



DOI 10.59887/2073-6673.2025.18(2)-6
EDN IUMPCF

УДК 551.463

© М. А. Раевский, В. Г. Бурдуковская*, 2025

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46
*bvg@ipfran.ru

О повышении эффективности пространственной обработки тональных акустических сигналов в океанических волноводах с ветровым волнением

Статья поступила в редакцию 21.04.2025, после доработки 03.06.2025, принята в печать 20.06.2025

Аннотация

Исследуется возможность повышения эффективности пространственной обработки тональных сигналов в акустических волноводах со взволнованной поверхностью. Показано, что предварительная частотная фильтрация сигнала в узкой полосе в сочетании с известными алгоритмами пространственной обработки позволяет значительно увеличить коэффициент усиления горизонтальной антенной решетки. Основной идеей предлагаемой пространственно-временной обработки сигналов является подавление некогерентной компоненты акустического поля при частотной фильтрации сигнала. Предложен алгоритм расчета корреляционной матрицы сигнала на основе уравнения переноса для пространственно-временных функций когерентности комплексных амплитуд акустических мод. Получены результаты численного моделирования коэффициентов усиления при различных алгоритмах обработки сигнала в звуковом канале с гидрологией зимнего типа. Проанализированы зависимости коэффициентов усиления от дистанции, скорости ветра, параметров дна, модели шума и ориентации антенной решетки. Основное внимание уделяется сравнению результатов с частотной фильтрацией и без нее.

Ключевые слова: акустический волновод, ветровое волнение, антенна, когерентность, частотная фильтрация, коэффициент усиления

© М. А. Раевский, В. Г. Бурдуковская*, 2025

A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS, 46 Ulyanova Str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia
*bvg@ipfran.ru

On Improving the Efficiency of Spatial Processing of Tonal Acoustic Signals in Oceanic Waveguides with Wind Waves

Received 21.04.2025, Revised 03.06.2025, Accepted 20.06.2025

Abstract

The possibility of increasing the efficiency of spatial processing of tonal signals in acoustic waveguides with wind waves is investigated. It is shown that preliminary frequency filtering of the signal in a narrow band in combination with known spatial processing algorithms allows to significantly increase the gain of the horizontal antenna array (AA). The main idea of the proposed spatio-temporal signal processing is to suppress the incoherent component of the acoustic field during frequency filtering of the signal. An algorithm for calculating the correlation matrix of the signal based on the transfer equation for the spatio-temporal coherence functions of complex amplitudes of acoustic modes is proposed. The results of numerical modeling of the gain factors

Для цитирования: Раевский М.А., Бурдуковская В.Г. О повышении эффективности пространственной обработки тональных акустических сигналов в океанических волноводах с ветровым волнением // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 2. С. 83–95. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(2\)-6](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(2)-6) EDN IUMPCF

For citation: Raevskii M.A., Burdukovskaya V.G. On Improving the Efficiency of Spatial Processing of Tonal Acoustic Signals in Oceanic Waveguides with Wind Waves. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(2):83–95.
[https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(2\)-6](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(2)-6)

for various signal processing algorithms in a sound channel with winter-type hydrology are obtained. The dependences of the gain factors on the distance, wind speed, bottom parameters, noise model and AA orientation are analyzed. The main attention is paid to comparing the results with and without frequency filtering.

Keywords: acoustic waveguide, wind waves, antenna, coherence, frequency filtering, gain

1. Введение

При исследовании эффективности методов пространственной обработки акустических сигналов в мелком море необходимо учитывать два основных физических фактора. Первый заключается в многомодовом характере распространения сигнала в звуковом канале. Второй — в его флуктуациях, обусловленных ветровым волнением, случайными внутренними волнами, нерегулярным профилем дна и другими случайными изменениями среды распространения. Влияние многомодовой структуры акустического поля в волноводе на характеристики горизонтальной антенны исследовано достаточно подробно (смотри, например, [1, 2]). Изучение влияния флуктуаций среды на коэффициент усиления и направленность горизонтальных антенных решеток (АР) представляется более сложной задачей, в основном, из-за разнообразия океанических процессов, определяющих когерентность сигнала и недостаточной разработкой их статистических моделей. Наиболее исследованным процессом, вызывающим флуктуации сигнала в звуковых каналах мелкого моря, является ветровое волнение. При этом ветровое волнение является главным физическим фактором, воздействующим на энергетические и корреляционные характеристики сигналов в акустических волноводах с зимней либо межсезонной гидрологией (открытых к поверхности). Именно поэтому в большинстве работ, где исследуются статистические характеристики протяженных горизонтальных АР в мелком море, рассматривается влияние ветрового волнения [3–13]. Вследствие этого достаточно подробно изучено воздействие ветровых волн на коэффициент усиления и диаграмму направленности горизонтальных АР, зависимость этих эффектов от дистанции, скорости ветра, акустических параметров дна, частоты излучения и т. д. Проанализированы также возможности оптимальных методов пространственной обработки частично когерентных сигналов, влияние на эти результаты межмодовых корреляций и статистических моделей океанического шума. При этом следует заметить, что все эти исследования ограничивались тональными сигналами и методами их пространственной обработки. Вместе с тем можно ожидать, что более общие алгоритмы пространственно-временной обработки акустических сигналов могут в ряде случаев оказаться более перспективными. Здесь мы хотим продемонстрировать одну из таких возможностей, а именно комбинацию частотной фильтрации сигнала с последующей пространственной его обработкой на апертуре горизонтальной АР. Основной идеей при этом является отфильтровывание флуктуационной компоненты сигнала, что повышает его когерентность и тем самым эффективность алгоритмов пространственной обработки.

2. Модель сигнала

Рассмотрим акустическое поле в волноводе, генерируемое тональным точечным источником с частотой f_0 . Волновод предполагается плоскостойким с профилем скорости звука $c(z)$ и произвольным плоскостойким дном. Для прикладных задач акустики мелкого моря наибольший интерес представляет низкочастотный диапазон $f \leq 300$ Гц, где затухание звука относительно мало и возможно распространение акустических волн на расстояние порядка десятков и сотен километров. При этом для описания акустического поля удобно использовать модовое представление. С учетом асимптотики функции Ханкеля при больших значениях аргумента, поле давления в дальней зоне представим в виде:

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

где $\varphi_p(z)$ ортонормированные собственные функции мод, a_p — амплитуды мод, k_p — их волновые числа, r — расстояние от источника до точки наблюдения. В отсутствии ветрового волнения коэффициенты разложения a_p , с точностью до сомножителя, определяемого уровнем излучения, имеют вид $a_p = \varphi_p(z_0)$. С учетом ветрового волнения, когда свободная поверхность становится случайной функцией горизонтальных координат и времени, коэффициенты a_p также становятся случайными величинами и описываются функциями когерентности $\langle a_p(\vec{r}_1, t) a_q^*(\vec{r}_2, t) \rangle$. При этом функция когерентности полного поля на глубине z имеет вид

$$\langle p(r_1, z, t_1) p^*(r_2, z, t_2) \rangle = \sum_{p, q} \langle a_p(r_1, t_1) a_q^*(r_2, t_2) \rangle \frac{\varphi_p(z) \varphi_q^*(z)}{\sqrt{k_p k_q r_1 r_2}} \exp \left[i (k_p r_1 - k_q r_2) \right]. \quad (2)$$

Эти корреляторы поля обладают сильной изменчивостью вдоль акустической трассы и плохо предсказуемы на больших удалениях от источника, поэтому для практических приложений больший интерес представляют корреляционные характеристики поля, «сглаженные» по интерференционной структуре и плавно меняющиеся с расстоянием. В связи с этим ограничимся рассмотрением функций корреляции акустического поля, усредненных по интерференционной структуре, то есть на пространственном масштабе $L_{\text{инт}} = 2\pi/\min|k_p - k_q|$ [14]. Для описания таких функций когерентности достаточно анализировать автокорреляционные функции мод:

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

где ρ — поперечное разнесение точек наблюдения, а ось x соединяет источник и центр горизонтальной антенной решетки (АР). В формуле (2) при этом остаются лишь слагаемые с $q = p$. Волнение предполагается статистически однородным и стационарным, поэтому N_p не зависит от t .

