

О влиянии ветрового волнения на коэффициент усиления горизонтальной антенной решетки в мелком море

Н. А. Завольский,^{*} А. И. Малеханов,[†] М. А. Раевский,^{*} А. В. Смирнов[‡]

Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики РАН»

Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

(Статья поступила 25.08.2017; Подписана в печать 19.09.2017)

Анализируется влияние ветрового волнения на коэффициент усиления протяженной горизонтальной антенной решетки в мелком море при использовании различных, в том числе, оптимальных методов пространственной обработки сигнала. Численное моделирование выполнено для гидрологических условий, характерных для Баренцева моря в зимний период, и модели Пирсона-Московица для спектра ветровых волн. Демонстрируется возможность значительного влияния развитого волнения на усиление АР в зависимости от ее волновых размеров, дистанции распространения сигнала и скорости ветра.

PACS: 43.60.Fg, 43.30.Bp

УДК: 534.8, 551.46

Ключевые слова: пространственная обработка сигнала, дальнее распространение звука, многомодовый сигнал, ветровое волнение, коэффициент усиления антенны.

ВВЕДЕНИЕ

При рассмотрении и сравнительном анализе методов пространственной обработки акустических сигналов в океанических волноводах с использованием протяженных антенных решеток (АР) необходимо учитывать как многомодовый характер распространения сигнала, так и его флуктуации, обусловленные случайными неоднородностями канала распространения и(или) его границ. Регулярные эффекты, связанные с многомодовым распространением, исследованы достаточно подробно, чего нельзя сказать о статистических эффектах, приводящих с ростом дистанции к ослаблению пространственной когерентности принимаемого сигнала и потому наиболее существенных на больших трассах. Применительно к реальным условиям распространения сигнала в каналах мелкого моря, открытых к свободной поверхности и дну, особую важность при анализе приобретают эффекты многократного рассеяния звука на ветровом волнении и взаимодействия с донными породами.

Данная работа продолжает исследование, предпринятое нами в целях анализа эффективности (направленных свойств, коэффициента усиления) горизонтальных фазированных АР в каналах мелкого моря в условиях развитого ветрового волнения [1]. Проводится сравнение оптимальных методов пространственной обработки сигнала, в явном виде учитывающих ослабление когерентности полезного сигнала на входе АР и вследствие этого обладающих возможностью частично компенсировать, в смысле величины усиления АР, ее влияние на эффективность обработки.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Модель формирования поля полезного сигнала на входе многоэлементной горизонтальной АР в подводном канале мелкого моря формулируется нами в той же постановке и в тех же приближениях, что и в работе [1].

Предполагается, что сигнал создается точечным тональным (низкочастотным, в диапазоне ниже ~ 500 Гц) источником звука в подводном канале со взволнованной свободной поверхностью. Волновод предполагается горизонтально однородным с некоторым профилем скорости звука $c(z)$ в водном слое и геоакустическими параметрами дна. Используется модовый подход в описании поля в волноводе на основе его разложения по ортонормированным собственным функциям $\varphi_p(z)$ невозмущенного волновода. С учетом ветрового волнения амплитуды разложения (модовые амплитуды) $a_p(x, y, t)$ становятся случайными функциями своих переменных — координат в горизонтальной плоскости канала и времени. Для анализа сглаженной по интерференционной структуре функции когерентности сигнала в горизонтальной плоскости необходимо вычислить автокорреляционную функцию модовых амплитуд с поперечным (относительно оси x , вдоль которой предполагается распространение сигнала) разнесением точек наблюдения:

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

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 [2]:

$$\frac{\partial N_p(\rho, x)}{\partial x} = \sum_q W_{pq}(\rho, x) N_q(\rho, x) - 2(\gamma_p + Imk_p) N_p(\rho, x). \quad (1)$$

^{*}E-mail:

[†]E-mail: almal@appl.sci-nnov.ru

[‡]E-mail: lexsmial@ipfran.ru

Здесь γ_p — модовый декремент затухания когерентной компоненты $\langle a_p \rangle$, $\text{Im} k_p$ — мнимая часть волнового числа моды, обусловленная потерями в дне, W_{pq} — вероятность перехода между модами, описывающая эффекты взаимного рассеяния мод. Функции γ_p и W_{pq} выражаются через двумерный пространственный спектр волнения $B_\zeta(k_x, k_y)$ [2].

Автокорреляционные функции отдельных мод $N_p(\rho, R)$ позволяют рассчитать сглаженную по интерференционной структуре функцию пространственной корреляции $N(\rho, R)$ сигнала на некотором удалении R от источника и затем построить корреляционную матрицу сигнала на входе АР при заданных координатах приемных элементов. Для нормированной функции корреляции имеем выражение:

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

Горизонтальная АР линейной конфигурации, состоящая из N элементов равной чувствительности с межэлементным расстоянием $d = \lambda_0/2$ (где λ_0 — длина волны), предполагается ориентированной перпендикулярно к направлению на удаленный источник. Эффективность пространственной обработки принимаемого сигнала количественно характеризуется нами величиной коэффициента усиления (выигрыша) G , который стандартно определяется как выходное отношение сигнал/шум (ОСШ), отнесенное к входному ОСШ на отдельном элементе. Предполагается, что аддитивный шум на входе АР является пространственно-белым, что не является принципиальным ограничением для обсуждаемой постановки (если не рассматривать анизотропные помехи, создаваемые локализованными источниками).

