

А.И. Малеханов, А.В. Смирнов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ
ВЕРТИКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕЕ
ПОЛОЖЕНИЯ В СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНОМ
ПОДВОДНОМ ЗВУКОВОМ КАНАЛЕ**

*Институт прикладной физики Российской академии наук
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46,
Tel.: 8 (831) 416-4752, E-mail: lexsmial@ipfran.ru*

Проведено численное моделирование коэффициента усиления (выигрыша) вертикальной антенной решетки, размещенной в подводном звуковом канале и принимающей частично-когерентный многомодовый сигнал удаленного источника на фоне анизотропных шумов моря. Показано, что положение отдельных элементов и антены как целого является фактором, существенно влияющим на величину достигаемого выигрыша, что указывает на возможность специального выбора положения антенны для повышения эффективности пространственной обработки принимаемых сигналов. Результаты численного моделирования продемонстрированы на примере канала мелкого моря.

Ключевые слова: подводный звуковой канал, антенная решетка

Эффективность работы протяженной антенной решетки (AP) с обработкой сигналов в реальном океаническом волноводе зависит от целого ряда факторов, требующих своего анализа. Один из важных вопросов, специфических для вертикального размещения AP, – вопрос о влиянии положения антенны по глубине канала. Если такое влияние оказывается существенным, то это явно указывает на возможность дополнительного (к выбору метода самой обработки) повышения эффективности обработки путем специального выбора положения элементов AP в канале.

В данной работе продолжено рассмотрение этого вопроса, начатое ранее в [1, 2]. Предполагается, что вертикальная AP принимает частично-когерентный сигнал дискретного модового спектра, характеризующийся определенным набором мод и некоторым заданным (конечным) масштабом взаимных корреляций модовых амплитуд, на фоне собственных шумов открытого океана, описываемых моделью [3]. В качестве методов пространственной обработки сигналов в каналах AP выбраны следующие: простейший метод с равномерным по элементам весовым

вектором АР; метод согласованной модовой фильтрации, при котором весовой вектор АР задается в точном соответствии с амплитудным распределением модовой функции на элементах АР (с последовательной перестройкой по номеру моды, т.е. со «сканированием» АР в модовом пространстве); оптимальный метод в классе линейной обработки; оптимальный метод квадратичной обработки [4, 5]. Сравнение методов обработки при различном числе и размещении элементов АР в канале проводится путем расчета коэффициента усиления (выигрыша) АР по величине отношения сигнал/шум (ОСШ) – величин G_{const} , G_m , G_{lin} и G_{opt} , соответственно.

Пространственные распределения полезного сигнала \mathbf{s} и шумов \mathbf{n} на входе АР формируются конечным числом M мод дискретного спектра:

$$\mathbf{s} = \sum_{m=1}^M a_m \mathbf{u}_m \quad \mathbf{n} = \mathbf{n}_0 + \sum_{m=1}^M b_m \mathbf{u}_m, \quad (1)$$

где векторы \mathbf{u}_m – регулярные модовые векторы, a_m и b_m – случайные модовые амплитуды сигнала и шумов, соответственно; \mathbf{n}_0 – компонента пространственно-белого шума единичной мощности. Особый интерес представляют ситуации, когда сигнал и модовые шумы формируются достаточно большим количеством мод, но распределения их интенсивностей по модам (модовые спектры) существенно различны. В этой ситуации выигрыш АР может быть значительным при «правильной» пространственной фильтрации сигнальных мод на фоне шумовых, даже в случае частичной когерентности полезного сигнала, обусловленной его многократным рассеянием на случайных неоднородностях канала [4, 5].

Опуская промежуточные преобразования, приведем выражения для интересующих нас величин в терминах модовой фильтрации сигналов:

$$G_{\text{const}} = \frac{\mathbf{1}^+ \mathbf{R}_S \mathbf{1}}{N + \mathbf{1}^+ \mathbf{R}_N \mathbf{1}} \times \frac{Sp(\mathbf{R}_{\text{Noise}})}{Sp(\mathbf{R}_S)}, \quad G_m = \frac{(\mathbf{Q} \mathbf{M}_S \mathbf{Q})_{mm}}{(\mathbf{Q} \mathbf{M}_N \mathbf{Q})_{mm} + \mathbf{Q}_{mm}} \times \frac{\langle \mathbf{b}^+ \mathbf{Q} \mathbf{b} \rangle + N}{\langle \mathbf{a}^+ \mathbf{Q} \mathbf{a} \rangle},$$

$$G_{\text{lin}} = \frac{\lambda_1 Sp(\mathbf{R}_{\text{Noise}})}{Sp(\mathbf{R}_S)}, \quad G_{\text{opt}} = \frac{Sp^{1/2} \left((\mathbf{R}_{\text{Noise}}^{-1} \mathbf{R}_S)^2 \right) Sp(\mathbf{R}_{\text{Noise}})}{Sp(\mathbf{R}_S)}. \quad (2)$$

