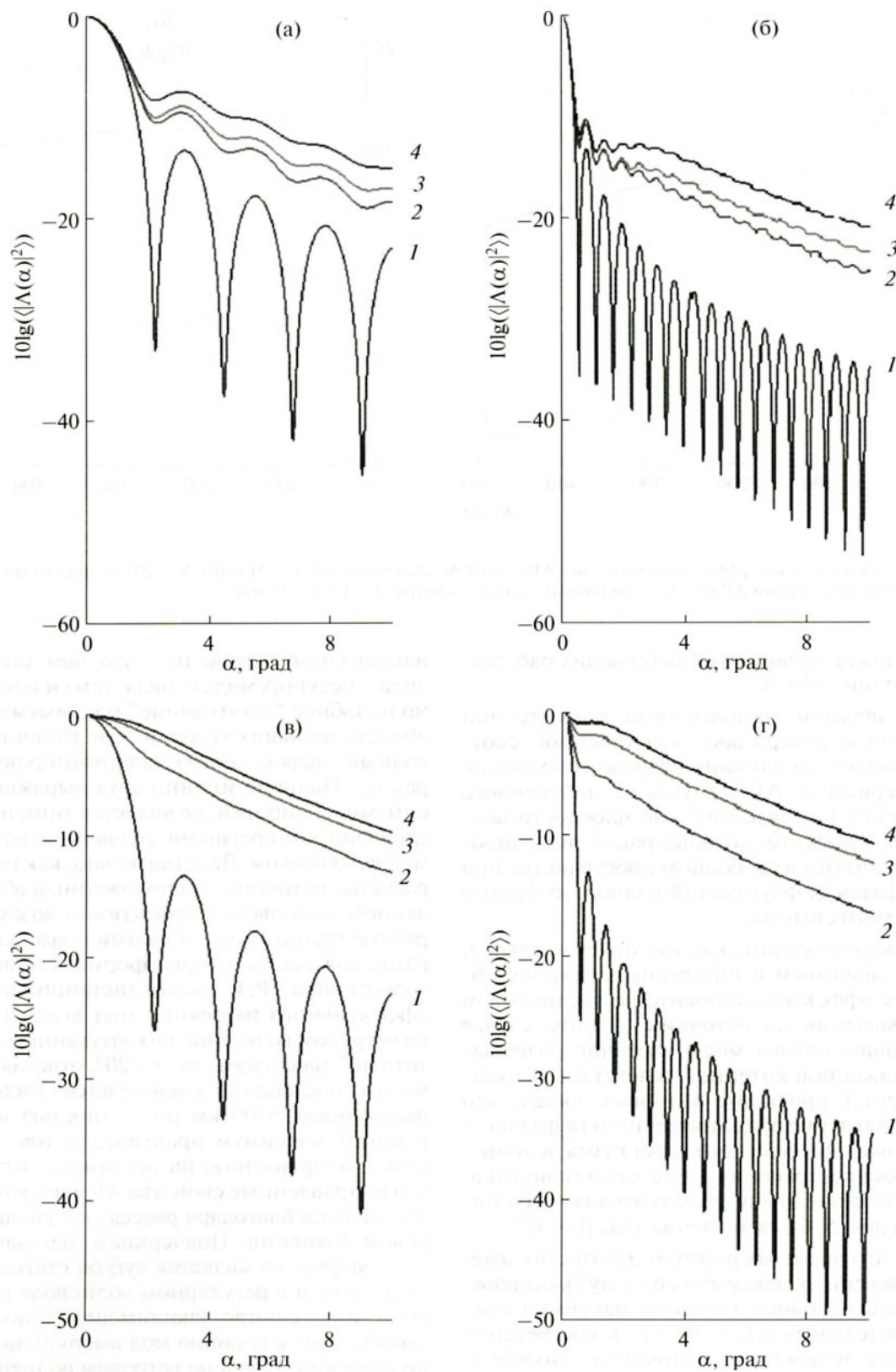


Рис. 3. Зависимость нормированного отклика АР с числом элементов (а, в) $N = 51$ и (б, г) $N = 201$ от угла компенсации в случае поперечной ориентации АР ($\beta = 0^\circ$) при скорости ветра (а, б) 10 и (в, г) 15 м/с и различных дистанциях: 1 – 1, 2 – 100, 3 – 300, 4 – 500 км.