Известно [3, 4], что коэффициент усиления АР при оптимальной линейной (G_1) и квадратичной (G_2) обработке сигнала, принимаемого на фоне пространственно-белого шума, полностью определяется спектром собственных значений λ_i его корреляционной матрицы (зависящим, как и сама матрица, от дистанции R):

$$R_{mn} = N(\rho = d(m - n), R)$$

Соответствующие выражения, используемые затем в расчетах, имеют вид:

$$G_1 = N \frac{\lambda_1}{\sum_i \lambda_i}, \quad G_2 = N \frac{\sqrt{\sum_i \lambda_i^2}}{\sum_i \lambda_i}$$

где λ_1 — максимальное собственное значение. Коэффициент усиления G_0 для стандартной схемы обработки в фазированной АР, которая (в случае поперечной ее ориентации) отвечает синфазному накоплению сигнала

по элементам, имеет вид:

$$G_0(R) = N^{-1} \sum_{m,n=1}^N R_{mn}(R)$$

Приведенные выражения положены в основу моделирования и сравнительного анализа эффективности обсуждаемых методов пространственной обработки сигнала.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Численное моделирование выполнено нами для достаточно типичных гидрологических условий Баренцева моря в зимний период. Задавался канал глубиной $H = 200$ м с линейным профилем скорости звука: $c(0) = 1490$ м/с, $c(H) = 1500$ м/с. Дно моделировалось жидким полупространством с плотностью $\rho = 2$ г/см³, скоростью звука $c_1 = 1800$ м/с и коэффициентом затухания $\delta = 0.2$ дБ/(км Гц). Предполагалось, что источник излучает сигнал на частоте 250 Гц и находится вблизи дна ($z_{\text{и}} = 197$ м); на этой же глубине расположена горизонтальная АР ($z_A = 197$ м) с межэлементным расстоянием $d = 3$ м. Были выбраны два варианта по числу элементов АР: $N=51$ (длина антенны $25 \lambda_0$) и $N=201$ ($100 \lambda_0$, соответственно). При расчетах когерентных свойств сигнала в широком интервале удалений АР от источника (от 1 до 500 км) использовалась известная модель развитого изотропного ветрового волнения с эмпирическим спектром Пирсона–Московица для двух значений скорости ветра ($V = 10, 15$ м/с).

Результаты расчетов коэффициентов усиления АР G_1 , G_2 и G_0 при обсуждаемых методах обработки сигнала в зависимости от расстояния R приведены на рис. 1, 2 в сравнении с величиной N (максимально возможного антенного выигрыша в случае пространственно-белого шума). Расчеты демонстрируют ожидаемое падение коэффициента усиления при всех методах обработки, что является прямым следствием ослабления, с ростом дистанции, взаимных корреляций сигнала на элементах АР. Важны, однако, некоторые существенные детали приведенных зависимостей.

Видно, что на самых малых расстояниях все три величины G_0 , G_1 и G_2 близки к максимально возможному значению (горизонтальный пунктир), поскольку эффекты рассеяния еще не столь значительны, а влияние многомодового распространения при поперечном (к направлению на источник) расположении АР не проявляется. Видно также, что при умеренных ветрах (верхние три кривые на обоих рисунках) даже на больших удалениях от источника коэффициенты усиления остаются близкими по величине, что обусловлено сохранением частичной и достаточно высокой (на уровне ~ 0.5)

корреляции сигнала на всех элементах [1]. Следовательно, в таких ситуациях оптимизация обработки не дает заметного выигрыша, и самая простая обработка, осуществляемая синфазной АР, является практически оптимальной.

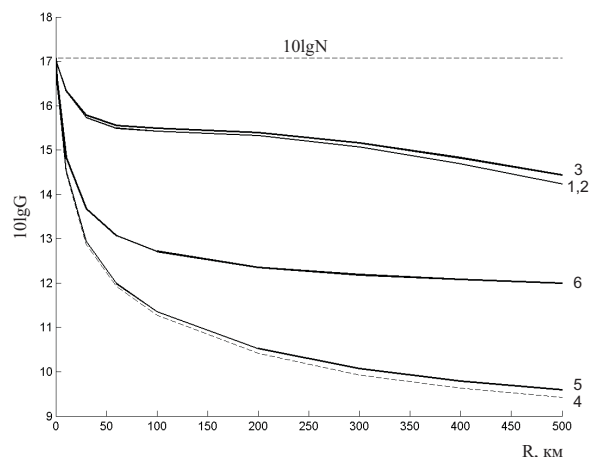


Рис. 1: Зависимости коэффициента усиления АР (число элементов $N=51$) от дистанции при разных скоростях ветра: 10 м/с (1 — G_0 , 2 — G_1 , 3 — G_2) и 15 м/с (4 — G_0 , 5 — G_1 , 6 — G_2)

