

Оценка эффективности антенных решеток в подводных звуковых каналах

М. С. Лабутина^{1,*}, А. И. Малеханов^{1,2,†}, А. В. Смирнов^{2‡}¹Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского,
радиофизический факультет, кафедра акустики
Россия, 603950, Нижний Новгород, проспект Гагарина, д. 23²Институт прикладной физики Российской академии наук
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

В данной работе исследован коэффициент усиления вертикальной антенной решетки в случайно-неоднородном подводном звуковом канале. Принимаемый сигнал представлял собой сумму нормальных волн с заданным спектром волновых чисел и случайными амплитудами, при этом радиус их взаимных корреляций зависел от дальности распространения сигнала. Амплитудно-фазовое распределение, задаваемое на антенне, позволяло производить настройку на любую из распространяющихся мод. Кроме того, были использованы различные модели океанических шумов как сплошного, так и дискретного модового спектра. Проанализировано, как влияют на отклик вертикальной антенной решетки следующие параметры задачи: спектр интенсивностей мод сигнала, спектр волновых чисел и масштаб межмодовых корреляций.

PACS: 43.30, 92.10

УДК: 534.2

Ключевые слова: пространственная когерентность, подводный звуковой канал, вертикальная антенна, межмодовые корреляции, модовый шум, мелкое море.

Океан с акустической точки зрения исключительно изменчив: в нем возникают течения, вихри, внутренние волны, мелкомасштабная турбулентность. Кроме распространенного представления о горизонтально-слоистом распределении скорости звука [1], необходимо принимать во внимание наблюдаемые пространственные и временные флуктуации распространяющихся звуковых сигналов [2]. Вследствие этого структура звукового поля в океанических волноводах оказывается весьма сложной. Известно, что ослабление взаимных корреляций модовых амплитуд при дальнейшем распространении акустического сигнала в океаническом волноводе происходит из-за рассеяния звука на случайных (объемных и поверхностных) неоднородностях канала.

В данной работе выполнено моделирование функции пространственной когерентности многомодового акустического сигнала в вертикальной плоскости случайно-неоднородного подводного звукового канала в предположении, что принимаемый сигнал представляет собой сумму нормальных волн, имеющих заданный спектр волновых чисел, амплитуды которых имеют некоторый (зависящий от дистанции) конечный масштаб взаимных корреляций.

Дальнейший расчет функции отклика антенны на такой сигнал проведен с целью количественной оценки влияния основных физических характеристик сигнала, таких как спектр интенсивностей мод, спектр волновых чисел, масштаб межмодовых корреляций, на коэффициент усиления антенны. Полученные результаты позволяют провести сравнительный анализ влия-

ния условий распространения многомодового сигнала на отклик протяженной вертикальной антенны.

Также было проведено сравнение коэффициентов усиления протяженной вертикальной антенны при разных моделях шума, задаваемых матрицами пространственной корреляции, и сигнала при последовательной настройке амплитудно-фазового распределения на каждую из мод. Представленные результаты позволяют дать рекомендации по подбору модели сигнала с наибольшим усилением в рамках выбранной модели шума.

Для демонстрации относительного усиления многомодового сигнала вертикальной антенной решетки в случайно-неоднородном канале с учетом модового шума, обусловленного наличием шумовых источников в приповерхностном слое канала, воспользуемся известными моделями функции пространственной когерентности шума, полученными в работе Купермана-Ингенито [3].

Коэффициент усиления антенны G находится как отношение сигнал-шум на выходе антенны, деленное на отношение сигнал-шум на единичном приемнике.

$$G = \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_{array}}{\left(\frac{S}{N}\right)_{receiver}}. \quad (1)$$

Рассмотрим поподробнее каждое из данных отношений.

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{array} = \frac{\mathbf{F}^+ R_S \mathbf{F}}{\mathbf{F}^+ (I + \alpha R_N) \mathbf{F}}. \quad (2)$$

Здесь \mathbf{F} — вектор амплитудно-фазового распределения антенны, отвечающий конфигурации решетки, I — единичная матрица, которая относится к пространственным корреляциям изотропного шума и собственных шумов в каналах антенной решетки (единичной

*E-mail: labutya@mail.ru

†E-mail: almal@appl.sci-nnov.ru

‡E-mail: lexsmial@mail.ru

мощности); R_N — матрица пространственной корреляции шумов океана, для формирования использовались модели шумов как сплошного, так и дискретного модового спектра; R_S — матрица функции пространственной когерентности полезного сигнала, α — коэффициент отношения мощности модового к белому шуму.

Соотношение сигнал шум на выходе с единичного приемника определяется как отношение средних по элементам интенсивностей сигнала и шумов

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{receiver} = \frac{\sum_{m=1}^M (I_S)_m}{1 + \alpha \left(\sum_{m=1}^M I_N\right)}, \quad (3)$$

I_S и I_N — интенсивности m -ой моды на некоторый выбранной глубине z_0 в поле сигнала и модового шума соответственно.

Таким образом, выигрыш антенны зависит как от входных параметров — шума и сигнала, так и от характеристик самой решетки.

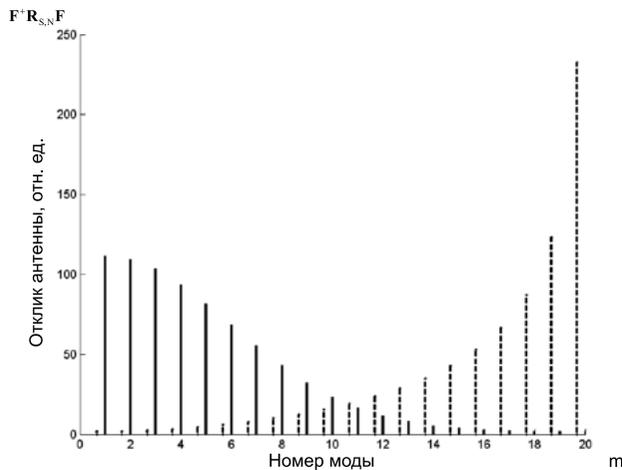


Рис. 1: Отклик вертикальной антенны на сигнал с неравномерным спектром интенсивности мод с максимумом в области низких мод и шум по модели Купермана–Ингенито (с точками).