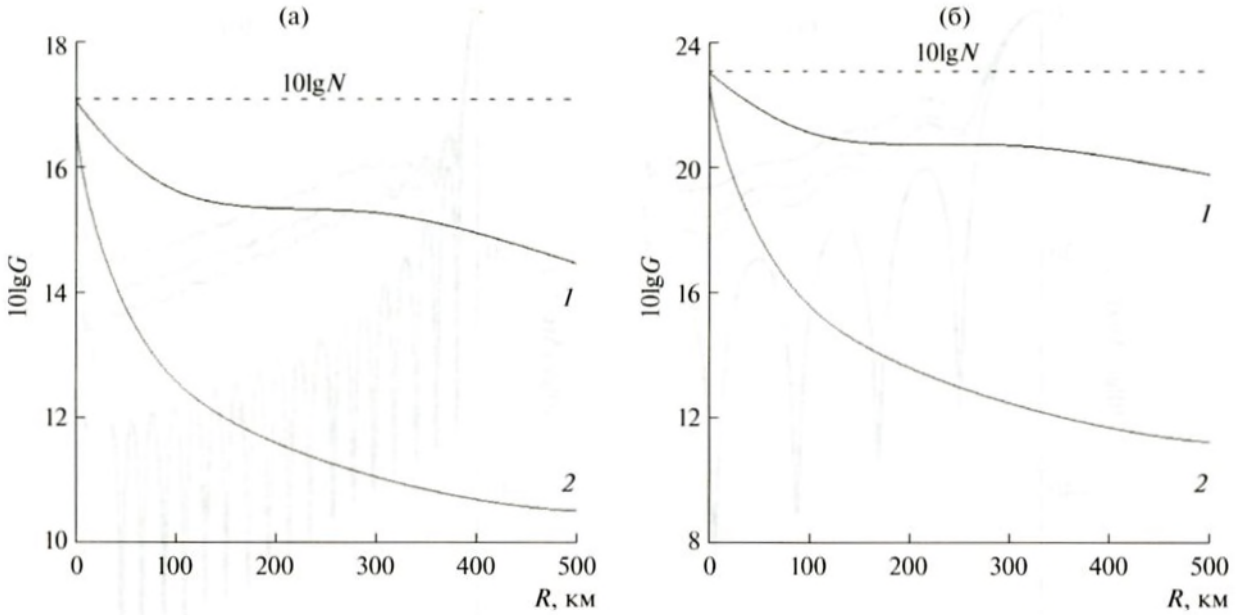


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления АР с числом элементов (а) $N = 51$ и (б) $N = 201$ от дистанции в случае поперечной ориентации АР ($\beta = 0^\circ$) при разных скоростях ветра: 1 – 10, 2 – 15 м/с.

тельно и может превышать (на больших расстояниях) величину ~ 10 дБ.

Таким образом, приведенные иллюстрации убедительно подтверждают качественное соответствие эффектов влияния ветрового волнения на характеристики АР в случае ее поперечного расположения в горизонтальной плоскости волновода тем эффектам, которые ранее анализировались для антенн в свободном пространстве при наличии фазовых флуктуаций волнового фронта принимаемого сигнала.

Естественно ожидать, как уже отмечено выше, что более значимым и интересным влияние обсуждаемых эффектов становится с увеличением угла направления на источник. В этом случае формирующие сигнал моды частично разрешаются протяженной антенной вследствие ненулевых значений проекций волновых чисел, что означает появление дополнительного (к фазовым флуктуациям) физического механизма влияния условий распространения на ее характеристики. Соответствующие этому случаю отклики АР приведены на рис. 5, 6 для значения угла $\beta = 30^\circ$.