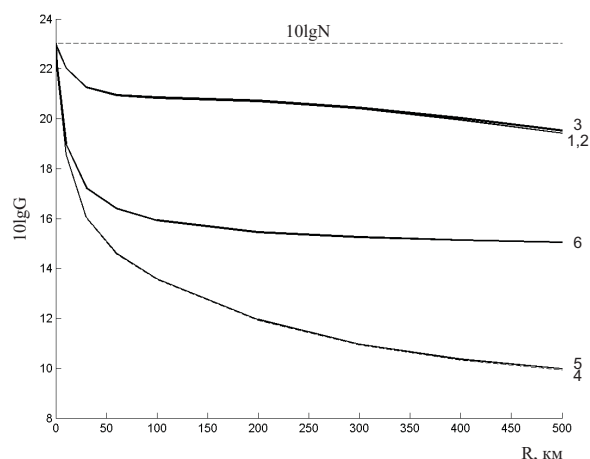


Рис. 2: Те же зависимости, что и на рис. 1, для АР с числом элементов $N=201$

Однако при сильных ветрах ситуация кардинально меняется. Коэффициент «остаточной корреляции» сигнала в этом случае быстро уменьшается с дистанцией до малых (и нулевых) значений, при этом характерный пространственный масштаб корреляции составляет ~ 30 – 50 м, т.е. заметно меньше заданных нами размеров АР. Именно в таких ситуациях следует ожидать существенного выигрыша оптимальной квадратичной обработки в сравнении с линейной, что и показывают расчеты. Видно, что при $N=51$ отличие G_1 и G_2 составляет величину 2–3 дБ, а при $N=201$ — величину 5–6 дБ и более. Вместе с тем, оптимальная линейная обработка и в этом случае практически не дает выигрыша в сравнении с синфазной АР, поскольку формируемые диаграммы направленности близки между собой, и только дополнительные каналы накопления сигнала в квадратичной схеме [3, 4] обеспечивают заметный дополнительный выигрыш.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования убедительно показывают, что учет статистических эффектов рассеяния звука на ветровом волнении в каналах, открытых к поверхности, необходим при расчетах выигрыша протяженной АР и прогнозировании его величины при выборе различных методов пространственной обработки сигнала. Специфика условий дальнего распространения проявляется в спектре собственных значений матрицы пространственных корреляций сигнала на входе АР, расширение которого с ростом дистанции приводит к появлению отличий (в некоторых ситуациях — существенных) в величине достигаемого выигрыша для разных методов. Вместе с тем, в случае поперечной ориентации АР «не чувствует» модовый состав принимаемого сигнала, в то время как в более общем случае (при ненулевых проекциях волновых чисел мод на ось антенны) можно ожидать более разнообразной и существенной иерархии методов обработки в смысле величины достигаемого выигрыша.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-02-00929).

- [1] Завольский Н. А., Малеханов А. И., Раевский М. А., Смирнов А. В. Акуст. журн. 2017. **63**, № 5. С. 501.
 [2] Горская Н. С., Раевский М. А. Акуст. журн. 1986. **32**, № 2. С. 165.
 [3] Малеханов А. И., Таланов В. И. Акуст. журн. 1990. **36**,

№ 5. С. 891.

- [4] Городецкая Е. Ю., Малеханов А. И., Сазонтов А. Г., Фарфель В. А. Акуст. журн. 1996. **42**, № 5. С. 615.

Effects of wind waves on horizontal array gain in shallow-water conditions

N. A. Zavolsky, A. I. Malekhanov^a, M. A. Raevsky, A. V. Smirnov^b

Federal Center «Institute of Applied Physics RAS», Nizhny Novgorod, 603950, Russia

E-mail: ^aalmal@appl.sci-nnov.ru, ^blexsmial@ipfran.ru

The paper is aimed at the comparative study of the wind-induced effects on the large horizontal array gain in shallow-water channels for several signal processing techniques, optimal ones included. Computer simulation is performed for some environmental conditions typical for the place Barents Sea in the winter season and the Pierson–Moskowitz model for developed wind waves. The results obtained exhibit considerable effects of multiply sound scattering on the array gain and its essential dependence on the array size, propagation distance and wind speed.

PACS: 43.60.Fg, 43.30.Bp

Keywords: array signal processing, long-range sound propagation, multimode signal, wind waves, array gain.

Received 25 August 2017.

Сведения об авторах

1. Завольский Николай Александрович — науч. сотрудник.
2. Малеханов Александр Игоревич — канд. физ.-мат. наук, зав. отделом; тел.: (831) 436-83-52, e-mail: almal@appl.sci-nnov.ru
3. Раевский Михаил Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник.
4. Смирнов Алексей Владимирович — мл. науч. сотрудник; тел.: (831) 416-47-42, e-mail: lexsmial@ipfran.ru.