

Моделирование выигрыша антенной решетки в океаническом волноводе в условиях приема многомодового сигнала на фоне модовых помех

М. С. Лабутина^{1,*}, А. И. Малеханов^{1,2,†}, А. В. Смирнов^{2,‡}

¹Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского
Россия, 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23

²Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики Российской академии наук»
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

(Статья поступила 25.08.2017; Подписана в печать 19.09.2017)

Рассматривается задача пространственной фильтрации многомодового сигнала, представляющего собой суперпозицию конечного числа регулярных мод со случайными амплитудами и принимаемого антенной решеткой (АР) на фоне помех, содержащих интенсивную компоненту модового спектра. В качестве характеристики эффективности метода фильтрации определен коэффициент усиления (выигрыш) АР. Численное моделирование выполнено для случая вертикальной АР, расположенной в океаническом волноводе, в предположении взаимно-некоррелированных модовых амплитуд полезного сигнала и помех. Проведено сравнение оптимального метода пространственной фильтрации с эвристическим методом согласованной фильтрации отдельных мод. Показано, что величина коэффициента усиления АР варьирует в широких пределах в зависимости как от взаимного соотношения спектров интенсивности сигнальных и помеховых мод, так и разрешающей способности АР в модовом пространстве.

PACS: 43.60.Fg, 43.30.Bp

УДК: 534.87:551.463.2

Ключевые слова: многомодовый сигнал, случайно-неоднородный океанический волновод, коэффициент усиления антенны, пространственная фильтрация.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных вопросов эффективности протяженных приемных антенн в реальных океанических волноводах является вопрос о влиянии статистических эффектов дальнего распространения полезного сигнала, с одной стороны, и анизотропных помех, спектр которых может в различной степени перекрывать пространственный спектр полезного сигнала, с другой. В совокупности учет этих двух физических аспектов приводит к постановке задачи анализа методов пространственной обработки частично-когерентных сигналов дискретного спектра на фоне помех, содержащих интенсивную компоненту в этом же спектре. В наибольшей степени такая постановка отвечает вертикальному расположению АР в волноводе, когда волновые поля удаленных источников сигнала и помех (включая собственные шумы океана) формируются на входе АР набором одних и тех же распространяющихся мод. Это означает не только расширение пространственных спектров сигнала и помех, но возможность их «наложения» (частичного и даже полного), что делает принципиальным вопрос о разрешающей способности АР в модовом пространстве.

Общий анализ задачи оптимизации пространственной обработки сигналов в такой постановке был начат в работах [1, 2] и развит затем в работах [3, 4] применительно к реалистичным условиям дальнего рас-

пространения звука в волноводах глубокого океана. В недавней работе [5] выполнен анализ эффективности более простой эвристической схемы обработки в канале мелкого моря, которая заключается в выборе весового вектора АР, совпадающего с отдельными модами волновода, т.е. схемы согласованной модовой фильтрации. В данной работе это исследование продолжено с акцентом на сравнительном анализе различных методов модовой фильтрации.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Предполагается, что пространственные распределения на входе АР полезного сигнала $\mathbf{s}$ и помех $\mathbf{n}$ 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 распределения (модовые векторы), a_m и b_m — модовые амплитуды сигнала и помех, соответственно (случайные функции времени); $\mathbf{n}_0$ — шумы сплошного спектра, полагаемые в дальнейшем пространственно-белым шумом единичной мощности; все «входные» векторы имеют размерность $(N \times 1)$, где N — число элементов АР. Простая в своей формулировке модель (1) позволяет продвигаться достаточно далеко в плане анализа задач обработки, специфичных для вертикальных АР [1, 2, 5]. С практической точки зрения, особый интерес представляют ситуации, когда сигнал и помехи формируют-

*E-mail: labutya@mail.ru

†E-mail: almal@appl.sci-nnov.ru

‡E-mail: lexsmial@ipfran.ru

ся достаточно большим количеством мод, однако, распределения их интенсивностей по модам существенно различны. В такой ситуации можно ожидать значительного выигрыша АР при «правильной» фильтрации мод сигнального поля.

