

## Моделирование отклика протяженной антенны на частично-когерентный многомодовый сигнал в подводном звуковом канале

А. И. Малеханов<sup>1,2\*</sup> А. В. Смирнов<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского, Россия, 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23

(Статья поступила 11.11.2014; Подписана в печать 20.11.2014)

В данной работе выполнено моделирование функции отклика вертикальной антенной решетки на многомодовый акустический сигнал в случайно-неоднородном океаническом волноводе в предположении, что принимаемый сигнал представляет собой сумму нормальных волн с заданным спектром волновых чисел и случайными амплитудами, имеющими некоторый (зависящий от дистанции) конечный масштаб взаимных корреляций. Проведена количественная оценка влияния основных физических характеристик сигнала, таких как спектр интенсивностей мод, спектр волновых чисел, масштаб межмодовых корреляций, на коэффициент усиления антенны при различных моделях океанического шума (сплошного и дискретного модового спектра). Полученные результаты позволяют провести сравнительный анализ влияния условий распространения многомодового сигнала в подводном канале на эффективность протяженной антенны.

PACS: 43.30.+m; 43.60.Cg; 43.60.Fg УДК: 534.21

Ключевые слова: случайно неоднородный подводный звуковой канал, вертикальная протяженная антенна, пространственная когерентность, дискретный модовый спектр, межмодовые корреляции, функция отклика и выигрыш антенны.

### ВВЕДЕНИЕ

Начиная с первых результатов, полученных Я. С. Шифрином еще в 1960-х годах [1], статистическая теория антенн традиционно ориентирована на исследование характеристик эффективности протяженных антенн с учетом случайных флуктуаций как в ней самой, так и в окружающей среде, в которой распространяется сигнал удаленного источника. Классическая постановка задачи в этой области касается исследования диаграммы направленности (ДН) и коэффициента усиления (выигрыша) антенной решетки (АР) в присутствии случайных искажений амплитудно-фазового распределения АР и (или) волнового фронта полезного сигнала (как правило, плоской или сферической волны).

В связи с применением гидроакустических антенных систем больших волновых размеров, актуальность этих проблем в последние десятилетия значительно возросла из-за необходимости учета основных особенностей дальнего распространения звука в реальных условиях подводного звукового канала (ПЗК). Этими особенностями являются, как хорошо известно, (1) дискретизация пространственного (модового, лучевого) спектра принимаемого сигнала и (2) ослабление взаимных корреляций модовых амплитуд, а вместе с этим и пространственной когерентности сигнала, с ростом дистанции. Последний эффект является следствием многократного рассеяния звука на случайных

неоднородностях в толще канала и (или) на случайно взволнованной поверхности. Наиболее интересным и важным в этом контексте случаем является случай таких размеров АР, когда они превосходят пространственный масштаб когерентности сигнала.

Различные аспекты этой задачи обсуждались ранее во многих работах, в том числе, анализировались диаграммы направленности АР в регулярном и случайно-неоднородном ПЗК, эффекты влияния когерентности многомодового сигнала на эффективность его пространственной обработки (выходное отношение сигнал/шум, коэффициент усиления АР) (см., например, [2–8]). Целью данной работы является численная демонстрация критического влияния на ДН и выигрыш вертикальной АР таких ключевых (непосредственно определяемых каналом распространения) характеристик многомодового сигнала как вид спектра волновых чисел мод, вид спектра интенсивностей сигнальных мод и масштаб межмодовых корреляций (взаимных корреляций модовых амплитуд). Кроме того, особое внимание мы уделяем моделированию присутствия на входе АР модовых шумов океана, что наиболее характерно именно для вертикального размещения приемной антенны в ПЗК.