Для расчета корреляционных функций в волноводе с нерегулярной границей будем использовать уравнение переноса [15], к $N_p(\rho, \tau, x)$, которое в случае ненаправленного (в горизонтальной плоскости) источника и изотропного волнения имеет вид:

$$\frac{\partial N_p(\rho, \tau, x)}{\partial x} = \sum_q W_{pq}(\rho, \tau, x) N_q(\rho, \tau, x) - 2(\gamma_p + |\text{Im} k_p|) N_p(\rho, \tau, x) = 0. \quad (4)$$

Здесь W_{pq} — вероятность перехода, описывающая взаимодействие, вследствие рассеяния, корреляционных функций мод дискретного спектра, γ_p — декремент затухания модовой компоненты $\langle a_p \rangle$ когерентного поля, $\text{Im} k_p$ — мнимая часть волнового числа k_p , обусловленная потерями в дне. Уравнение (4) получено при малых значениях параметра Релея, то есть предполагает малость эффектов однократного рассеяния [16]. При этом оно позволяет описывать эффекты многократного рассеяния, приводящие к существенной декорреляции сигнала. Оценки показывают, что при скорости ветра $V \leq 15$ м/с и частотах $f \leq 300$ параметр Релея мал в сравнении с единицей. Функции W_{mn} и γ_n выражаются через частотный спектр изотропного ветрового волнения:

$$\gamma_n = \frac{g^2}{8\pi k_n} \left(\frac{d\phi_n}{dz} \right)^2 \int_0^{k_0} \eta \sqrt{k_0^2 - \eta^2} d\eta \int_{-\pi}^{\pi} B(\Omega) \Omega^{-3} d\phi, \quad (5)$$

$$\Omega = \sqrt{g} \left[(k_n - \eta \cos \phi)^2 + \eta^2 \sin^2 \phi \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (6)$$

$$W_{mn}(\rho, \tau, x) = \frac{g^2}{8k_n k_m} \left(\frac{d\phi_m}{dz} \right)^2 \left(\frac{d\phi_n}{dz} \right)^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{B(\tilde{\omega})}{\tilde{\omega}^3} \cos\left(k_y \frac{x}{R} \rho\right) \cos(\tilde{\omega} \tau) dk_y, \quad (7)$$

$$\tilde{\omega} = \sqrt{g} \left(k_y^2 + (k_m - k_n)^2 \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (8)$$

где g — ускорение свободного падения, $k_0 = \omega_0/c(0)$, $d\phi_n/dz$ — производная собственной функции при $z = 0$. Отметим, что приведенное выражение для γ_n учитывает рассеяние данной моды не только во все моды дискретного спектра, но и в моды сплошного спектра, то есть излучение ее из волновода (см. [15]). Для частотного спектра развитого волнения при численном моделировании будет использоваться спектр JONSWAP [17], который описывает наблюдаемое в натурных экспериментах превышение спектральной плотности энергии вблизи частотного максимума в сравнении со спектром Пирсона-Московитца:

$$S(\Omega) = \beta g^2 \Omega^{-5} \exp \left[-1,25 \left(\frac{\Omega_m}{\Omega} \right)^4 \right] \gamma^{\exp \left[-(\Omega - \Omega_m)^2 / 2\sigma^2 \Omega_m^2 \right]}, \quad (9)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{при } \Omega \leq \Omega_m \\ 0,09 & \text{при } \Omega > \Omega_m \end{cases},$$

где $\Omega_m = 0,8g/V$ — частота спектрального максимума (V — скорость ветра). Эмпирические константы β и γ имеют средние значения $\beta = 8 \times 10^{-3}$, $\gamma = 3,3$. Важно также отметить, что эмпирические константы, приведенные в спектре (9), предполагают статистическую однородность ветрового волнения, то есть рассмотрение для открытой акватории.

3. Частотная фильтрация и пространственная когерентность сигнала

Решение уравнения переноса (4) с начальным условием $N_p(\rho, \tau, x=0) = \varphi_p^2(z)$ позволяет прогнозировать пространственно-временную когерентность поля тонального источника в зависимости от уровня ветрового волнения и регулярных параметров океанического волновода. В случае статистических характеристик сигнала, сглаженных по интерференционной структуре, для коэффициента корреляции поля на глубине z имеем выражение:

$$K(\rho, \tau, z, R) = \frac{\sum_p k_p^{-1} \varphi_p^2(z) N_p(\rho, \tau, R)}{\sum_p k_p^{-1} \varphi_p^2(z) N_p(0, 0, R)}, \quad (10)$$

где R — расстояние от источника.

Далее мы будем рассматривать результаты численного моделирования когерентности сигнала и коэффициента усиления АР для мелководного звукового канала с положительным градиентом скорости звука $c(z)$, типичным для зимней гидрологии и глубиной $H = 100$ м. Профиль $c(z)$ линейный: $c(0) = 1490$ м/с, $c(H) = 1500$ м/с. Для модели дна используется жидкое полупространство с плотностью $\rho = 2$ г/см³, коэффициентом затухания $\delta = 0,1$ дБ/(км×Гц) и скоростью звука в грунте $c_1 = 1600 \div 1800$ м/с, характерной для неконсолидированных осадков [18]. В качестве примера, на Рис. 1 приведены результаты расчета коэффициента корреляции $K(\rho, \tau, z, R)$ на расстоянии $R = 100$ км от источника и на глубине $z = 197$ м. Частота излучения $f_0 = 250$ Гц, скорость ветра $V = 10$ м/с.

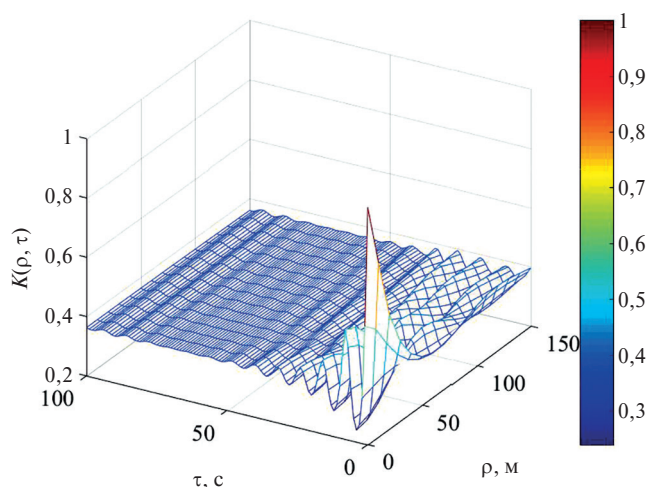


Рис. 1. Пространственно-временной коэффициент корреляции сигнала

Fig. 1. Spatio-temporal correlation coefficient of the signal

Ранее было показано [7], что при распространении акустических сигналов в мелководных звуковых каналах, открытых к поверхности, ветровое волнение может приводить к значительной пространственной декорреляции сигнала, что существенно уменьшает коэффициент усиления приемных АР. Использование оптимальных алгоритмов пространственной обработки сигнала повышает эффективность АР, но при сильном ветровом волнении $V > 15$ м/с влияние его на коэффициент усиления АР остается значительным [8–11].