Опуская промежуточные матричные преобразования, связанные с переходом из «пространства элементов» размерности N в «модовое пространство» размерности M , приведем общие выражения для отношения сигнал/шум (ОСШ) на выходе АР с некоторым (произвольным) весовым вектором $\mathbf{W}$ и на выходе отдельного приемника единичной чувствительности (по смыслу, ОСШ на входе АР) [5]:

$$\begin{aligned} SNR_{array} &= \frac{\mathbf{f}^+ \mathbf{Q} \mathbf{M}_S \mathbf{Q} \mathbf{f}}{\mathbf{f}^+ (\mathbf{Q} + \mathbf{Q} \mathbf{M}_N \mathbf{Q}) \mathbf{f}}, \\ SNR_{receiver} &= \frac{\mathbf{a}^+ \mathbf{Q} \mathbf{a}}{N + \mathbf{b}^+ \mathbf{Q} \mathbf{b}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{f}$ — вектор, состоящий из коэффициентов разложения вектора $\mathbf{W}$ по модовым векторам (аналогичного разложению (1)); $\mathbf{M}_S = \langle \mathbf{a} \mathbf{a}^+ \rangle$ и $\mathbf{M}_N = \langle \mathbf{b} \mathbf{b}^+ \rangle$ — матрицы взаимных корреляций модовых амплитуд сигнала и помех, соответственно ($\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ — векторы-столбцы модовых амплитуд); $\mathbf{Q} = \mathbf{U}^+ \mathbf{U}$ — матрица ортогональности модовых векторов, которую можно физически интерпретировать как матрицу разрешающей способности АР в модовом пространстве; $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_m]$ — матрица модовой структуры волновода, состоящая из M векторов-столбцов $\mathbf{u}_m$. В предельном случае, когда плотная АР перекрывает весь волновод, матрица $\mathbf{Q}$ становится диагональной, что отвечает случаю полного разрешения модовой структуры. Размерность всех матриц и векторов в выражениях (2) определяется величиной M .

Коэффициент усиления (выигрыш) АР G стандартно определяется нами как отношение величин выходного и входного ОСШ. Эта величина в наибольшей степени характеризует эффективность многоэлементной АР (при заданном весовом векторе) как пространственной фильтра в сравнении с ее одиночным элементом.

В дальнейшем будем полагать, что помехи представляют собой собственные шумы океана, для моделирования которых привлекаются результаты работы [6]. Когерентные свойства полезного сигнала, создаваемого удаленным точечным источником, моделируются нами на основе параметрической модели матрицы межмодовых корреляций, содержащей некоторый внутренний масштаб (число мод, достаточно хорошо коррелированных с данной). В асимптотике больших трасс распространения эта матрица становится диагональной, что соответствует полному затуханию взаимных корреляций амплитуд мод даже для соседних номеров. Диагональные элементы есть интенсивности мод, причем их зависимость от номеров мод также испытывает эволюцию по трассе распространения, обусловленную статистическими эффектами.

Аналогично решению задачи оптимизации весового вектора АР в «пространстве элементов», оптимизация АР в модовом пространстве сводится к определению спектра собственных значений и базиса собственных векторов следующей матрицы [1]:

$$\mu_m \mathbf{f}_m = (\mathbf{I} + \mathbf{M}_N \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{M}_S \mathbf{Q} \mathbf{f}_m, \quad m = 1, 2, \dots, M. \quad (3)$$

Оптимальный модовый вектор $\mathbf{f}_{opt}$ совпадает с вектором, отвечающим максимальному собственному значению μ_1 , а искомый весовой вектор АР находится отсюда как $\mathbf{W}_{opt} = \mathbf{U} \mathbf{f}_{opt}$ (здесь $\mathbf{I}$ — единичная матрица). Эвристический в своей основе метод согласованной модовой фильтрации является аналогом фазированной АР в свободном пространстве, при этом «настройка» АР на разные моды приводит к ее сканированию в модовом пространстве. Соответствующий модовый вектор имеет вид $\mathbf{f} = \mathbf{e}_m$ — вектор, имеющий единственный отличный от нуля и равный единице элемент с номером m . Такому выбору отвечает выражение для коэффициента усиления [5]:

$$G_m = \frac{(\mathbf{Q} \mathbf{M}_S \mathbf{Q})_{mm}}{(\mathbf{Q} \mathbf{M}_N \mathbf{Q})_{mm} + Q_{mm}} \times \frac{\langle \mathbf{b}^+ \mathbf{Q} \mathbf{b} \rangle + N}{\langle \mathbf{a}^+ \mathbf{Q} \mathbf{a} \rangle}. \quad (4)$$