### 1. МОДЕЛЬ СИГНАЛА

Будем полагать, что приемная АР линейной конфигурации расположена в вертикальной плоскости ПЗК, который характеризуется спектром поперечных волновых чисел и амплитудными распределениями отдельных мод (для заданной несущей частоты сигнала). Приходящий на антенну сигнал от точечного источ-

\*E-mail: almal@hydro.appl.sci-nnov.ru

†E-mail: exsmial@mail.ru

ника, расположенного достаточно далеко от антенны, представляется в виде суперпозиции конечного числа мод дискретного спектра:

$$S(z) = \sum_{m=1}^M a_m \phi_m(z), \quad (1)$$

где  $z$  — ось координат вдоль линейной АР по глубине канала, направленной от поверхности ( $z = 0$ ) к дну ( $z = H$ );  $M$  — число распространяющихся мод дискретного спектра;  $a_m$  — амплитуда  $m$ -ой моды (зависящая от целого набора параметров задачи);  $\phi_m(z)$  — волновая функция  $m$ -ой моды. Модовая структура сигнала, как и спектр поперечных волновых чисел  $\gamma_m$ , полностью определяются, как хорошо известно, выбором модели ПЗК (профилем скорости звука по глубине, включая донные слои). Для упрощения дальнейшего анализа и акцента на влияние отмеченных выше физических факторов распространения сигнала в канале, будем полагать, что вертикальная АР, имеющая число элементов  $N$  и межэлементное расстояние  $d = \lambda/2$ , перекрывает волновод по всей толщине водного слоя. Это предположение приводит, очевидно, к высокой степени ортогональности модовых функций на входе АР, в то время как уменьшение ее размеров — напротив, к частичной ортогональности мод, т. е. к ограничению разрешающей способности АР в модовом пространстве и появлению дополнительного физического фактора, связанного с положением такой АР в канале.

Амплитуды сигнальных мод предполагаются случайными функциями времени, зависящими как от координат источника, так и от эффектов распространения (затухания мод, трансформации модового спектра по трассе). В общем случае они могут быть рассмотрены в виде:  $a_m = A_m \exp\{-ih_m r - \alpha_m\} \exp\{i\xi_m(r, t)\}$ , где величина  $A_m$  определяется глубиной источника и его интенсивностью (фактически, ее нормировкой), а также цилиндрическим расхождением для заданного расстояния до источника  $r$ ;  $\alpha_m$  — коэффициент затухания  $m$ -ой моды, вызванный взаимодействием звука с дном и (или) рассеянием в другие моды, и  $\xi_m(r, t)$  — случайный фазовый сдвиг, возникающий в результате рассеяния звука на случайных объемных и/или поверхностных неоднородностях канала распространения. Регулярные фазовые сдвиги, разные для разных мод из-за разницы продольных волновых чисел  $h_m$ , приводят к формированию сложной интерференционной картины звукового поля многомодового сигнала, в то время как случайные фазовые сдвиги — к ослаблению взаимных корреляций модовых амплитуд (в дальнейшем называемыми межмодовыми корреляциями) и затуханию (сглаживанию) интерференционной картины [9]. Результирующая функция пространственных корреляций (функция когерентности) сигнала (1) на входе АР выражается в общем случае как

$$R_S(z_1, z_2) = \langle S(z_1) S^*(z_2) \rangle = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \langle a_m a_n^* \rangle \phi_m(z_1) \phi_n^*(z_2), \quad (2)$$

где  $\langle \dots \rangle$  означает статистическое усреднение,  $a^*$  — комплексное сопряжение.

В недавних работах [10,11] модель сигнала (1), (2) была использована нами для моделирования функции когерентности многомодового сигнала в зависимости от подчеркнутых выше физических факторов: вида спектра волновых чисел мод (фактически, для различных профилей скорости звука в канале), вида спектра интенсивности сигнальных мод (локализованного в группе мод с различными номерами), масштаба межмодовых корреляций (числа мод, амплитуды которых достаточно хорошо коррелированы с амплитудой данной моды). Последний из перечисленных факторов моделировался нами с помощью эвристической модели [7,10,11]:

$$\langle a_m a_n^* \rangle = \sqrt{|a_m|^2 |a_n|^2} e^{-\frac{D_{mn}}{2}}, \quad D_{mn} = \frac{(m-n)^2}{\Delta^2},$$

где параметр  $\Delta$  есть масштаб межмодовых корреляций. Эта простая модель опирается на ряд теоретических работ, анализирующих распространение звука на большие расстояния в океанических волноводах (см., например, [9]).