Наша цель — продемонстрировать, что использование пространственно-временной обработки сигнала позволяет дополнительно повысить эффективность горизонтальной АР в океанических волноводах со взволнованной поверхностью. Предварительно приведем некоторые качественные соображения. Эффекты многократного рассеяния на ветровом волнении приводят к частичной декорреляции сигнала. При этом акустическое поле в волноводе является суммой когерентной компоненты и рассеянной компоненты. Несмотря на сложную модовую структуру поля, применение оптимальных линейных алгоритмов обработки позволяет получить для коэффициента усиления АР максимальное значение, равное числу ее элементов, если рассеянная компонента отсутствует. Именно наличие рассеянной компоненты поля приводит к значительному снижению коэффициента усиления АР с размером апертуры,

превышающим масштаб корреляции рассеянной компоненты. Вместе с тем при рассеянии на нестационарной взволнованной поверхности частота акустической моды (либо плоской волны) испытывает доплеровское смещение, которое определяется известными условиями резонансного рассеяния Брэгга. При многократном рассеянии формируется частотный спектр сигнала, причем именно его рассеянной компонентой, поскольку когерентная компонента смещения частоты не испытывает [16]. В принципе, возможно смещение частоты когерентной компоненты сигнала при движении источника, либо из-за океанических течений, но здесь эти вопросы не обсуждаются. На рис. 2 приведены результаты численного моделирования частотного спектра сигнала на различном удалении R от источника и двух значений скорости ветра. Частотный спектр рассчитывался путем Фурье преобразования временного коэффициента корреляции $K(\rho = 1, t)$, который, в свою очередь, вычислялся на основании уравнения переноса (4). При этом частота отсчитывается относительно частоты излучения ω_0 и центральный максимум спектра определяется когерентной компонентой. Наряду с боковиками, которые соответствуют максимуму спектра частотного волнения $\omega_m = 0,9g/V$, на приведенных рисунках просматривается широкий частотный пьедестал, сформированный при многократном рассеянии акустических мод на нестационарном ветровом волнении. При умеренном ветре $V = 10$ м/с он проявляется лишь на большом удалении $R = 300$ км, но при сильном ветре $V = 15$ м/с заметен и на расстоянии $R = 50$ км. На основании этих и аналогичных им результатов численного моделирования можно сделать вывод, что фильтрация сигнала в узкой полосе вблизи ω_0 может существенно снизить уровень рассеянной компоненты и тем самым повысить его пространственную когерентность. При выборе ширины частотного фильтра надо учитывать, что когерентная компонента в океаническом волноводе испытывает также медленные флуктуации из-за крупномасштабных океанических процессов (в основном внутренних волн), что приводит к уширению ее спектра [18].

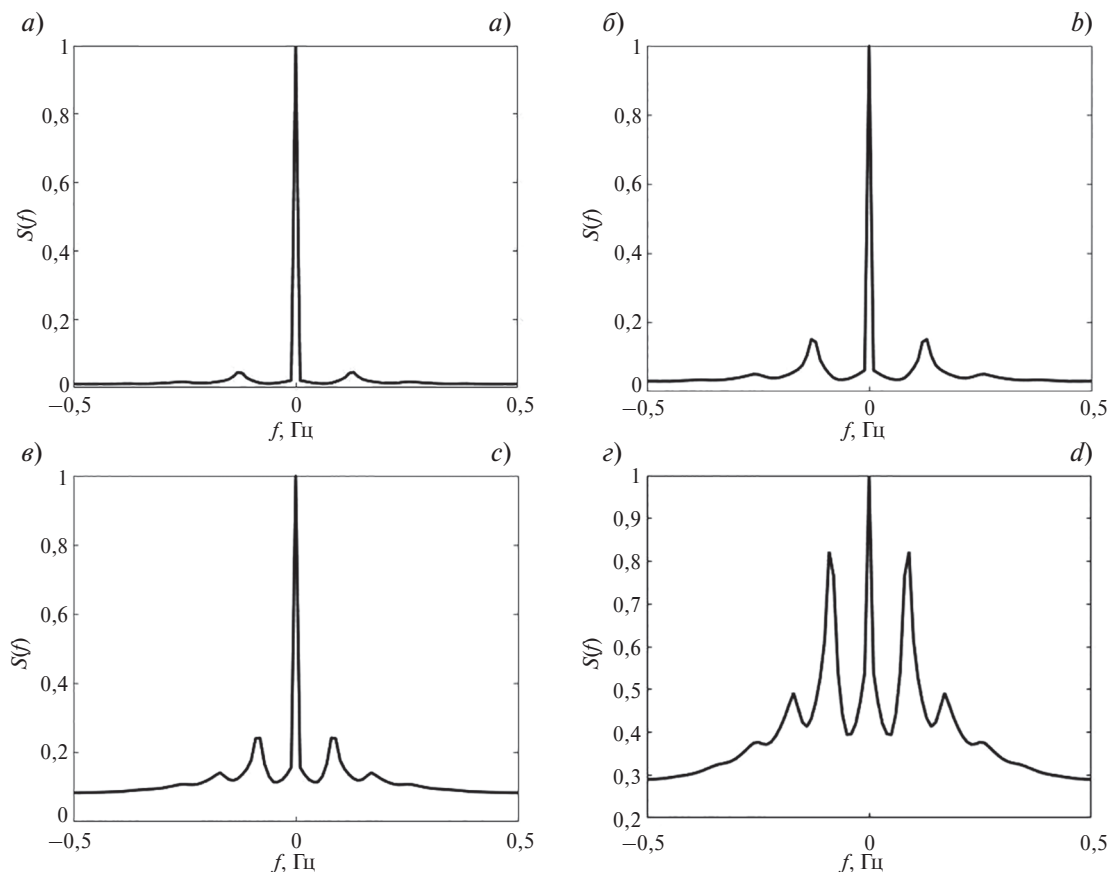


Рис. 2. Частотный спектр сигнала на расстоянии от источника $R = 50$ км (а, в) и 300 км (б, г). Скорость ветра $V = 10$ м/с (а, б) и $V = 15$ м/с (в, г)

Fig. 2. Frequency spectrum of the signal at a distance from the source $R = 50$ km (a, c) and 300 km (b, d). Wind speed $V = 10$ m/s (a, b) and $V = 15$ m/s (c, d)

Поскольку эти процессы имеют характерные периоды — $10^3 \div 10^5$ с, уширение центрального максимума обычно не превышает нескольких миллигерц. Таким образом оптимальной представляется ширина частотного фильтра $\Delta F = 10$ мГц. Естественно, такая узкополосная фильтрация накладывает определенные ограничения на длину временных выборок принимаемого сигнала. При ширине фильтра 10 мГц их длина должна быть порядка 10^2 с. Вместо использования Фурье преобразования и непосредственного умножения частотного спектра сигнала на частотный коэффициент передачи фильтра $\Phi(f)$ при моделировании удобно использовать эквивалентную операцию свертки сигнала с импульсной функцией фильтра $\Phi(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(f) \exp(2\pi i f \tau) df$. В итоге, если мы комбинируем предварительную частотную фильтрацию сигнала с методами его пространственной обработки вместо функций пространственной корреляции мод $N_p(\rho, \tau = 0)$ следует использовать:

$$\tilde{N}_p(\rho) = \int_0^{\infty} N_p(\rho, \tau) \Phi(\tau) d\tau. \quad (11)$$

На рис. 3 приведены результаты численного моделирования коэффициента поперечной корреляции акустического поля в тех же условиях распространения (канал с линейным профилем) для сигнала без предварительной фильтрации и сигнала, профильтрованного в полосе $\Delta F = 5$ мГц и 10 мГц.