(двойные индексы означают номера матричных элементов).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численное моделирование проведено нами для простейшего случая диагональной матрицы $\mathbf{M}_S$ межмодовых корреляций сигнала (в асимптотике больших дистанций) при различных модовых распределениях интенсивности сигнала $\langle |\mathbf{a}_m|^2 \rangle$. Волновод мелкого моря моделировался изоскоростным каналом с абсолютно жестким дном, известная модовая структура которого позволяет иметь оценки ортогональных свойств мод при различном положении АР по глубине. Глубина канала задавалась равной 100 м, длина волны 10 м (число мод дискретного спектра $M = 20$). Шумы океана также не имеют, в силу множественности их источников, взаимных корреляций по модам, интенсивности $\langle |\mathbf{b}_m|^2 \rangle$ рассчитывались согласно выражениям, приведенным в работе [6]. Этот расчет приводит к монотонно и весьма резко растущей их зависимости от номера моды, т.е. шумы оказываются сосредоточенными в группе высоких мод (это весьма типичная ситуация в диапазоне первых сотен Гц). Следовательно, можно ожидать значительных изменений величин выигрыша АР при всех методах пространственной фильтрации в зависимости от того, в какой именно группе мод оказывается полезный сигнал.

На рис. 1 показаны распределения по номерам мод величин G_m (4) в случае двух существенно разных спектров интенсивностей сигнала — локализованного в низких (А) и средних (Б) модах; характерная ширина

спектра в обоих случаях равна 5. Размер АР здесь выбран равным глубине канала, межэлементное расстояние $d = \lambda/2 = 5$ м (число элементов $N=21$). Горизонтальным пунктиром показана величина $10 \lg N$ — максимальный выигрыш АР при приеме сигнала на фоне белого шума. Для каждого случая рассчитана также величина оптимального выигрыша G_{opt} с использованием выражений (2), (3) (еще две горизонтальные линии). Видно, что в случае хорошего разрешения модовой структуры с помощью протяженной и плотной АР зависимость G_m практически воспроизводит зависимость модовых ОСШ от номера моды, и наилучший результат ожидаемо достигается при локализации сигнала в группе первых (наименее зашумленных) мод. Видно также превышение величины G_m для первых номеров m и, тем более, величин G_{opt} над уровнем $10 \lg N$, которое есть результат эффективного подавления интенсивных шумов при «настройке» АР на эти моды.

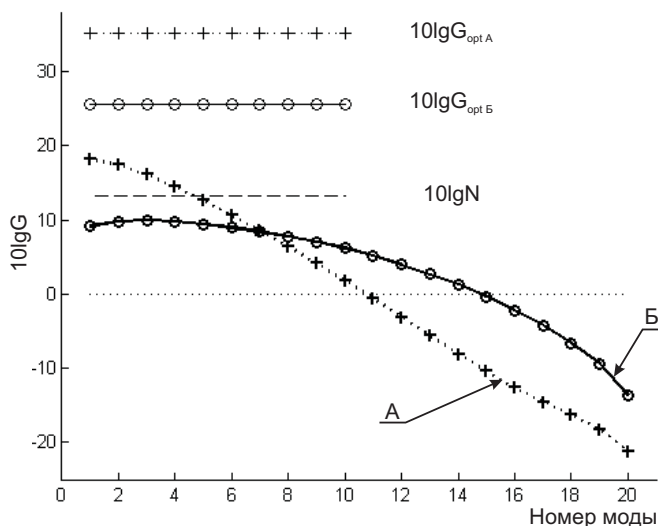


Рис. 1: Выигрыш протяженной вертикальной АР ($N = 21$, $d = \lambda/2$) в случае приема сигнала, интенсивность которого сосредоточена в группе низких (А) и средних (Б) мод, в то время как шумы сосредоточены в высоких модах

Качественно другой сценарий реализуется в случае АР с относительно небольшим числом элементов ($N \ll M$), причем здесь появляется дополнительно зависимость выигрыша АР и от межэлементных расстояний, и от ее расположения по глубине как целого. На рис. 2 зависимости приведены для числа элементов $N = 6$, но с разной «плотностью» размещения (в обоих случаях от поверхности). Видно, что разреженная АР практически не обеспечивает выигрыша при любой обработке, несмотря на «разделение» сигнала и шумов по модам. Это связано именно со слабым разрешением сигнальных и шумовых мод. Короткая и плотная АР, размещенная в верхней области канала, оказалась в состоянии обеспечить такое разрешение, причем максимум G_m заметно сместился вверх по номеру моды