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА АНТЕННЫ

Для численного анализа влияния тех же факторов на отклик протяженной АР мы используем стандартное определение функции отклика (фактически, среднего уровня мощности сигнала на выходе сумматора АР) в виде следующей квадратичной формы:

$$D(\theta) = \sum_{j=1}^N S(z_j) F(z_j), \quad (3)$$

$$\langle D^2(\theta) \rangle = \mathbf{F}^T \langle \mathbf{S}\mathbf{S}^+ \rangle \mathbf{F}^* = \mathbf{F}^T \mathbf{R}_S \mathbf{F}^*.$$

Здесь сигнальный вектор  $\mathbf{S}$  получен из уравнения (1) для заданного набора положений элементов АР  $z_j$ ; вектор  $\mathbf{F}$  есть произвольное амплитудно-фазовое распределение (АФР) АР; матрица  $\mathbf{R}_S$  есть матрица пространственных корреляций сигнала, получаемая из уравнения (2). Ниже мы используем в качестве АФР векторы, соответствующие фазированной (в произвольный угол) антенне  $F_j = \exp\{-iz_j k \sin \theta\}$ , где  $k$  — волновое число, и настройке АР на заданную  $m$ -ую моду ( $\mathbf{F}_m = \phi(z)$ ). Выбор последнего сделан нами с целью демонстрации эффекта существенной зависимости отклика (3) и коэффициента усиления антенны от конкретного выбора АФР, особенно в случае некоторого характерного распределения сигнала и шумов океана по модам.

Расчет функции отклика АР (3) на сигнал вида (1), (2) проведен нами для трех различных типов ПЗК (изоскоростного, параболического и приповерхностного), которые заметно отличаются друг от друга спектрами волновых чисел, различными спектрами интенсивности сигнальных мод и различными значениями масштаба межмодовых корреляций сигнала. Для сравнения откликов в различных ситуациях мы считали постоянными следующие параметры: число сигнальных мод ( $M_s = 20$ ), которые отсчитываются от первой моды, длину волны ( $\lambda = 10$  м), длину антенны ( $L_A = 1000$  м) и соответствующее число приемных элементов ( $N = 201$ ), при этом параметры волноводов (глубина, общее число распространяющихся мод) не фиксировались и подбирались в соответствии с заданными параметрами и условием перекрытия антенной водной толщи ПЗК.

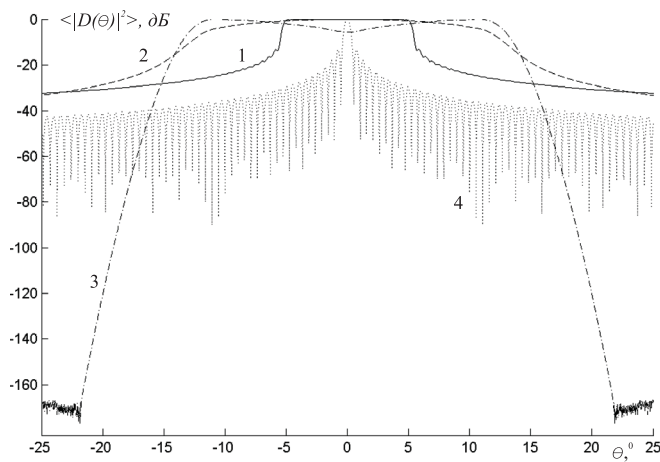


Рис. 1: Отклик АР в изоскоростном (1), приповерхностном (2), параболическом (3) каналах и в свободном пространстве (4)

На рис. 1 показаны отклики фазированной антенны в различных каналах (кривые 1–3, отвечающие изоскоростному, приповерхностному и симметричному параболическому профилю скорости звука, соответственно) в случае равномерного спектра интенсивностей сигнальных мод и в свободном пространстве (кривая 4). Видно, что функция отклика имеет симметричный вид относительно оси канала (антенны). Это связано, очевидно, с интерпретацией мод в виде двух плоских волн с симметричными углами прихода относительно фазового центра АР. Во-вторых, отклик антенны существенно зависит от вида спектра волновых чисел — от того, насколько сильно он неэквилистен, что полностью аналогично отклику горизонтальной АР [10]. Заметно разная ширина главного лепестка функции также связана с различным заполнением углового спектра первыми двадцатью модами сигнала, что также зависит от вида спектра поперечных волновых чисел:  $\theta_m = \pm \arcsin(\gamma_m/k)$ .