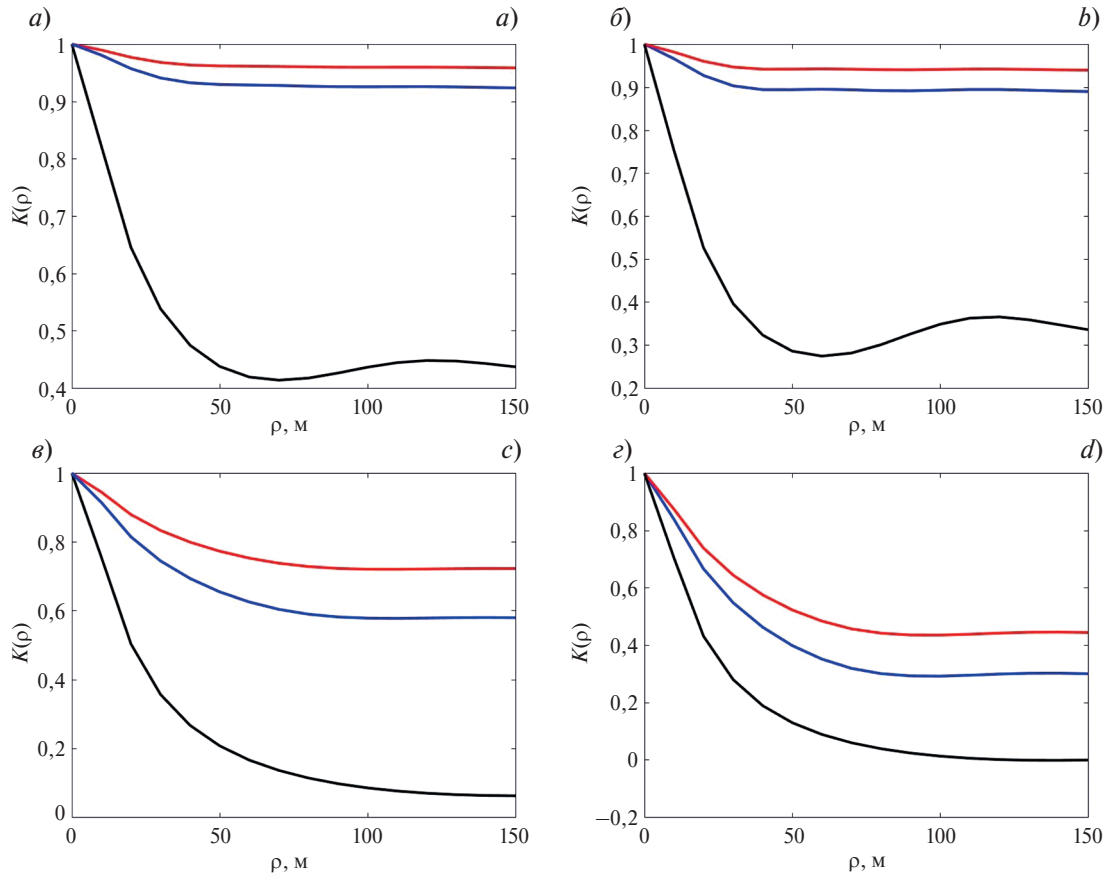


Рис. 3. Коэффициент пространственной корреляции сигнала на расстоянии от источника $R = 50$ км (*a*, *в*) и $R = 150$ км (*б*, *г*). Скорость ветра $V = 10$ м/с (*a*, *б*) и $V = 15$ м/с (*в*, *г*). Черные кривые соответствуют результатам без частотной фильтрации, красные кривые — фильтрация в полосе $\Delta F = 5$ мГц, синие — в полосе $\Delta F = 10$ мГц

Fig. 3. The spatial correlation coefficient of the signal at a distance of $R = 50$ km from the source (*a*, *c*) and $R = 150$ km (*b*, *d*). The wind speed is $V = 10$ m/s (*a*, *b*) and $V = 15$ m/s (*c*, *d*). The black curves correspond to the results without frequency filtering, the red curves correspond to filtering in the $\Delta F = 5$ mHz band, and the blue curves correspond to filtering in the $\Delta F = 10$ mHz band

Из результатов моделирования видно, что частотная фильтрация сигнала, действительно, значительно повышает его пространственную когерентность. При умеренном волнении ($V = 10$ м/с) сигнал практически когерентен после частотной фильтрации, в то время как без фильтрации уровень остаточной корреляции уменьшается до 0,2 при $R = 150$ км. В случае $V = 15$ м/с остаточные корреляции спадают до нуля уже при $R = 50$ км, а после фильтрации уровень остаточной корреляции (именно он определяется когерентной компонентной поля) остается достаточно высоким (0,7 при $R = 50$ км и 0,4 при $R = 150$ км).

4. Коэффициент усиления горизонтальной АР

Рассмотрим коэффициент усиления горизонтальной АР, находящейся на глубине z_A и ориентированной под углом к направлению на источник. Антенна эквидистантная с числом элементов M и межэлементным расстоянием $d = 1/2$. Корреляционная матрица сигнала на элементах АР имеет вид:

$$N_{mn}(R) = \sum_p (k_p R)^{-1} \varphi_p^2(z_A) N_p(\rho = d|m-n|\cos\varphi_A, R) \exp[ik_p d(m-n)\sin\varphi_A]. \quad (12)$$

Здесь пренебрегается кривизной фазовых фронтов, что справедливо для расстояний $R \gg kL^2/8\pi$ (L — длина антенны). При этом, для сравнения, будут использоваться либо значения $N_p(\rho, R) \equiv N_p(\rho, \tau = 0, R)$ (случай без частотной фильтрации сигнала), либо $\tilde{N}_p(\rho)$, вычисляемые по формуле (11). Для коэффициента усиления АР на фоне океанического шума с корреляционной матрицей R_{mn} будут вычисляться значения, соответствующие методу ФАР (G_0), методу оптимальной линейной обработки сигнала (G_1) и методу оптимальной квадратичной обработки (G_2). Значения G_i будут вычисляться по известным формулам [19, 20]:

$$G_0 = \frac{\sum_{mn} N_{mn} \exp[-ik_0 d(m-n)\sin\varphi_A] \sum_n R_{nn}}{\sum_{mn} R_{mn} \exp[-ik_0 d(m-n)\sin\varphi_A] \sum_n N_{nn}}, \quad (13)$$

$$G_1 = \lambda_1 \frac{\sum_n R_{nn}}{\sum_n N_{nn}}, \quad (14)$$

$$G_2 = \frac{\left[\sum_i \lambda_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \sum_n R_{nn}}{\sum_n N_{nn}}, \quad (15)$$

где λ_i — собственные значения матрицы $\mathbf{S} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{N}$, λ_1 — максимальное из них. Расчеты приведены для модели пространственно белого шума (в этом случае $\mathbf{R} = \mathbf{E}$) и модели динамического шума ветрового происхождения [21]. В этом случае матрица шума $\mathbf{R}$ вычисляется по методике, изложенной в работе [11].

На рис. 4 приведены результаты численного моделирования коэффициентов усиления G_0 , G_1 и G_2 без частотной фильтрации и с предварительной частотной фильтрацией в полосе $\Delta F = 10$ МГц при скорости ветра $V = 10$ м/с.

При расчетах использовалась модель пространственно белого шума, скорость звука в дне $c_b = 1800$ м/с. Глубина расположения антенны $z_A = 97$ м. Как и следовало ожидать, частотная фильтрация сигнала существенно повысила эффективность пространственной обработки сигнала. Для антенны, ориентированной перпендикулярно к направлению на источник, коэффициенты G_0 и G_1 уменьшаются с дистанцией на 5 дБ (Напомним, что при $M = 51$ значение $10 \lg M = 17$ дБ), а G_2 — на 4 дБ. При пространственной обработке сигнала с частотной фильтрацией коэффициенты G_i меняются в узком диапазоне 16,7–17 дБ, то есть практически равны предельному значению $10 \times \lg M$, соответствующему коэффициенту усиления когерентного сигнала на фоне некогерентного шума. Для антенны, ориентированной под углом $\varphi_A = 30^\circ$ ситуация аналогична. После фильтрации коэффициенты усиления G_i меняются в диапазоне 16,5–17 дБ. Исключение составляют дистанции $5 \text{ км} < R < 20 \text{ км}$, где метод ФАР проигрывает оптимальным методам, поскольку фазовая компенсация со средним волновым числом k_0 в формуле (13) не учитывает модовой структуры сигнала [8]. Аналогичные расчеты в случае сильного ветрового волнения (смотри рис. 5) также демонстрируют увеличение эффективности пространственной обработки сигнала на апертуре АР при его предварительной частотной фильтрации. Без нее коэффициенты G_0 и G_1 уменьшаются с дистанцией на 6 дБ, а коэффициент

G_2 , соответствующий квадратичной обработке, на 4 дБ. После частотной фильтрации значения G_i увеличиваются. Это особенно заметно на удалении от источника $20 \text{ км} < R < 100 \text{ км}$, где увеличение составляет порядка 3÷4 дБ при всех методах пространственной обработки. Важно также отметить, что после частотной фильтрации результаты расчетов для метода ФАР и оптимальных методов различаются незначительно. В частности, выигрыш квадратичной обработки G_2 / G_1 уменьшается от 2 дБ до 0,5 дБ, что является следствием увеличения когерентности сигнала после его фильтрации.