Для сравнительного анализа влияния выбора амплитудно-фазового распределения антенной решетки на ее выигрыш вектор \mathbf{F} поочередно выбирался равным вектору каждой из мод на входе антенной решетки. При этом размер антенной решетки предполагался равным полной глубине подводного звукового канала (100 м), длина волны составляла $\lambda = 10$ м, расстояние между элементами 5 м.

На рис. 1 представлены результаты численного моделирования отклика антенны в относительных едини-

цах в изоскоростном подводном звуковом канале с абсолютно жестким дном и свободной поверхностью в зависимости от номера моды на шум, представленный моделью Купермана–Ингенито и на сигнал, построенный приближении неравномерного спектра интенсивности мод сигнала с максимумом в области низких мод.

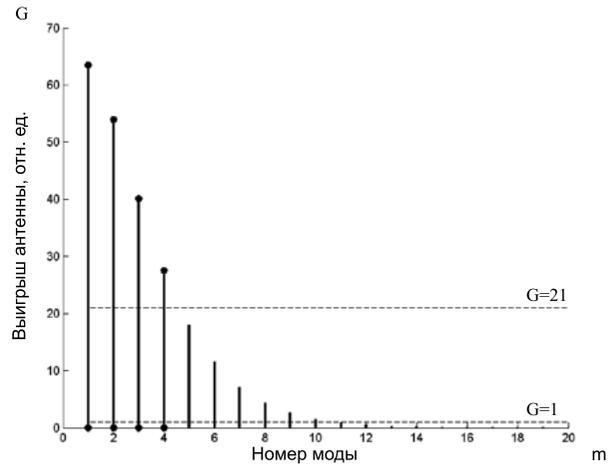


Рис. 2: Коэффициент усиления антенны сигнала с неравномерным спектром интенсивности и отсутствием межмодовой корреляции на фоне шума, описываемого моделью Купермана–Ингенито, в зависимости от номера моды.

На рис. 2 представлен результат вычисления выигрыша вертикальной антенной решетки, в случае, когда сигнал и шум заданы моделями из рис. 1. Для сравнения, горизонтальным пунктиром на рисунках показан уровень коэффициента усиления данной антенной решетки при приеме сигнала в виде плоской волны на фоне изотропного шума (равный числу элементов $N = 21$). По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что в случае, когда сигнал локализован в области низких мод, а шумы — в области высоких мод, получается очень хороший выигрыш для антенной решетки с амплитудно-фазовым распределением, заданном в виде первых четырех мод. Этот результат демонстрирует эффект существенной зависимости коэффициента усиления антенны от конкретного выбора моды, особенно в случае некоторого характерного распределения по модам сигнала и шумов океана.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности (№2014/134, проект 1822), а также гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (НШ-339.2014.2).

[1] Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. (М.: Наука, 1977).

[2] Бреховских Л. М., Лысанов Ю. П. Теоретические ос-

новы акустики океана. (Ленинград: Гидрометеиздат, 1982).

N 6. P. 1988. (1980).

[3] *Kuperman W.A., Ingenito F.* J. Acoust. Soc. Am. **67**,

The estimation of antenna arrays efficiency in underwater sound channels

M. S. Labutina^{1,a}, A. I. Malekhanov^{1,2,b}, A. V. Smirnov^{2,c}

¹*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 23 Gagarin avenue, Nizhny Novgorod, 603950, Russia*

²*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Science, 46 Ul'yanov Street Nizhny Novgorod, 603950, Russia*

E-mail: ^alabutya@mail.ru, ^balmal@appl.sci-nnov.ru, ^clexsmial@mail.ru

In this paper it is investigated the gain of the vertical antenna array which is situated in a randomly inhomogeneous underwater sound channel. The model of the received on the array signal is defined as the superposition of normal waves with specified spectrum of wave numbers and with random amplitudes. The radius of mutual correlations of modes is depended on the distance of signal propagation. The amplitude-phase distribution, defined on the antenna array, was allowed us to adapt to any of the propagating modes. In addition, it is considered two different types of ocean noise, namely, the model of noise with continuous and discrete-mode spectrum. As a result it is analyzed the dependence of response of the vertical antenna array on such following parameters as: the spectrum of modes intensities of signal, the range of the wave numbers and the scale of cross-modal correlations.

PACS: 43.30, 92.10

Keywords: spatial coherence, underwater sound channel, vertical antenna performance, cross-modal correlations, modal noise, shallow water.

Received 27.07.2015.

Сведения об авторах

1. Лабутина Мария Сергеевна — аспирант Нижегородского государственного университета имени Н. И. Лобачевского; тел.: +7(910) 876-63-25, e-mail: labutya@mail.ru.
2. Малеханов Александр Игоревич — канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий отделом геофизической акустики, заместитель руководителя Отделения геофизических исследований по научной работе Института прикладной физики РАН; тел.: (831) 436-83-52, e-mail: almal@appl.sci-nnov.ru.
3. Смирнов Алексей Владимирович — младший научный сотрудник, Институт прикладной физики РАН; тел. +7(952) 457-29-14, e-mail: lexsmial@mail.ru.