Далее, на примере эквидистантного спектра попе-

речных волновых чисел (изоскоростной канал) продемонстрируем влияние неравномерности спектра интенсивности мод на функцию отклика вертикальной АР (рис. 2). Видно, что в зависимости от возбуждения той или иной группы мод отклик имеет различное угловое распределение. Отметим, что чем больше размер АР, тем больше мод из дискретного спектра она способна разрешить, и наиболее разрешимыми модами являются моды, наиболее отдаленные от других в пространстве волновых чисел («разреженные» моды). Поскольку предельная длина АР не может превысить глубину волновода, то даже при максимальной длине, без специального выбора АФР (специальной обработки сигнала) нельзя выделить отдельные моды, в отличие от горизонтальной АР, не имеющей теоретических ограничений на размер и, следовательно, разрешение мод дискретного спектра.

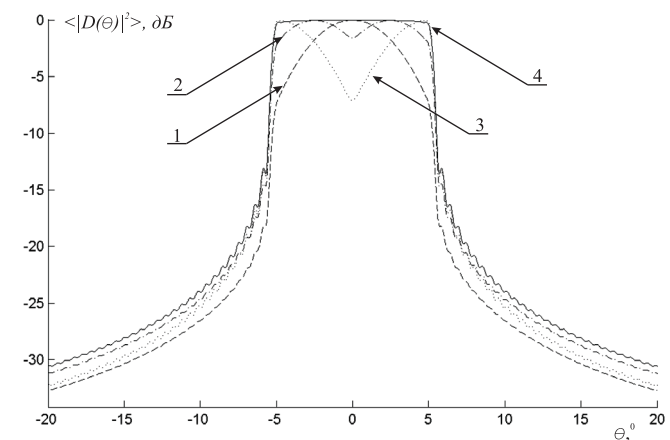


Рис. 2: Отклик АР в изоскоростном канале при локализации интенсивности сигнала в низких (1), средних (2) и высоких модах (3), и равномерно во всех модах (4)

Наконец, учет межмодовых корреляций также приводит к существенной зависимости отклика АР от этого параметра, причем их возрастание приводит к формированию многолепестковой функции отклика, аналогично отклику в регулярном (без случайных неоднородностей) канале. Ключевым определяющим параметром является значение параметра  $\Delta$ , который в нашей модели характеризует масштаб межмодовых корреляций (равен числу мод, корреляции которых с данной достаточно велики, на уровне не менее  $e^{-1}$  [10,11]).

На рис. 3 этот эффект демонстрируется на примере канала с неэквилистенным спектром волновых чисел (приповерхностный канал). Дополнительное сужение спектра модовых интенсивностей (на данном рисунке их спектр равномерный), очевидно, приведет к более высокому сходству отклика с аналогичным для свободного («одномодового») пространства.

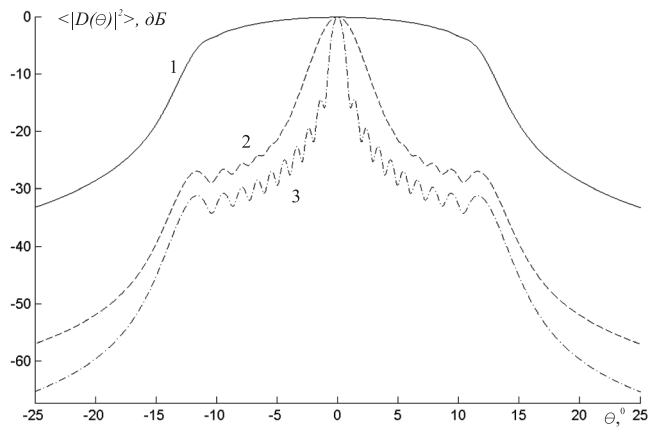


Рис. 3: Отклик АР при неэквидистантном спектре волновых чисел, равномерном спектре интенсивностей мод, взаимно-некоррелированных (1) и частично-коррелированных модах:  $\Delta = 3$  (2),  $\Delta = 20$  (3)