Видно, что на малых расстояниях отклик имеет два выраженных максимума по углу сканирования, причем основной (правый) максимум смещен относительно угла $\beta = 30^\circ$, т.е. не соответствует угловому положению источника. Подобное смещение максимума отклика в область меньших углов отмечалось ранее многими авторами и связано с тем, что все продольные волновые числа мод k_p меньше “опорного” волнового числа k_0 , которое отвечает фазовой компенсации АР в том или ином

направлении. Очевидно, что чем шире спектр энергонесущих мод сигнала, тем сильнее выражено подобное “затягивание” максимума отклика в область меньших углов, и этот типичный волноводный эффект носит детерминированный характер. Наличие именно двух выраженных максимумов, напротив, не является типичным и обусловлено конкретными условиями возбуждения мод источником. Действительно, как показывают расчеты, источник, расположенный вблизи дна в данном волноводе, эффективно возбуждает две разные группы мод с низкими и высокими номерами, каждая из которых формирует свой максимум отклика АР. С ростом дистанции в результате эффективного рассеяния мод высоких номеров на ветровом волнении и их затухании в дне “паразитный” максимум при $\alpha \approx 20^\circ$, отвечающий этим модам, постепенно уменьшается. Видно, что на расстояниях ~ 100 км он полностью исчезает, а главный максимум практически точно соответствует направлению на источник. Это означает, что направленные свойства АР явно улучшаются, фактически благодаря рассеянию сигнала на ветровом волнении. Подчеркнем, однако, что данный эффект не является сугубо статистическим, поскольку и в регулярном волноводе взаимодействие звука с поглощающим дном приводит к повышенному затуханию мод высоких номеров [8], но рассеяние звука на ветровом волнении только ускоряет “полезную” эволюцию спектра интенсивностей сигнальных мод.

В то же время с дальнейшим ростом дистанции проявляется и отрицательная роль статистиче-

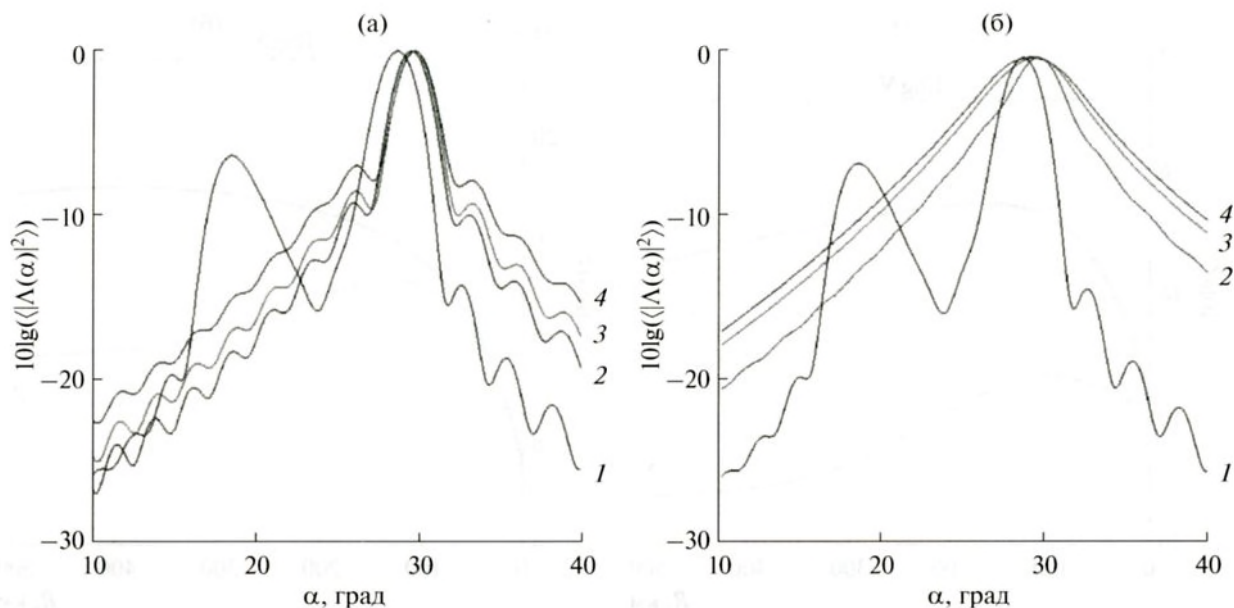


Рис. 5. Зависимость нормированного отклика АР с числом элементов $N = 51$ от угла компенсации в случае наклонной ориентации АР ($\beta = 30^\circ$) при скорости ветра (а) 10 и (б) 15 м/с и различных дистанциях: 1 – 1, 2 – 100, 3 – 300, 4 – 500 км.