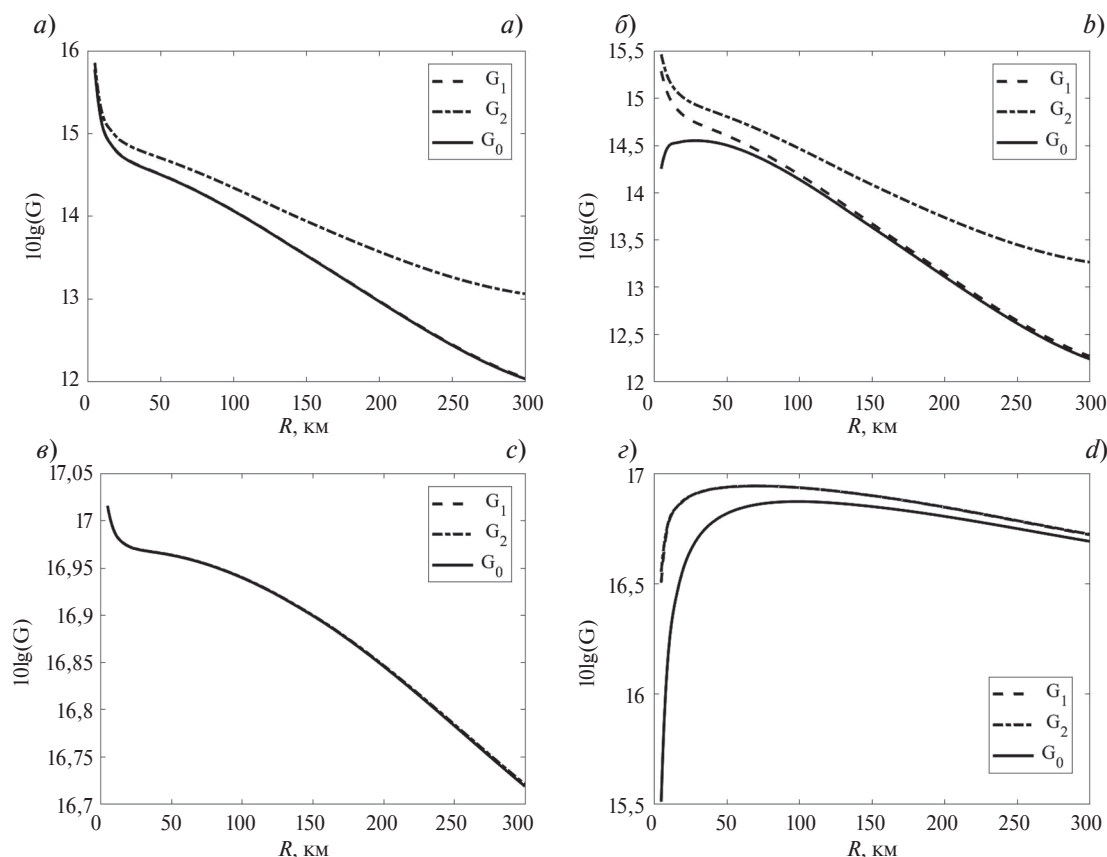


Рис. 4. Коэффициенты усиления горизонтальной АР при разных способах пространственной обработки: без частотной фильтрации (а, б) и с фильтрацией в полосе $\Delta F = 10 \text{ мГц}$ (в, г), ориентация антенны перпендикулярно к источнику (а, в) и под углом $\varphi_A = 30^\circ$ (б, г). Скорость ветра $V = 10 \text{ м/с}$

Fig. 4. Gain coefficients of horizontal AA at different methods of spatial processing: without frequency filtering (а, б) and with filtering in the band $\Delta F = 10 \text{ мГц}$ (в, г), antenna orientation perpendicular to the source (а, в) and at the angle $\varphi_A = 30^\circ$ (б, г). Wind speed $V = 10 \text{ м/с}$

Рассматриваемые эффекты зависят и от характеристик донного грунта. Для иллюстрации на Рис. 6 приведены результаты аналогичных расчетов при скорости звука в дне $c_l = 1600 \text{ м/с}$ и сильном волнении. Видно, что результаты моделирования без фильтрации приводят к большим значениям коэффициентов G_i , что объясняется менее значимыми эффектами рассеяния (чем в случае $c_l = 1800 \text{ м/с}$) для мод с высокими номерами. Соответственно, выигрыш квадратичной обработки G_2 / G_1 также уменьшается и не превышает децибела. Результаты для коэффициентов усиления G_i после частотной фильтрации, в сравнении со случаем $c_l = 1800 \text{ м/с}$, увеличиваются на 1÷1,5 дБ (в зависимости от дистанции R).

Аналогичные результаты численных расчетов коэффициентов усиления АР были получены для частотной фильтрации с увеличенной вдвое полосой $\Delta F = 20 \text{ мГц}$. В случае умеренного ветрового волнения результаты этих расчетов отличаются от результатов моделирования при $\Delta F = 10 \text{ мГц}$ незначительно (десятые доли децибела). При сильном волнении ($V = 15 \text{ м/с}$) коэффициенты усиления G_i уменьшаются более заметно, но и в этом случае отличие данных численных расчетов для $\Delta F = 20 \text{ мГц}$ и $\Delta F = 10 \text{ мГц}$ менее одного децибела. Это объясняется тем, что основная часть рассеянной компоненты сигнала соответствует доплеровским сдвигам частоты, превышающим 10 мГц , и изменение ширины фильтра в диапазоне $\Delta F < 20 \text{ мГц}$ не приводит к качественным отличиям при пространственной обработке. Приведенные выше результаты соответ-