### 3. ВЫИГРЫШ АНТЕННЫ

Коэффициент усиления АР определяется нами обычным образом как отношение выходного отношения сигнал/шум (ОСШ) к входному, при этом последнюю величину мы определяем как отношение средних по элементам интенсивностей сигнала и шумов (это уточнение существенно в случае зависимости интенсивностей по глубине):

$$G = \frac{\mathbf{F}^T \mathbf{R}_S \mathbf{F}^* / (\mathbf{F}^T (\mathbf{I} + \mu \mathbf{R}_M) \mathbf{F}^*)}{\sum_{m=1}^M I_{Sm}(z_0) / \left(1 + \mu \sum_{m=1}^M I_{Nm}(z_0)\right)} \quad (4)$$

где  $\mathbf{I}$  — единичная матрица, относящаяся к пространственным корреляциям изотропного шума и собственным шумам в каналах АР (единичной мощности);  $\mathbf{R}_M$  — матрица пространственной корреляции модовых шумов океана, для описания которой мы используем известные модели шумов сплошного модового спектра [12] и дискретного модового спектра [13];  $\mu$  — коэффициент отношения мощности модового к белому шуму;  $I_{Sm}(z_0)$  и  $I_{Nm}(z_0)$  — интенсивности  $i$ -ой моды на некоторый выбранной глубине  $z_0$  в поле сигнала и модового шума соответственно.

Для демонстрации выигрыша вертикальной АР в случайно-неоднородном канале с учетом модового шума, обусловленного наличием шумовых источников в приповерхностном слое канала, воспользуемся моделями функции пространственной когерентности шума, предложенными в работах [12] и [13]. Обе модели примечательны неравномерным, растущим с величиной угла от оси канала, угловым спектром шума, возбуждаемого с поверхности ПЗК. При этом модель [13] позволяет учесть в явном виде дискретизацию модового спектра шума, характерную для относительно низких частот в диапазоне сотен Гц.

Для анализа коэффициента усиления  $G$  (4) мы выбрали вектор АФР  $\mathbf{F}_m$  в соответствии с вертикальным профилем конкретной моды по глубине. Моделирование было выполнено конкретно для изоскоростного канала, у которого на всей глубине интенсивность сигнала и помех практически одинакова (для случая взаимно-некоррелированных мод), в силу чего ОСШ отдельного приемника не зависит от глубины. Использовались следующие параметры: длина антенны  $L_A = 100$  м, число элементов  $N = 21$ , число мод  $M_S = 20$ , длина волны  $\lambda = 10$  м.

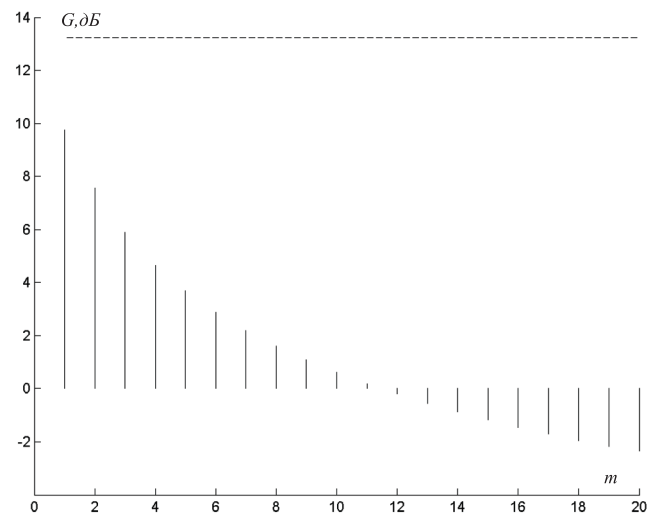


Рис. 4: Выигрыш АР при приеме сигнала с минимальным масштабом когерентности на фоне шума, описываемого [12]. Пунктир — уровень  $10 \lg N$

Первоначально рассматривалась модель сигнала с минимальной для заданного числа сигнальных мод длиной когерентности (эквидистантный спектр поперечных волновых чисел, равномерный спектр модовых интенсивностей, отсутствие межмодовых корреляций) при уровне совокупной мощности шума, равном среднему уровню интенсивности сигнала. На рис. 4, 5 показан выигрыш АР для модели шума сплошного модового спектра [12] и дискретного спектра [13], соответственно. Горизонтальным пунктиром показан уровень усиления АР, отвечающий приему когерентного сигнала на фоне белого шума в свободном пространстве ( $10 \lg N$ ). Видна существенная и качественно ожидаемая зависимость выигрыша АР от выбора АФР в виде той или иной моды, что связано, очевидно, с различным распределением сигнала и шума по модам.