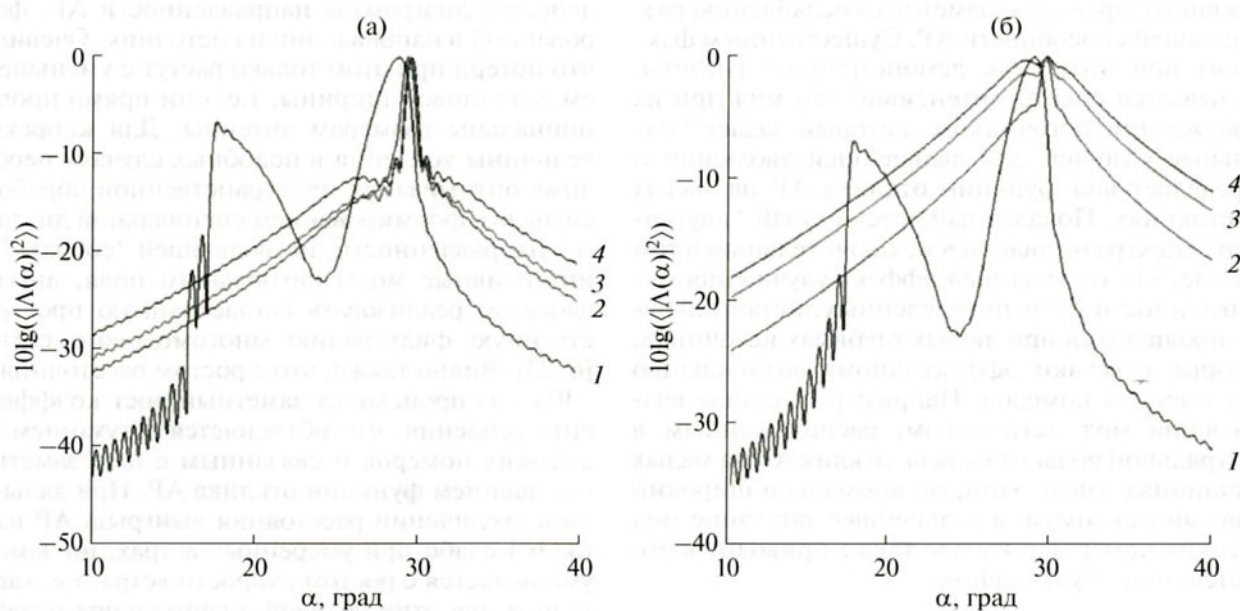


Рис. 6. То же, что на рис. 5, при числе элементов $N = 201$.

ских эффектов аналогично случаю поперечной ориентации АР. Видно, что при умеренном ветре рост дистанции сопровождается сглаживанием и увеличением уровня боковых лепестков функции отклика, а при более сильном ветре – заметным уширением главного максимума и снижением его контраста, т.е. значительным ухудшением направленных свойств АР.

Таким образом, эволюция спектра интенсивностей сигнальных мод по трассе распространения приводит до определенных расстояний к “исправлению” направленных свойств АР в случае ее наклонной ориентации, причем такое исправление может быть весьма существенным. В то же время оставшиеся моды испытывают при этом все более значительные (с ростом дистанции и скорости ветра) флуктуации волновых фронтов,

