

КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ РЕТКИ В СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНОМ ПОДВОДНОМ ЗВУКОВОМ КАНАЛЕ: ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В КАНАЛЕ КАК ФАКТОРА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

М.С. Лабутина¹⁾, А.И. Малеханов^{1,2)}, А.В. Смирнов²⁾

¹⁾ ННГУ им. Н.И. Лобачевского

²⁾ Институт прикладной физики РАН

Аннотация

Проведено численное моделирование выигрыша вертикальной антенной решеткой, размещенной в случайно-неоднородном канале мелкого моря и принимающей много-модовый сигнал удаленного источника на фоне анизотропных шумов моря. Показано, что положение элементов антенны в канале является фактором, существенно влияющим на величину достигаемого выигрыша, что указывает на возможность специального выбора положения антенны для его повышения. Анализ и моделирование выполнены для двух практически интересных постановок: (1) варьирование по глубине положения антенны как целого при фиксированном межэлементном расстоянии и (2) варьирование межэлементного расстояния при фиксированной глубине первого элемента.

Постановка задачи и основные уравнения

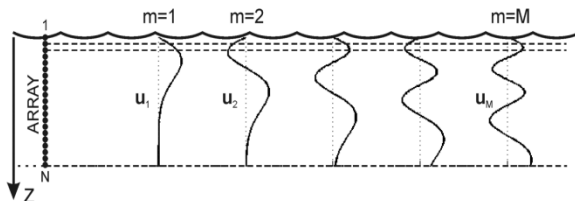


Рис. 1

Предполагается, что пространственные распределения на входе вертикальной АР полезного сигнала \mathbf{s} и помех \mathbf{n} формируются конечным числом M мод дискретного спектра (рис. 1):

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

где векторы \mathbf{u}_m – регулярные модовые распределения (модовые векторы), a_m и b_m – модовые амплитуды сигнала и помех, соответственно; \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 продвинуться достаточно далеко в плане анализа задач обработки, специфичных для вертикальных АР. С практической точки зрения, особый интерес представляют ситуации, когда сигнал и помехи формируются 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):

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

Здесь размерность всех матриц и векторов определяется величиной M , \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 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. Считаем, что помехи представляют собой собственные шумы океана, для моделирования которых привлекаются результаты работы. 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. Её диагональные элементы отвечают интенсивности мод, зависимость которой от номеров мод испытывает эволюцию по трассе распространения, обусловленную статистическими эффектами.

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 пространственного фильтра в сравнении с ее одиночным элементом. При настройке весового вектора на m моду получим:

$$G_m = \frac{(\mathbf{Q} \mathbf{M}_S \mathbf{Q})_{mm}}{(\mathbf{Q} \mathbf{M}_N \mathbf{Q})_{mm} + \mathbf{Q}_{mm}} \times \frac{N + \langle \mathbf{b}^+ \mathbf{Q} \mathbf{b} \rangle}{\langle \mathbf{a}^+ \mathbf{Q} \mathbf{a} \rangle} \quad (3)$$

(двойные индексы означают номера матричных элементов). Для нахождения оптимального весового вектора ранее получено выражение:

$$\mu_m \mathbf{f}_m = (\mathbf{I} + \mathbf{M}_N \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{M}_S \mathbf{Q} \mathbf{f}_m, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

Оптимальный модовый вектор \mathbf{f}_{opt} совпадает с вектором, отвечающим максимальному собственному значению μ_1 , а искомый весовой вектор АР находится отсюда как $\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mathbf{U} \mathbf{f}_{\text{opt}}$ (здесь \mathbf{I} – единичная матрица).

Результаты численного моделирования и выводы

Численное моделирование проведено нами для простейшего случая диагональной матрицы M_S межмодовых корреляций сигнала при различных модовых распределениях интенсивности сигнала $\langle |a_m|^2 \rangle$. 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 $\lambda = 10$ м (число мод дискретного спектра $M = 20$). Шумы океана также не имеют, в силу множественности их источников, взаимных корреляций по модам, интенсивности $\langle |b_m|^2 \rangle$ рассчитывались согласно выражениям, приведенным в работе. 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. Входное ОСШ на элементе АР при моделировании составляет -20 дБ. Моделирование выигрыша ограничено для первых 12 мод, как наиболее информативное, т.к. при больших модах АР резко теряет свою эффективность.