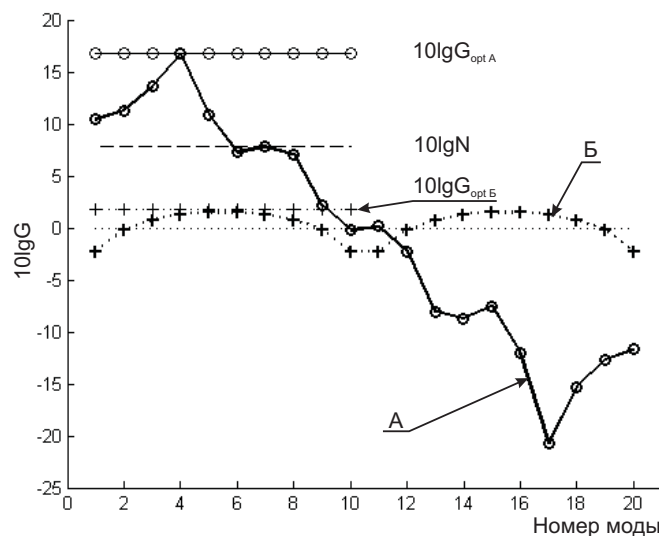


Рис. 2: Выигрыш короткой АР ($N = 6$, $d = \lambda/2$) (А) и разреженной АР ($N = 6$, $d = 2\lambda$) (Б), размещенных от поверхности канала, в случае приема сигнала, сосредоточенного в группе низких мод

(несмотря на уменьшение при этом мощности сигнала). Это связано с тем, что четвертая мода оказалась для такой АР в наибольшей степени ортогональна высоким шумовым модам. Видно при этом, что оптимальный модовый фильтр практически не имеет дополнительного выигрыша, т.е. согласованная фильтрация 4-й моды оказывается квазиоптимальной и при этом простой в своей реализации пространственной обработкой сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретический и численный анализ пространственной обработки многомодового сигнала на фоне модовых помех показывает принципиальное влияние двух физических факторов на величину выигрыша вертикальной АР: (1) степени «перекрытия» модовых спектров сигнала и помех и (2) способности антенны разрешить, в смысле ортогональных свойств, моды с высокими значениями модовых ОСШ. Эти факторы, будучи независимыми, совместно «регулируют» возможность достижения высоких значений антенного выигрыша. В канале с известной структурой мод второй фактор полностью зависит от числа и расположения приемников по глубине. Следовательно, при известном модовом составе шумов океана (в заданном частотном диапазоне и для заданной гидрологии канала) можно заранее оценить помехоустойчивость различных мод и подобрать такое расположение элементов АР, при котором можно добиться максимальных значений коэффициента усиления.

-
- [1] Малеханов А. И., Таланов В. И. Акуст. журн. 1990. **36**, № 5. С. 891.
[2] Малеханов А. И. Акуст. журн. 1992. **38**, № 5. С. 898.
[3] Вдовичева Н. К., Городецкая Е. Ю., Малеханов А. И., Сазонтов А. Г. Акуст. журн. 1997. **43**, № 6. С. 769.
[4] Gorodetskaya E. Yu., Malekhanov A. I., Sazontov A. G., Vdovicheva N. K. IEEE J. Ocean. Eng. 1999. **24**, N2. P. 156.
[5] Labutina M. S., Malekhanov A. I., Smirnov A. V. Physics of Wave Phenomena. 2016. **24**, N2. P. 161.
[6] Kuiperman W. A., Ingenito F. J. Acoust. Soc. Am. 1980. **67**, N6. P. 1988.
-

Simulation of the array gain in an ocean waveguide for the multimode signal against the modal noise

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

¹Lobachevsky University of Nizhny Novgorod. Nizhny Novgorod, 603950, Russia

¹Federal Research Center «Institute of Applied Physics of the RAScience». Nizhny Novgorod, 603950, Russia

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

Spatial filtering of the multimode signal which is assumed to be a superposition of some regular modes with arbitrary amplitudes and is received against the intensive noise background some part of which is the modal noise. The array filtering performance is chosen to be the array gain. Computer simulation is performed for a vertical array arranged in an ocean waveguide under the conditions of mutually-uncorrelated modal amplitudes for the signal and the modal noise. The focus is comparative study of the optimal array filtering and heuristic technique of matched-mode filtering (with enumeration of the mode numbers). The array gain performance is demonstrated to vary in a wide range of its quantity in dependence on both the modal spectra of the signal and noise and array resolution in mode domain.

PACS:

Keywords: multimode signal, random-inhomogeneous ocean waveguide, array gain, spatial filtering.

Received 25 August 2017.

Сведения об авторах

1. Лабутина Мария Сергеевна — аспирант ННГУ; e-mail: labutya@mail.ru.
 2. Малеханов Александр Игоревич — канд. физ.-мат. наук, зав. отделом; тел.: (831) 436-83-52, e-mail: almaal@appl.sci-nnov.ru.
 3. Смирнов Алексей Владимирович — мл. науч. сотрудник; тел.: (831) 436-83-52, e-mail: lexsmial@ipfran.ru.
-