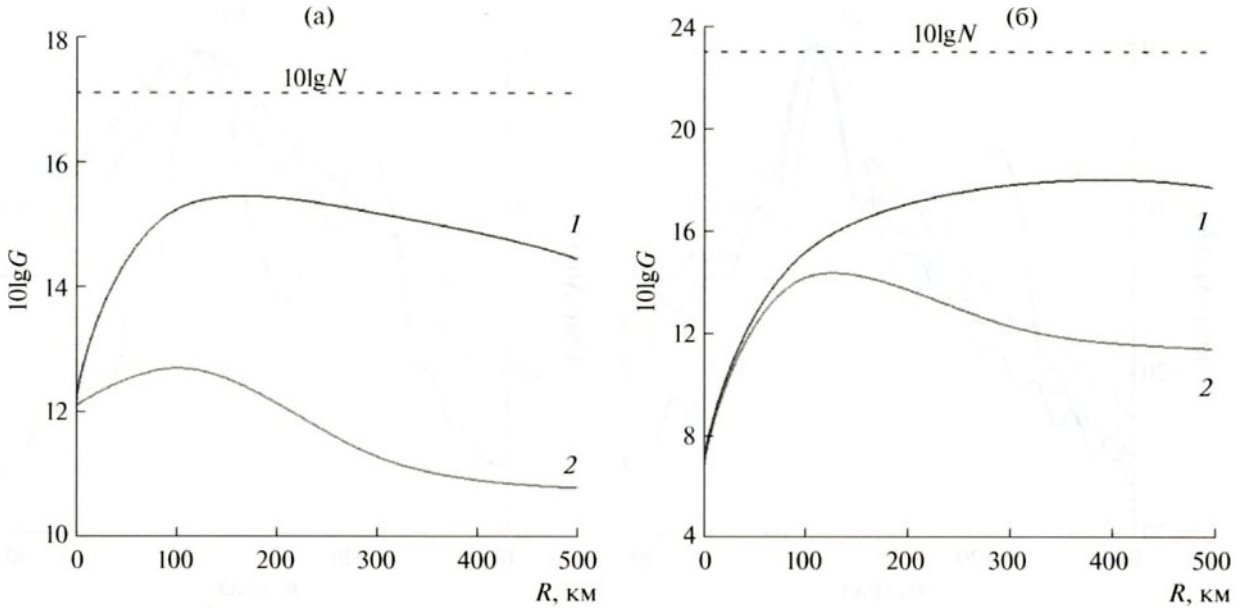


Рис. 7. То же, что на рис. 4, в случае наклонной ориентации АР ($\beta = 30^\circ$).

что, в свою очередь, приводит к обратному и негативному эффекту – заметному ослаблению разрешающей способности АР. Существенным фактором при этом, как демонстрируют расчеты, оказывается спектр интенсивностей мод при их возбуждении источником, который задает “начальные условия” для дальнейшей эволюции и определяет вид функции отклика АР на малых расстояниях. Показанный здесь случай “двугорбого” спектра не является исключительным в том смысле, что отмеченный эффект улучшения направленности АР до определенных дистанций будет проявляться при любых глубинах источника, которые отвечают эффективному возбуждению мод высоких номеров. Например, в случае возбуждения мод источником, расположенным в центральной области канала, отклик АР на малых дистанциях имеет один, но аномально широкий главный максимум, а дальнейшее затухание мод высоких номеров в канале также приводит к его постепенному улучшению.

Такое же неоднозначное в указанном смысле влияние статистических эффектов проявляется и при анализе коэффициента усиления АР в зависимости от дистанции. Соответствующие результаты расчетов приведены на рис. 7 для разных скоростей ветра и размеров АР. Видно, что на малых расстояниях (фактически в регулярном волноводе) снижение коэффициента усиления относительно уровня $G = N$ весьма велико и составляет величину ~ 5 дБ для $N = 51$ и ~ 17 дБ для $N = 201$. Эти потери полностью обусловлены возбуждением источником группы высших мод и соответствующими потерями значительной доли

мощности сигнала, “выпадающей” из главного лепестка диаграммы направленности АР, фазированной в направлении на источник. Очевидно, что потери при этом только растут с уменьшением его угловой ширины, т.е. они прямо пропорциональны размерам антенны. Для коррекции величины усиления в подобных случаях необходима оптимизация пространственной обработки сигнала с формированием специальной диаграммы направленности, позволяющей “собрать” все интенсивные моды сигнального поля, другими словами, реализовать согласованную пространственную фильтрацию многомодового сигнала [6, 23]. Видно также, что с ростом расстояния (до ~ 100 км) происходит заметный рост коэффициента усиления, что объясняется затуханием мод высоких номеров и связанным с ним заметным улучшением функции отклика АР. При дальнейшем увеличении расстояния выигрыш АР изменяется слабо при умеренных ветрах, но заметно уменьшается с ростом скорости ветра, т.е. характерное для этих условий значительное ослабление когерентности сигнала (рис. 2б) ожидаемо оказывает преобладающее влияние.

