

УДК 534.2

## О КОГЕРЕНТНЫХ СВОЙСТВАХ МНОГОМОДОВОГО СИГНАЛА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ПОДВОДНОГО ЗВУКОВОГО КАНАЛА

© 2014 г.

*М.С. Лабутина,<sup>1</sup> А.И. Малеханов<sup>2,1</sup>*

<sup>1</sup> Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

<sup>2</sup> Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

labutya@mail.ru

Поступила в редакцию 25.09.2013

Представлены результаты модельных расчетов функции пространственной когерентности многомодового сигнала в вертикальной плоскости случайно-неоднородного подводного звукового канала, которые могут быть использованы для анализа работы протяженной вертикальной антенны с учетом статистических эффектов дальнего распространения сигнала. Показано влияние основных физических факторов распространения – распределения интенсивности сигнала по модам и величины межмодовых корреляций.

*Ключевые слова:* подводный звуковой канал, неоднородные среды, матрица межмодовых корреляций, функция пространственной когерентности.

Как известно, в акустике океана используются два основных способа описания акустического поля в условиях дальнего распространения звука: представление поля в виде совокупности лучей, пересекающих точки наблюдения, и в виде совокупности мод волновода. Известно также, что с ростом дистанции и(или) уменьшением несущей частоты предпочтительнее становится модовое представление, поскольку число энергонесущих мод при этом заметно уменьшается [1, 2]. Кроме того, модовый подход позволяет с позиций единого формализма рассматривать формирование сигнального и помехового полей на входе приемной антенны и вопросы их пространственной обработки, в том числе, оптимальной [3–5]. В силу этого анализ эффективности работы протяженных антенн в океанических волноводах наиболее часто проводится в рамках модового представления сигнально-помехового поля. В данной работе на его основе проводится численный анализ когерентных свойств сигнала, принимаемого вертикальной антенной в океаническом волноводе – подводном звуковом канале (ПЗК).

Будем полагать, что источник акустических волн находится на некоторой глубине в ПЗК с заданным (в смысле статистического среднего) профилем скорости звука, а на некотором (достаточно большом) расстоянии от него расположена вертикальная (вдоль оси  $z$ ) приёмная антенна. Тогда общее выражение для сигнала на входе антенны можно записать в виде суперпо-

зиции конечного числа распространяющихся мод дискретного спектра:

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

где  $a_m$ ,  $U_m$  – амплитуды мод в поле сигнала (случайные функции времени) и модовые функции ПЗК (регулярные амплитудно-фазовые распределения по апертуре антенны) соответственно,  $M$  – число мод дискретного спектра.

В силу случайности модовых амплитуд, обусловленной многократным рассеянием сигнала на случайных неоднородностях океанической среды и(или) границах канала, поле (1) также имеет случайный характер и представляет собой результат интерференции значительного числа частично-коррелированных пространственных гармоник (мод). Его статистические свойства описываются функцией пространственной когерентности (ФПК), которая, в рамках представления (1), будет иметь вид

$$R_{ij}(\vec{r}) = \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^M \langle a_n a_m^* \rangle U_n(z_i) U_m^*(z_j), \quad (2)$$

где индексы  $i, j$  относятся к координатам точек наблюдения вдоль антенны (фактически, они есть номера приемных элементов). Совокупность величин  $\langle a_n a_m^* \rangle$  образует матрицу межмодовых корреляций (ММК), имеющую размерность  $M \times M$ . Её диагональные элементы (интенсивности мод) и недиагональные элементы (собственно межмодовые корреляции) опре-

деляются механизмами рассеяния сигнала в случайно-неоднородном канале и существенно зависят от дистанции [6–9]. Что же касается модовых функций  $U_m(z)$ , то они полностью определяются регулярными свойствами волновода (профилем скорости звука и условиями на границах). Например, в модельном случае волновода с однородным заполнением, абсолютно жёстким дном и абсолютно мягкой поверхностью эти функции имеют хорошо известный вид:  $U_m(z) = \sin \gamma_m z$ , где  $\gamma_m = (m - 0.5)\pi/H$  [1, 2]. Эта модель канала используется нами в дальнейших расчетах.