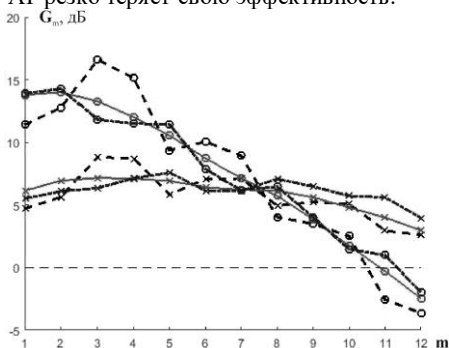


Рис. 2

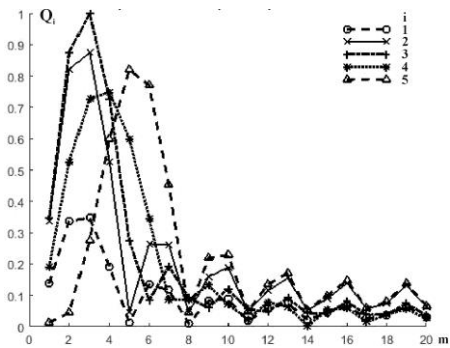


Рис. 3

На рис. 2 показаны распределения по номерам мод величин G_m (3) в случае двух существенно разных спектров интенсивностей сигнала – локализованного в низких ($m_0 = 1$) и средних ($m_0 = 11$) модах; характерная ширина спектра в обоих случаях равна $\sigma = 5$. Рассматривается короткая (число элементов $N = 7$) плотная АР (межэлементное расстояние $d = \lambda/2 = 5$ м), верхний конец которой размещен на разной глубине волновода ($Z_1 = 0$ м – пунктирная линия, $Z_1 = 35$ м – сплошная линия и $Z_1 = 70$ м – штрих-пунктирная линия). Для каждого случая рассчитана величина оптимального выигрыша G_{opt} с использованием выражений (2), (4). В зависимости от глубины положения АР, ей ортогонализируются разные группы мод (рис. 3, номера кривых на графике соответствуют номеру моды, зависимость коэффициента ортогональности которой рассматривается). В случае приповерхностной АР, не смотря на то, что наиболее энергонесущей модой сигнала является 1 или 11 мода, эффективно принимаются 3 и 4 моды, т.к. они не ортогональны группе низких мод сигнала, и ортого-

нальны высоким модам помехи. В случае же размещения АР в центре канала или у дна, АР, настраиваясь на первые моды волновода, принимает также неортогональные высокие моды помехи. При приеме АР сигнала с сильной средней энергонесущей модой ($m_0 = 11$) выигрыш практически не изменяется за счет относительно хорошей ортогональности мод и плавного увеличения интенсивности сигнала и помехи с ростом номера моды. Прием сигнала с настройкой АР на отдельные моды канала является квазиоптимальным, и лишь в некоторых случаях можно найти удачное положение короткой антенны, когда потеря выигрыша составляет единицы децибел. В нашем моделировании при расположении АР у поверхности эта разница составляет ~ 2 дБ, тогда как при других положениях она меняется от 5 до 11 дБ.

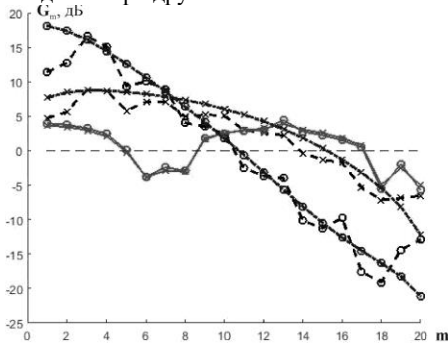


Рис. 4

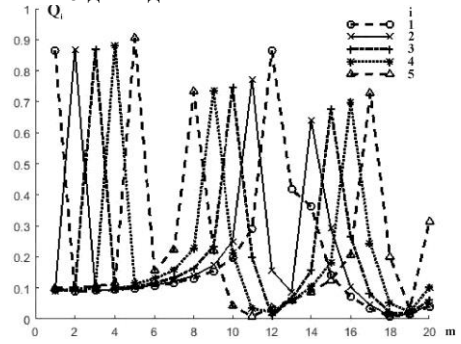


Рис. 5

Качественно другой сценарий реализуется в случае приповерхностной АР с изменяемым размером межэлементного расстояния. На рис. 4 приведены зависимости для числа элементов $N = 7$ с разной «плотностью» размещения ($d = \lambda/2$ – пунктирная линия и $d = 13\lambda/8$ – сплошная линия) и для плотной АР, перекрывающей весь волновод ($N = 21$, $d = \lambda/2$ – штрих-пунктирная линия). При полном перекрытии канала плотной АР все моды становятся ортогональными. В этом случае при настройке АР на низкие моды волновода и приеме низкомодового сигнала достигается максимальный выигрыш, хотя по сравнению с оптимальной настройкой АР потеря усиления составляет 16 дБ. В случае короткой АР, как отмечалось ранее, выигрыш при настройке на 3 и 4 моду максимален, однако, он превышает выигрыш длинной плотной АР при настройке на те же моды. Это объясняется тем, что поочередно настроенная короткая АР на эти моды принимает и другие низкие сигнальные моды (рис. 5, обозначения аналогично как и на рис. 3). В случае полного перекрытия волновода редкой АР ортогональные свойства принимаемых мод начинают играть более существенную роль. Варьирование спектра сигнала практически перестает влиять на выигрыш такой АР, и ее эффективность заметно снижается (до единиц дБ). При рассмотрении ортогональности мод показано, что группа низких мод (1-4) не ортогональны группе средних мод (9-16) и практически ортогональны остальным модам, которые между собой не ортогональны. Поскольку модовый спектр интенсивности помехи неравномерен, то выигрыш АР по всем модам снижен, а его локализация в высоких модах приводит к потере усиления АР в группе мод (5-8). Отметим также, что первая

мода не ортогональна 12 и 13 моде интенсивность помехи, в которых незначительна, поэтому значение выигрыша разреженной АР близко к выигрышу короткой плотной АР.

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 «перекрывания» 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.