В контексте нашего рассмотрения сделаем еще одно замечание. Наравне с самой величиной коэффициента усиления G , удобной для анализа и интерпретации результатов представляется также дополнительная к ней характеристика – потери усиления [11, 21, 24], которая в явном виде показывает количественное уменьшение выигрыша протяженной антенны в сравнении с некоторым потенциальным уровнем, отвечающим наиболее эффективному (оптимальному) приему сигнала.

В случае пространственно-белого шума эту величину естественно определить как отношение G/N и тем самым рассчитать потери усиления АР как то уменьшение антенного выигрыша, которое связано с любыми отличиями от стандартного для свободного пространства сценария прихода плоской волны с некоторого заданного направления на источник. Именно эта величина хорошо видна на рис. 4, 7 в виде отличия полученных зависимостей от верхней пунктирной прямой. Таким образом, выполненные расчеты показывают, что потери усиления протяженной АР в реальной морской среде определяются совместно детерминированными и статистическими эффектами распространения сигнала, и соотношение вкладов этих двух принципиальных факторов в результирующую величину зависит от целого ряда условий (параметров).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в работе результаты показывают, что корректный учет влияния эффектов дальнего распространения звука в каналах мелкого моря на характеристики горизонтальной АР требует учета всей совокупности факторов, принципиально отличающих такую задачу как от стандартной для антенн в свободном пространстве постановки, так и от той постановки, которая учитывает только детерминированный эффект модовой дискретизации пространственного спектра принимаемого сигнала. К таким факторам относятся (1) эволюция спектра интенсивностей сигнальных мод по трассе, (2) растущие с дистанцией флуктуации волновых фронтов отдельных мод (ослабление поперечной когерентности сигнала) и (3) затухание взаимных межмодовых корреляций (ослабление продольной когерентности). В результате на входе АР формируется некоторая функция пространственных корреляций многомодового сигнала, вид и горизонтальный масштаб которой существенно зависят от целого ряда независимых параметров задачи — глубины источника и его углового положения относительно АР, дистанции, скорости ветра. В свою очередь, эта функция (матрица для дискретной АР) количественно определяет все характеристики антенны как пространственного фильтра сигнала на фоне пространственно-белого шума. Важно при этом, что даже при анализе усредненных по интерференционной структуре характеристик АР (и самой функции когерентности) их зависимость от параметров задачи может обнаруживать неоднозначное влияние статистических эффектов, обусловленных рассеянием звука на ветровом волнении. Этот качественный вывод представляется нам существенным результатом данной работы.

Проведенное численное моделирование для выбранного набора параметров задачи демонстрирует примеры количественного прогноза двух основных характеристик приемной АР — углового отклика и коэффициента усиления. Результаты расчетов дают оценки потерь разрешающей способности и усиления протяженной антенны в зависимости от условий распространения сигнала в мелководном канале при развитом ветровом волнении, которые параметризованы нами расстоянием до источника и скоростью ветра, и от углового положения источника. Показано, в частности, что при ненулевом угле направления на источник отклик сканирующей АР может радикально отличаться от обычного (для свободного пространства) вида диаграммной функции в достаточно большом диапазоне дистанций, причем эти отличия в явном виде зависят от условий возбуждения мод источником и отчетливо проявляются уже на самых малых дистанциях, отвечающих формированию мод дискретного спектра. В то же время статистические эффекты с ростом дистанции постепенно “нормализуют” отклик и приводят его к ожидаемому виду диаграммы направленности с выраженным главным максимумом, по крайней мере при не слишком сильных ветрах. Потери усиления АР, которые “отслеживают” искажения ее углового отклика, при этом могут меняться в широких пределах, также обнаруживая существенно неравномерную зависимость от расстояния. Отмеченные особенности необходимо учитывать при оценке потенциальных возможностей протяженных горизонтальных антенн в каналах мелкого моря.