Здесь \mathbf{R}_S , \mathbf{R}_N , $\mathbf{R}_{\text{Noise}}$ – матрицы пространственных корреляций (когерентности) сигнала, модовых шумов и полного шума, соответственно; $\mathbf{M}_S = \langle \mathbf{aa}^+ \rangle$ и $\mathbf{M}_N = \langle \mathbf{bb}^+ \rangle$ – матрицы взаимных корреляций модовых амплитуд (межмодовых корреляций) сигнала и помех, соответственно; \mathbf{Q} – матрица ортогональности модовых векторов на входе АР, которую можно интерпретировать как матрицу разрешающей способности АР в модо-

вом пространстве ($\mathbf{Q} = \mathbf{U}^+ \mathbf{U}$, где \mathbf{U} – матрица модовой структуры, состоящая из M векторов-столбцов \mathbf{u}_m); $\mathbf{1}$ – единичный весовой вектор (все элементы которого равны единице); λ_1 – максимальное собственное значение матрицы $\mathbf{R}_{\text{Noise}}^{-1} \mathbf{R}_s^*$; $\text{Sp}(\cdot)$ – след матрицы; « $^+$ » – знак эрмитова сопряжения. В предельном случае, когда достаточно плотная АР перекрывает весь канал, матрица \mathbf{Q} становится диагональной, что означает полную ортогональность модовых векторов, но в общем случае они имеют различные ортогональные свойства, что и оказывает влияние на достигаемый выигрыш АР.

Когерентные свойства полезного сигнала моделируются нами на основе использованной ранее эвристической модели матрицы межмодовых корреляций \mathbf{M}_s , содержащей некоторый внутренний масштаб – число мод, коррелированных с данной [1, 2]. Предельный случай диагональной матрицы \mathbf{M}_s физически отвечает сверхдальнему распространению сигнала, когда все межмодовые корреляции ослабли практически до нуля, либо пространственному усреднению по интерференционной структуре сигнала, что позволяет «принудительно» избавиться от существенно неравномерной зависимости интенсивности сигнала на входе АР от ее удаления от источника и учитывать только модовые интенсивности $\langle |a_m|^2 \rangle$. Модовый спектр $\langle |b_m|^2 \rangle$ и матрица когерентности \mathbf{R}_N шумов океана рассчитываются нами согласно известной модели [3]. Моделирование проведено для волновода с линейным профилем скорости звука: $c(0) = 1490$ м/с, $c(H) = 1500$ м/с, глубина канала $H = 200$ м; осадочное дно моделируется жидким полупространством с параметрами: $\rho = 2$ г/см³, $c = 1800$ м/с. Частота сигнала выбрана $f_0 = 150$ Гц (длина волны $\lambda = 10$ м, полное число мод $M = 22$). Входное ОСШ задавалось в предположении практически наименее интересного случая слабого сигнала: отношение его интенсивности (на элементе АР) к интенсивности модового шума составляет -20 дБ, а к интенсивности белого шума $+5$ дБ. Модовые функции и волновые числа рассчитывались с помощью программы TheKrakenNormalModeProgram.

На рис. 1 показано сравнение величин выигрыша АР (2) при следующих вариантах размещения АР: полное перекрытие канала (длина АР $L = 200$ м, $N = 16$), частичное (примерно на треть) перекрытие канала ($L = 67$ м, $N = 6$) с перемещением антенны как целого по глубине – в верхней части, в центре, в придонной области. Межэлементное расстояние $d \approx 1.4\lambda$ оптимизировано численно в рамках заданной модели сигнала и помех (по зависимости потерь усиления при оптимальной квадратичной обработке G_{opt}/N от числа элементов АР при полном перекрытии канала). Величина G_m показана в своей существенной зависи-

мости от номера моды m , остальные величины выигрыша имеют постоянные (при заданном выборе размещения АР) значения. Видно, что при погружении короткой антенны наиболее эффективными модами при их согласованной фильтрации (по сравнению величин G_m и G_{const}) сначала являются самые первые моды с номерами 1, 2, затем моды 3 и 4, что связано с изменением ортогональных свойств модовых векторов по мере перемещения АР. При размещении АР в центральной области канала выигрыши G_m ожидаемо имеет примерно такую же зависимость, что и для длинной АР, перекрывающей весь канал. Что же касается оптимальных методов обработки, то с их помощью может быть достигнут дополнительный, хотя не столь значительный для максимальной величины G_m , выигрыш: около 1 дБ для линейной обработки и еще 1.5 дБ для квадратичной обработки. Резкий спад эффективности метода модовой фильтрации с ростом номера моды обусловлен присутствием в высоких модах интенсивных шумов, возбуждаемых с морской поверхности.