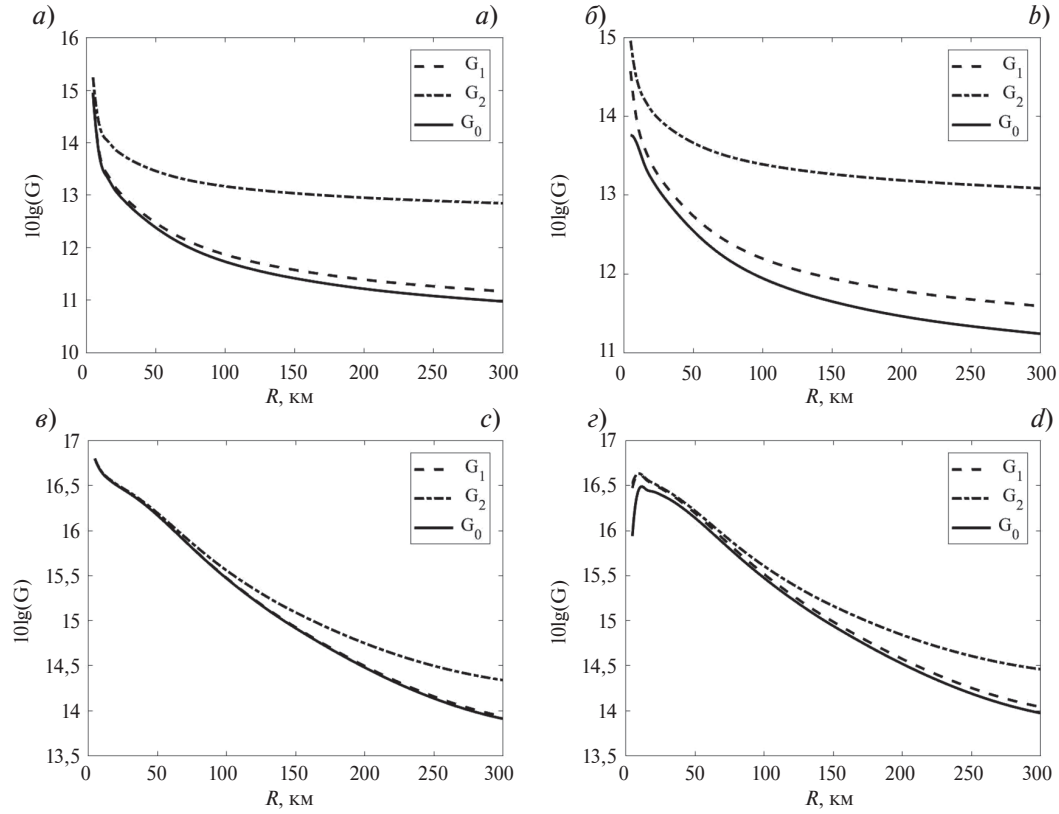


Рис. 5. То же самое, что на рис. 4 при скорости ветра $V = 15$ м/с

Fig. 5. The same as in Fig. 4, with a wind speed of $V = 15$ m/s

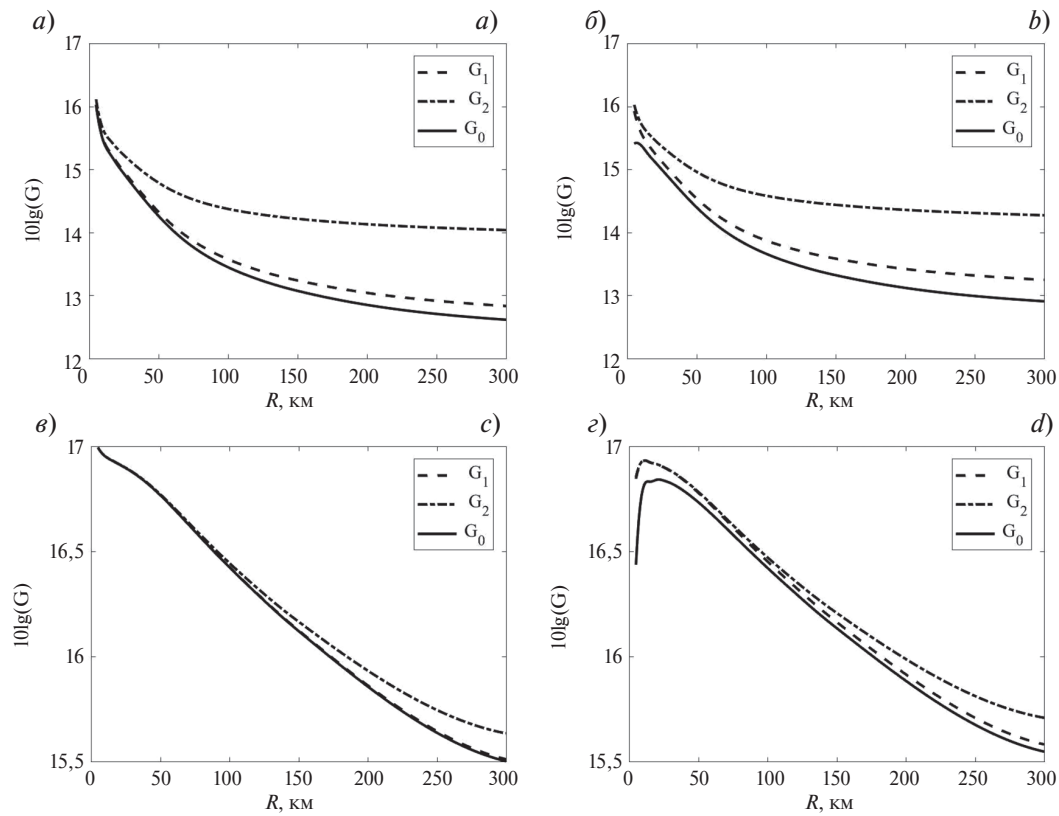


Рис. 6. То же самое, что на Рис. 5 при скорости звука в дне $c_l = 1600$ м/с

Fig. 6. The same as in Fig. 5, with the sound speed at the bottom $c_l = 1600$ m/s

ствуют пространственно белому шуму, некоррелированному на элементах АР. Наряду с этой традиционной моделью шума используются и более сложные модели, которые учитывают характер его генерации и условия распространения шумового поля в волноводе. Здесь мы приведем результаты моделирования коэффициентов усиления антенны на фоне динамического шума, то есть шума, генерируемого ветровыми дипольными источниками, расположенными вблизи поверхности. В регулярном волноводе такая модель предложена в работе [21]. В волноводе со взволнованной поверхностью аналогичные результаты приведены в работах [11], где корреляционная матрица шума рассчитывается на основании уравнения переноса для интенсивности мод с шумовыми дипольными источниками. На рис. 7 приведены результаты расчетов коэффициентов усиления G_i с частотной фильтрацией сигнала в полосе $\Delta F = 10$ мГц и без его фильтрации на фоне динамического шума с корреляционной матрицей $\mathbf{R}$, рассчитанной по методике, предложенной в [11].

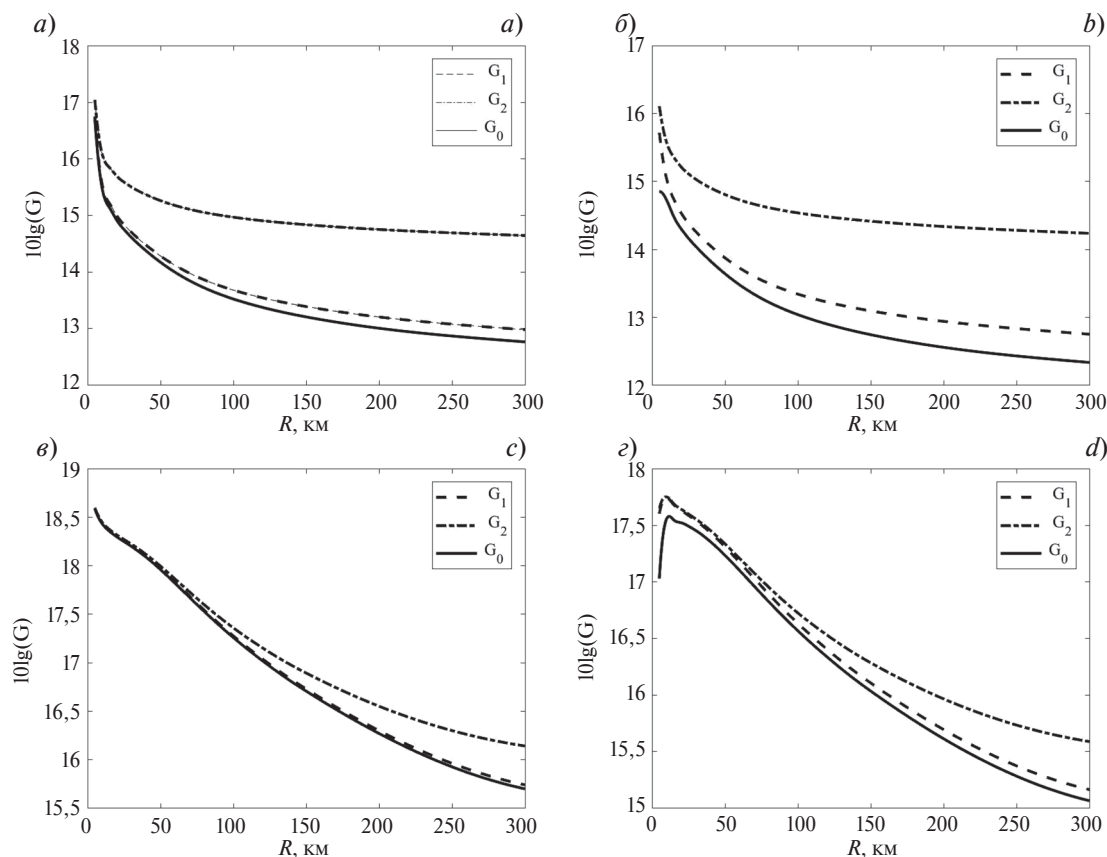


Рис. 7. Коэффициент усиления антенны на фоне динамического шума без частотной фильтрации (а, б) и с фильтрацией в полосе $\Delta F = 10$ мГц (в, г); $\varphi_A = 0$ (а, в) и $\varphi_A = 30^\circ$ (б, г). Скорость ветра $V = 15$ м/с, скорость звука в дне $c_f = 1800$ м/с