По мере увеличения когерентности многомодового сигнала выигрыш АР будет только возрастать, что показано на рис. 6. В качестве модели шума здесь выбрана модель модового шума [13], а в качестве модели сигнала — модель сигнала с некоррелированными модами, но уже с неравномерным спектром, локализованным в области низких мод. Таким образом, сигнал и шум в модовом пространстве разделены здесь в боль-

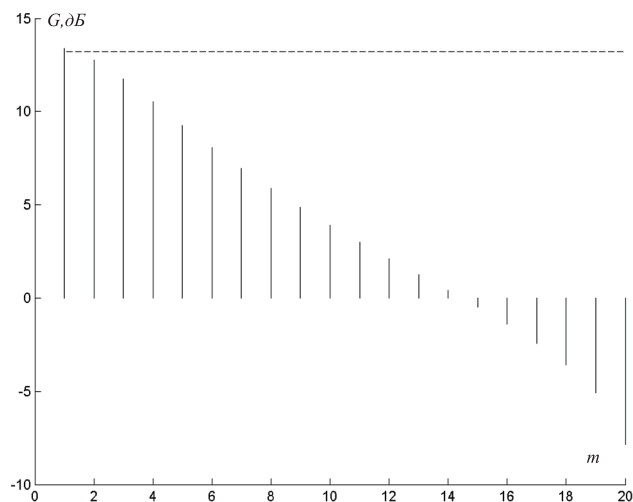
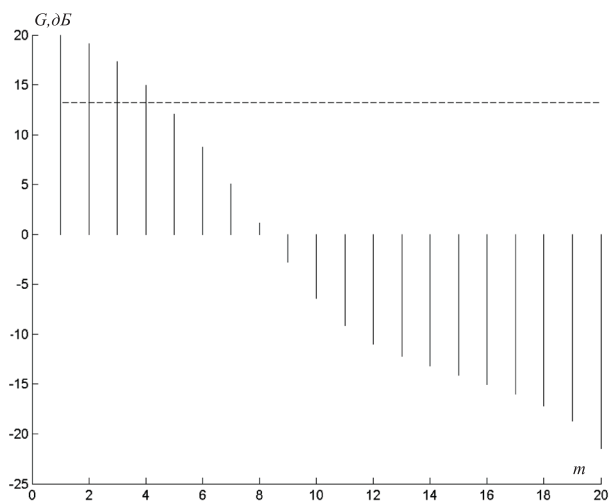


Рис. 5: Аналогично рис. 4, для модели шума [13]

Рис. 6: Выигрыш АР в случае неравномерного (локализованного в низких модах) спектра интенсивности мод на фоне шума, описываемого моделью [13]. Пунктир —  $10 \lg N$ 

шей степени, чем на предыдущих двух рисунках, что привело к дополнительному и заметному возрастанию выигрыша АР именно в случае выбора в качестве ее АФР мод с первыми номерами.

К аналогичному эффекту дополнительного выигрыша АР приводит увеличение масштаба межмодовых корреляций, т.е. рост когерентности сигнала. Таким образом, при приеме относительно маломодового сигнала (в области наименее зашумленных низких мод) и частичном сохранении межмодовых корреляций возникает возможность получения значительного выигрыша АР при соответствующем выборе АФР. В данном случае, АР работает как эффективный модовый фильтр сигнала на фоне модовых помех, что принципиально возможно именно при различных спектрах полезного сигнала и шумов океана в модовом пространстве.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, статистические эффекты распространения сигнала на большие расстояния в случайных ПЗК приводят к значительному ослаблению когерентности сигнала и искажению отклика сигнала на выходе АР. Благодаря использованию довольно простой и универсальной модели многомодового сигнала, мы продемонстрировали эффекты влияния тех физических факторов, которые наиболее важны в реальных условиях — спектра волновых чисел мод, спектра интенсивностей сигнальных и помеховых мод, масштаба межмодовых корреляций полезного сигнала. Все эти факторы непосредственно влияют на формирование функций пространственной когерентности сигнального и шумового полей на входе АР, а «через» них — на выходные характеристики протяженной АР. В зависимости от конкретных условий распространения сигнала удаленного источника и формирования шумового поля на входе АР эти факторы могут быть оценены на основе имеющейся априорной информации и, следовательно, использованы для получения оценок и сравнительного анализа выигрыша АР в зависимости от выбора АФР.