Таким образом, размещение вертикальной АР в подводном канале

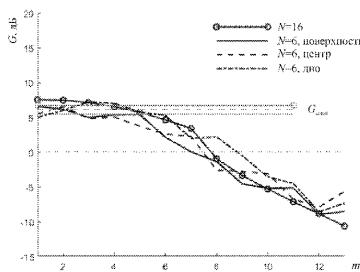


Рис. 1. Зависимость выигрыша G_m от номера моды m для различных вариантах размещения АР (пояснения в тексте) в сравнении с величинами G_{const} (показаны горизонтальными линиями).

является фактором, способным оказать существенное влияние на результатирующую эффективность пространственной обработки сигналов. Конкретные значения изменчивости выигрыша АР в зависимости от ее размещения зависят как от выбранного метода обработки, так и от модовых спектров интенсивностей полезного сигнала и шумов на входе АР.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-19-00383.

Литература

1. Labutina M.S., Malekhanov A.I., Smirnov A.V. Estimation of the efficiency of vertical antenna arrays in underwater sound channels // Physics of Wave Phenomena. 2016. Vol. 24. No. 2. P. 161–167.
2. Лабутина М.С., Малеханов А.И., Смирнов А.В. О влиянии размещения элементов вертикальной антенны в океаническом волноводе на эффективность многомодового сигнала на фоне модовых помех // Труды XXXII сессии Российского акустического общества. 2019. С. 430–436.

3. Kuperman W.A., Ingenito F. Spatial correlation of surface generated noise in a stratified ocean // J. Acoust. Soc. Am. 1980. Vol. 67. No. 6. pp. 1988–1996.
4. Малеханов А.И., Таланов В.И. Об оптимальном приеме сигналов в многомодовых волноводах // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 5. С. 891–897.
5. Вдовичева Н.К., Городецкая Е.Ю., Малеханов А.И., Сазонтов А.Г. Коэффициент усиления вертикальной антенны в случайно-неоднородном океаническом волноводе // Акуст. журн. 1997. Vol. 43. № 6. С. 769–776.

A.I. Malekhanov, A.V. Smirnov

MODELLING OF THE VERTICAL ARRAY GAIN IN DEPENDENCE ON THE ARRAY ARRANGEMENT IN AN RANDOMLY INHOMOGENEOUS UNDERWATER SOUND CHANNEL

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences
Russia, 603950, Nizhny Novgorod, st. Ulyanov, 46,
Tel.: +7 (831) 416-4752, E-mail: lexsmial@ipfran.ru*

The array gain performance for the vertical antenna array arranged in a randomly inhomogeneous underwater sound channel and receiving coherence-degraded multimode signal against the ambient sea noise background is numerically simulated. It is shown that the total number and positions of the array elements are both the factors that affect the array gain essentially. The numerical results are demonstrated for a typical shallow-water channel.

Keywords: underwater sound channel, antenna array

Acknowledgment: This work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 20-19-00383.

References

1. Labutina M.S., Malekhanov A.I., and Smirnov A.V. Estimation of the efficiency of vertical antenna arrays in underwater sound channels. Physics of Wave Phenomena, 2016, Vol. 24, No. 2, pp. 161–167.
2. Labutina M.S., Malekhanov A.I., and Smirnov A.V. O vlijanii razmeshhenija elementov vertikal'noj anteny v okeanicheskem volnovode na jeffektivnost' mnogomodovogo signala na fone modovyh pomeh. Trudy XXXII sessii Rossijskogo akusticheskogo obshhestva, 2019, pp. 430–436.
3. Kuperman W.A. and Ingenito F. Spatial correlation of surface generated noise in a stratified ocean. J. Acoust. Soc. Am., 1980, Vol. 67, No. 6, pp. 1988–1996.
4. Malekhanov A.I. and Talanov V.I. Ob optimal'nom prieme signalov v mnogomodovyh volnovodah. Akust. zhurn., 1990, Vol. 36, No. 5, pp. 891–897.
5. Vdovicheva N.K., Gorodeckaja E.Ju., Malekhanov A.I., and Sazontov A.G. Kojefficient usilenija vertikal'noj anteny v sluchajno-neodnorodnom okeanicheskem volnovode. Akust. zhurn., 1997, Vol. 43, No. 6, pp. 769–776.