Fig. 7. Antenna gain against dynamic noise background without frequency filtering (a, b) and with filtering in the band $\Delta F = 10$ mHz (c, d); $\varphi_A = 0$ (a, c) and $\varphi_A = 30^\circ$ (b, d). Wind speed $V = 15$ m/s, sound speed in the bottom $c_f = 1800$ m/s

При этом были выбраны параметры $V = 15$ м/с и $c_f = 1800$ м/с. Матрица шума вычисляется на частоте сигнала. Поскольку дипольные источники шума и коэффициенты уравнения переноса (4) плавно зависят от частоты, фильтрация шумового поля (которая происходит одновременно с фильтрацией сигнала) практически не влияет на структуру корреляционной матрицы шума $\mathbf{R}$.

Из приведенных результатов следует, что качественно частотная фильтрация приводит к тем же изменениям коэффициентов усиления АР, что и в случае белого шума. При этом сами значения коэффициентов усиления для перпендикулярно ориентированной АР увеличивается на 2 дБ в сравнении с аналогичными расчетами для модели пространственно белого шума. Для антенны, ориентированной под углом к источнику, значения коэффициентов усиления также увеличиваются, но несколько меньше (на 1÷1,5 дБ). Объяснение этого эффекта связано со специфическим видом горизонтальной функции корреляции динамического шума в волноводе [11].

5. Заключение

В работе продолжено исследование влияния ветрового волнения на эффективность пространственной обработки низкочастотных акустических сигналов в мелком море с использованием горизонтальной антенны. Обсуждается возможность увеличения значений коэффициента усиления антенной решетки (АР) с привлечением предварительной частотной фильтрации сигнала на входе АР. Основная идея состоит в подавлении рассеянной компоненты сигнала, которая в процессе многократного рассеяния акустических мод на нестационарном волнении образует частотный спектр с характерной шириной менее герца. При этом когерентная компонента сигнала из-за более медленных процессов в океане (в основном внутренних волн) имеет характерную ширину порядка нескольких миллигерц. Таким образом, фильтрация входного сигнала в полосе $\Delta F \sim 5\div 10$ мГц позволяет существенно уменьшить вклад рассеянной компоненты и тем самым увеличить эффективность его пространственной обработки на апертуре горизонтальной АР. Численное моделирование этих эффектов проделано с использованием уравнения переноса для пространственно-временной корреляционной функции комплексных амплитуд акустических мод. Конкретные результаты получены для мелководного звукового канала с зимней гидрологией в случае умеренного и сильного ветрового волнения. Для вычисления значений коэффициента усиления АР на фоне океанического шума используется простая модель пространственно белого шума и более реалистичная модель шума ветрового происхождения, генерируемого дипольными поверхностными источниками. С использованием методов численного моделирования показано, что предварительная частотная фильтрация существенно повышает пространственную когерентность сигнала, в том числе и на большом удалении от источника (порядка 10^2 км). При умеренном волнении (скорость ветра $V = 10$ м/с) сигнал остается практически когерентным на расстоянии до 150 км. В случае сильного волнения ($V = 15$ м/с) его когерентность после фильтрации также существенно возрастает, при этом остаточная корреляция на апертуре $L = 150$ м увеличивается на порядок и равна 0,8 на удалении $R = 50$ км и 0,4 на удалении $R = 150$ км.

Коэффициент усиления горизонтальной АР с числом элементов $M = 51$ и межэлементным расстоянием $d = 1/2$ рассчитывался для трех методов пространственной обработки: метода ФАР и оптимальных методов (линейного и квадратичного). Показано, что предварительная частотная фильтрация сигнала в полосе $\Delta F = 10$ мГц при умеренном волнении позволяет получить для всех методов пространственной обработки значения коэффициента усиления 16–17 дБ, то есть близкие к предельному $10\lg M = 17$ дБ, которое соответствует когерентному сигналу на фоне некоррелированного шума. В случае сильного волнения частотная фильтрация также значительно повышает эффективность пространственной обработки. Значения коэффициента усиления АР увеличиваются на 3–4 дБ (в зависимости от расстояния и метода обработки). При расширении полосы фильтрации до 20 мГц эти результаты практически не изменяются. Рассмотрено также влияние скорости звука в донном грунте на эти результаты. Аналогичные расчеты проделаны для коэффициента усиления АР на фоне шума ветрового происхождения, генерируемого приповерхностными источниками. Показано, что предварительная частотная фильтрация приводит для пространственной обработки качественно к тем же эффектам.

И, наконец, кратко остановимся на прикладных аспектах полученных теоретических результатов. Прежде всего заметим, что фильтрация сигнала в более широкой полосе $\Delta F \sim 1\div 10$ Гц, которая иногда применяется в приемных гидроакустических системах для снижения отношения сигнал/шум, не влияет на когерентность сигнала и коэффициент усиления АР. В этом смысле предлагаемая узкополосная фильтрация имеет несомненные преимущества. С другой стороны, она использует априорную информацию о частоте излучения и достаточно длинные (порядка 10^2 с) временные выборки входного сигнала, поэтому неприменима для систем быстрого обнаружения. Как нам представляется, узкополосная фильтрация в комбинации с методами пространственной обработки может быть полезна в задачах обнаружения и наблюдения слабых сигналов удаленных стационарных источников, особенно в сложных сезонных и метеорологических условиях.

Финансирование

Данное исследование выполнено в рамках госзадания ИПФ РАН по теме № FFUF-2024-0035.

Funding

This study was carried out within the framework of the state assignment of the IAP RAS on theme No. FFUF-2024-0035.