- [1] Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. (М.: Сов. Радио, 1970).
- [2] Елисеевнин В.А. Акуст. Журн. **42**, № 2. С. 228. (1981).
- [3] Сазонтов А.Г., Фарфель В.А. Акуст. Журн. **36**, № 1. С. 130. (1990).
- [4] Uscinski B.J., Reeve D.E. J. Acoust. Soc. Am. **87**, N 6. P. 2527. (1990).
- [5] Cox H. J. Acoust. Soc. Am. **54**, N 6. P. 1743. (1973).
- [6] Morgan D.R., Smith T.W. J. Acoust. Soc. Am. **87**, N 2. P. 737. (1990).
- [7] Городецкая Е.Ю., Малеханов А.И., Таланов В.И. Акуст. Журн. **38**, № 6. С. 1044. (1992).
- [8] Gorodetskaya E.Yu., Malekhanov A.I., Sazontov A.G., Vdovichewa N.K. IEEE J. Oceanic Eng. **24**, N 2. P. 156. (1999).
- [9] Вировляндский А.Л., Костерин А.Г., Малахов А.Н. Акуст. Журн. **35**, № 2. С. 229. (1989).
- [10] Malekhanov A.I., Smirnov A.V. Proc. of IX Inter. Conf. on Ant. Theory and Techniques. (2013). P. 98.
- [11] Малеханов А.И., Смирнов А.В. Труды XII Всеросс. Конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». (2014). С. 247.
- [12] Cron B.F., Sherman C.H. J. Acoust. Soc. Am. **34**, N 11. P. 1732. (1962).
- [13] Kuperman W.A., Ingenito F. J. Acoust. Soc. Am. **67**, N 6. P. 1988. (1980).



## Modeling large array output of multimodal partially coherent signal in underwater sound channel

A. I. Malekhanov<sup>1,2,a</sup>, A. V. Smirnov<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Applied Physics, Russian Academy of Science, Nizhny Novgorod 603950, Russia*

<sup>2</sup>*Department of Electrodynamics, Faculty of Radiophysics, N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod 603950, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>almal@hydro.appl.sci-nnov.ru, <sup>b</sup>lexsmial@mail.ru*

In this paper we demonstrate numerically vertical array output of multimodal acoustical signal, which propagates in randomly inhomogeneous oceanic waveguide. The input signal is sum of normal waves with given wave number spectrum and random amplitudes, which have some (range-dependent) scale of cross-modal correlations. We obtain quantitative estimator of impact basic physical signal characteristics (intensity spectrum of the signal-carrying modes, wave number spectrum, cross-modal correlations) on the array output in different oceanic noise models (continuous and discrete mode spectrum). The results of this work enable to find dependence large array efficiency on multimodal signal's propagation effect in underwater sound channel.

PACS: 43.30.+m; 43.60.Cg; 43.60.Fg

Keywords: randomly inhomogeneous underwater sound channel, vertical large array, spatial coherence, discrete modal spectrum, cross-modal correlations, array output, antenna gain.

Received 11.11.2014.

### Сведения об авторах

1. Малеханов Александр Игоревич — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, доцент, заведующий отделом «Геофизической акустики» в составе отделения «Геофизических исследований» ИПФ РАН, заместитель руководителя отделения «Геофизических исследований» по научной работе ИПФ РАН; тел.: (831) 436-83-52, e-mail: almal@hydro.appl.sci-nnov.ru.
2. Смирнов Алексей Владимирович — младший научный сотрудник; тел.: (831) 416-47-42, e-mail: lexsmial@mail.ru.