Круг практически важных вопросов, касающихся применения более сложных методов пространственной обработки в случаях, когда принимаемый сигнал испытывает столь существенные отличия от стандартной (для фазированной АР) модели плоской волны, и, кроме того, когда на входе АР может присутствовать интенсивная помеха дискретного пространственного (модового) спектра, в данной статье не затрагивался и будет рассмотрен нами в дальнейшем.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ по гранту № 16-02-00929.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Елисеевский В.А.* О работе горизонтальной линейной антенны в водном слое // Акуст. журн. 1979. Т. 25. № 2. С. 227–233.
2. *Елисеевский В.А.* О работе горизонтальной линейной антенны в мелком море // Акуст. журн. 1983. Т. 29. № 1. С. 44–49.
3. *Елисеевский В.А.* Отклик низкочастотной горизонтальной линейной антенны в свободном пространстве и волноводе // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 6. С. 805–807.

4. *Елисевиши В.А.* Усредненный отклик горизонтальной линейной антенны в мелком море // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 2. С. 193–197.
5. *Галаненко В.Б., Гринченко В.Т., Трофименко А.П., Ярмолович А.М.* О горизонтальной направленности антенны в многомодовом волноводе // Акуст. журн. 1984. Т. 30. № 2. С. 177–182.
6. *Карновский А.М., Красный Л.Г.* Направленные свойства трактов пространственной обработки сигналов в волноводах // Акуст. журн. 1984. Т. 30. № 2. С. 224–229.
7. *Бурдуковская В.Г., Петухов Ю.В., Хилько А.И.* Работа линейной и кольцевой горизонтальных антенн в мелком море // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 6. С. 729–735.
8. *Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г.* Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997.
9. *Кряжев Ф.И., Кудряшов В.М.* Антенна в волноводе со статистической шероховатой границей // Акуст. журн. 1984. Т. 30. № 6. С. 790–796.
10. *Сазонтов А.Г., Фарфель В.А.* О работе горизонтальной дискретной антенны в случайно-неоднородном океане // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 1. С. 130–136.
11. *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.
12. *Gorodetskaya E.Yu., Malekhanov A.I., Sazontov A.G., Vdovicheva N.K.* Coherence effects on array beamforming in shallow water // Proc. Fifth European Conf. on Underwater Acoustics: ECUA 2000 (Lyon, France, 2000). P. 1031–1036.
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. *Нечаев А.Г.* Затухание интерференционной структуры акустического поля в океане со случайными неоднородностями // Акуст. журн. 1987. Т. 33. № 3. С. 535–538.
15. *Горская Н.С., Раевский М.А.* О многократном рассеянии низкочастотных акустических волн на поверхностном волнении // Акуст. журн. 1986. Т. 32. № 2. С. 165–171.
16. *Cox H.* Spatial correlation in arbitrary noise fields with application to ambient sea noise // J. Acoust. Soc. Am. 1973. V. 54. № 5. P. 1289–1301.
17. *Hamson R.M.* The theoretical responses of vertical and horizontal line arrays to wind-induced noise in shallow water // J. Acoust. Soc. Am. 1985. V. 78. № 5. P. 1702–1712.
18. *Горская Н.С., Раевский М.А.* О связи статистических характеристик зондирующих акустических волн с параметрами ветрового волнения // Акуст. журн. 1987. Т. 33. № 3. С. 463–468.
19. *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.
20. *Шифрин Я.С.* Вопросы статистической теории антенн. М.: Советское радио, 1970.
21. *Городецкая Е.Ю., Малеханов А.И., Таланов В.И.* Моделирование оптимальной пространственной обработки сигналов в подводных звуковых каналах // Акуст. журн. 1992. Т. 38. № 6. С. 1044–1051.
22. *Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А.* Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 256 с.
23. *Yang T.C., Yates E.* Matched-beam processing: Application to a horizontal line array in shallow water // J. Acoust. Soc. Am. 1998. V. 104. № 3. Pt. 1. P. 1316–1330.
24. *Лаваль Р., Лабаск И.* Влияние неоднородностей и нестабильности среды на пространственную и временную обработку сигналов. В кн: Подводная акустика и обработка сигналов. Пер. с англ. под ред. Бьёрно Л.М.: Мир, 1986. С. 43–68.