Литература

1. Елисеевнин В.А. О работе горизонтальной линейной антенны в мелком море // Акустический журнал. 1983. Т. 29, № 1. С. 44–49.
2. Елисеевнин В.А. Усредненный отклик горизонтальной линейной антенны в мелком море // Акустический журнал. 2004. Т. 50, № 2. С. 193–197. EDN: OPQSBP
3. Сазонтов А.Г., Фарфель В.А. О работе горизонтальной дискретной антенны в случайно-неоднородном океане // Акустический журнал. 1990. Т. 36, № 1. С. 130–136.
4. 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 // Акустический журнал. 1996. Т. 42, № 5. С. 615–622.
5. Carey W.M. The determination of signal coherence length based on signal coherence and gain measurements in deep and shallow water // The Journal of the Acoustical Society of America. 1998. Vol. 104, № 2. P. 831–837. doi:10.1121/1.423357
6. Carey W.M., Lynch J.F., Siegmund W.L., Rozenfeld I., Sperry B.J. Sound transmission and spatial coherence in selected shallow-water areas: measurements and theory // Journal of Computational Acoustics. 2006. Vol. 14, № 2. P. 265–298. doi:10.1142/S0218396X06003037
7. Завольский Н.А., Малеханов А.И., Раевский М.А., Смирнов А.В. Влияние ветрового волнения на характеристики горизонтальной антенны в условиях мелкого моря // Акустический журнал. 2017. Т. 63, № 5. С. 501–512. doi:10.7868/S0320791917040165 EDN: ZDOHNN
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 // Акустический журнал. 2019. Т. 65, № 5. С. 608–618. doi:10.1134/S0320791919050198 EDN: SOILKO
9. Бурдуковская В.Г., Малеханов А.И., Раевский М.А. Влияние анизотропного ветрового волнения на эффективность пространственной обработки акустических сигналов в мелком море // Акустический журнал. 2021. Т. 67, № 6. С. 617–625. doi:10.31857/S0320791921060022 EDN: AXLLXX
10. Раевский М.А., Бурдуковская В.Г. Влияние межмодовых корреляций на эффективность пространственной обработки акустических сигналов в океаническом волноводе со взволнованной поверхностью // Акустический журнал. 2022. Т. 68, № 6. С. 625–637. doi:10.31857/S0320791922060107 EDN: VBJCJD
11. Раевский М.А., Бурдуковская В.Г. Пространственная обработка акустических сигналов в океанических волноводах на фоне шумов ветрового происхождения // Акустический журнал. 2023. Т. 69, № 1. С. 73–83. doi:10.31857/S032079192210001X EDN: DADWRS
12. Раевский М.А., Бурдуковская В.Г. Модели распространения акустических сигналов и шумов в океанических волноводах с взволнованной поверхностью и эффективность пространственной обработки // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2023. Т. 66, № 12. С. 1068–1093. doi:10.52452/00213462_2023_66_12_1068 EDN: RPXQMF
13. Раевский М.А., Бурдуковская В.Г. Совместное влияние ветрового волнения и внутренних волн на когерентность низкочастотных акустических сигналов и эффективность их пространственной обработки в мелком море // Акустический журнал. 2024. Т. 70, № 4. С. 592–607. doi:10.31857/S0320791924040121 EDN: XFCDUF
14. Артельный В.В., Раевский М.А. О статистических характеристиках нормальных волн в волноводе с объемными неоднородностями // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 1984. Т. 27, № 9. С. 1142–1150.
15. Горская Н.С., Раевский М.А. О многократном рассеянии низкочастотных акустических волн на поверхностном волнении // Акустический журнал. 1986. Т. 32, № 2. С. 165–171.
16. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. М.: Наука, 2007. 370 с.
17. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 256 с.
18. Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 193 с. EDN: YXGDJZ
19. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 445 с.
20. Dennis R. Morgan, Thomas M. Smith. Coherence effects on the detection performance of quadratic array processors, with applications to large-array matched-field // The Journal of the Acoustical Society of America. 1990. Vol. 87, № 2. P. 737–747. doi:10.1121/1.398888
21. Kuperman W.A., Ingenito F. Spatial correlation of surface-generated noise in a stratified ocean // The Journal of the Acoustical Society of America. 1980. Vol. 67. P. 1988–1996. doi: 10.1121/1.384439

References

1. Eliseevnin V.A. Performance of a horizontal linear antenna in shallow sea *Acoustical Physics*. 1983;29(1):44–49. (in Russian)

2. Eliseevnin VA. Averaged response of a horizontal linear antenna in shallow sea. *Acoustical Physics*. 2004;50(2):154–157. doi:10.1134/1.1675869
3. Sazontov AG., Farfel VA. Performance of a horizontal discrete antenna in a randomly inhomogeneous ocean. *Acoustical Physics*. 1990;36(1):130–136. (in Russian)
4. Gorodetskaya EYu, Malehanov AI, Sazontov AG, Farfel VA. Far-range sound propagation effects on gain losses in horizontal antenna arrays. *Acoustical Physics*. 1996;42(5):615–622. (in Russian)
5. Carey WM. Determining signal coherence length in deep and shallow water. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1998;104(2):831–837. doi:10.1121/1.423357
6. Carey WM, Lynch JF, Siegmann WL, Rozenfeld I, Sperry BJ. Shallow-water sound transmission and spatial coherence. *Journal of Computational Acoustics*. 2006;14(2):265–298. doi:10.1142/S0218396X06003037
7. Zavolskii NA, Malekhanov AI, Raevskii MA, Smirnov AV. Effects of wind waves on horizontal array performance in shallow-water conditions *Acoustical Physics*. 2017;63(5):542–552. DOI: 10.1134/S1063771017040145
8. Zavolskii NA, Malekhanov AI, Raevskii MA. Comparative analysis of horizontal array processing in a shallow-water channel with a rough windy surface. *Acoustical Physics*. 2019;65(5):507–516. doi:10.1134/S0320791919050198
9. Burdukovskaya VG, Malekhanov AI, Raevsky MA. Influence of anisotropic wind waves on the efficiency of spatial processing of acoustic signals in shallow water. *Acoustical Physics*. 2021;67(6):617–625. doi:10.1134/S1063771021060026
10. Raevsky MA, Burdukovskaya VG. Effect of intermodal correlations on the efficiency of the spatial processing of acoustic signals in an oceanic waveguide with a perturbed surface *Acoustical Physics*. 2022;68(6):582–593. doi:10.1134/S1063771022060100
11. Raevsky MA, Burdukovskaya VG. Spatial processing of acoustic signals in oceanic waveguides on a wind noise background *Acoustical Physics*. 2023;69(1):102–111. DOI: 10.1134/S1063771022700063
12. Raevsky MA, Burdukovskaya VG. Models of propagation of acoustic signals and noise in oceanic waveguides with wavy surface and the effectiveness of spatial signal processing. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2024;66(12):966–987. <https://doi.org/10.1007/s11141-024-10345-4>
13. Raevsky MA, Burdukovskaya VG. The combined influence of wind waves and internal waves on the coherence of low-frequency acoustic signals and the efficiency of their spatial processing in shallow water *Acoustical Physics*. 2024;70(4):705–717. DOI: 10.1134/S1063771024601547
14. Artel'nyi VV, Raevskii MA. Statistical characteristics of normal modes in a waveguide with volume inhomogeneities *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1984;27(9):804–810. <https://doi.org/10.1007/BF01041390>
15. Gorskaya NS, Raevsky MA. On multiple scattering of low-frequency acoustic waves by surface waves. *Acoustical Physics*. 1986;32(2):165–171. (in Russian)
16. Brekhovskikh LM, Lysanov YP. Theoretical foundations of ocean acoustics. Moscow: Nauka; 2007. 370 p. (in Russian)
17. Davidan IN, Lopatukhin LI, Rozhkov VA. Wind waves in the World Ocean. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1985. 256 p. (in Russian)
18. Katsnelson BG, Petnikov VG. Shallow water acoustics. Moscow: Nauka; 1997. 193 p. (in Russian)
19. Urick RJ. Principles of underwater sound. New York: McGraw-Hill; 1975.
20. Morgan DR., Smith TM. Coherence effects on the detection performance of quadratic array processors, with applications to large-array matched-field // The Journal of the Acoustical Society of America. 1990;87(2):737–747. doi:10.1121/1.398888
21. Kuperman WA, Ingenito F. Spatial correlation of surface-generated noise in a stratified ocean // The Journal of the Acoustical Society of America. 1980;67:1988–1996. doi:10.1121/1.384439

Об авторах

БУРДУКОВСКАЯ Вера Геннадьевна, научный сотрудник ИПФ РАН, ORCID 0000-0002-1557-6729, Scopus AuthorID6504075366, SPIN-код (РИНЦ): 3950-4486, e-mail: bvg@ipfran.ru

РАЕВСКИЙ Михаил Алексеевич, старший научный сотрудник ИПФ РАН, кандидат физико-математических наук, ORCID0000-0002-7914-4810, Scopus AuthorID6602674679, WoS ResearcherID ABF-2016-2020, e-mail: raevsky@appl.sci-nnov.ru