Для предварительных аналитических расчетов воспользуемся приближением взаимно-некоррелированных мод. Это приближение применимо в том случае, когда в процессе распространения сигнала взаимные корреляции модовых амплитуд практически отсутствуют даже для соседних мод, что физически отвечает, например, дальнему распространению в приповерхностном канале в условиях многократного рассеяния на взволнованной морской поверхности. В этом приближении ММК становится диагональной. Сделаем дополнительно упрощающее предположение о равномерности спектра интенсивности мод, т.е. все диагональные элементы ММК равны между собой ( $\langle |a_n|^2 \rangle = \text{const} = I_0$ ) и не зависят от номера моды. Переход от дискретного спектра интенсивностей мод к непрерывному, что допустимо при большом количестве мод  $M \rightarrow \infty$ , позволяет получить аналитическое выражение для ФПК:

$$R(z_1, z_2) = \frac{I_0}{M} \frac{H}{2\pi(z_1 - z_2)} \times \left[ \sin\left(\frac{\pi}{H}(z_1 - z_2)\left(M - \frac{1}{2}\right)\right) - \sin\left(\frac{\pi}{2H}(z_1 - z_2)\right) \right] - \frac{I_0}{M} \frac{H}{2\pi(z_1 + z_2)} \times \left[ \sin\left(\frac{\pi}{H}(z_1 + z_2)\left(M - \frac{1}{2}\right)\right) - \sin\left(\frac{\pi}{2H}(z_1 + z_2)\right) \right]. \quad (3)$$

Здесь  $H$  – глубина волновода,  $z_1$  и  $z_2$  – координаты приемников в антенной решетке.

Для примера на рис. 1 показано поведение ФПК, вычисленной по формуле (3), при расположении одного приемника на глубине 20 м в зависимости от изменения глубины второго приемника, при этом задавались глубина волновода ( $H = 100$  м) и количество распространяющихся мод  $M = 10, 20, 100$  (фактически, длина волны тонального сигнала). Результаты вычислений показывают, что с увеличением числа взаимно-некоррелированных мод в спектре сигнала масштаб его пространственной корреляции уменьшается, что представляется физически очевидным.

Для анализа влияния неравномерности модового спектра (распределения интенсивности сигнала по модам канала) используем эвристическую модель спектра в виде гауссовской кривой с максимумом на первой моде:

$$\langle |a_m|^2 \rangle = a_{\max}^2 \exp\left\{-\frac{m^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (4)$$

Такая модель отражает известный результат теории дальнего распространения звука в ПЗК,

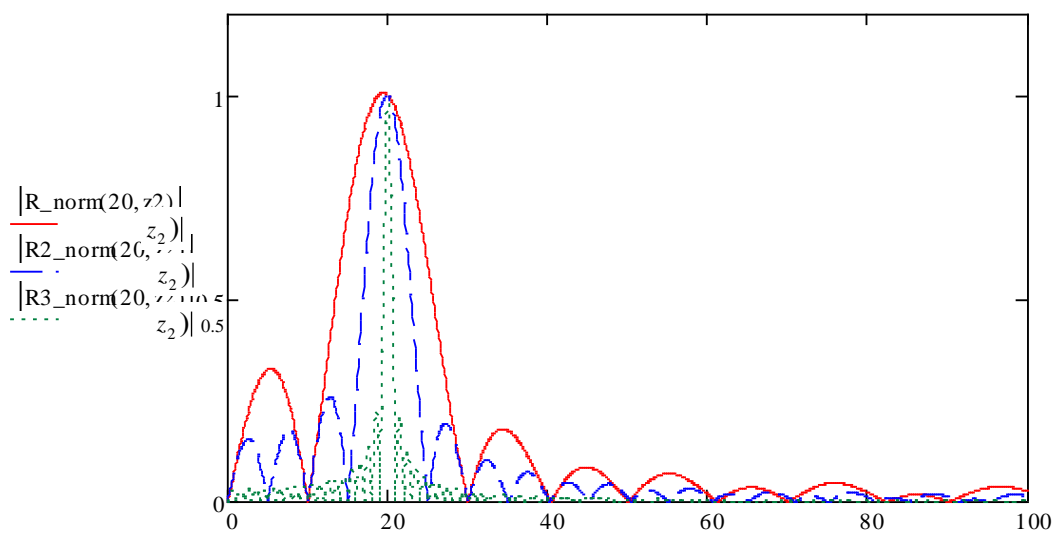


Рис. 1. Функция пространственной когерентности для случаев  $z_2$  взаимно-некоррелированных мод и равномерного спектра интенсивности мод:  $M = 10$  (сплошная линия),  $M = 20$  (штриховая линия) и  $M = 100$  (пунктирная линия)

согласно которому с ростом дистанции «выживают» низкие моды, а сам спектр асимптотически принимает некоторый автомодельный вид монотонно-спадающего распределения [9]. На рис. 2 показано поведение ФПК при различной ширине спектра интенсивности мод (характеризуемой параметром  $\sigma$ ). Видно, что с уменьшением ширины модового спектра сигналов происходит выравнивание уровня осцилляций ФПК и относительный рост когерентности многомодового сигнала в целом.

Перейдем теперь к анализу ФПК для более общего случая частично-коррелированных мод. Для расчетов была выбрана следующая эвристическая модель ММК, отражающая наиболее характерное свойство межмодовых корреляций

– их уменьшение с ростом разницы номеров мод [5–7]:

$$\langle a_m a_n^* \rangle = \sqrt{|a_m|^2 |a_n|^2} e^{-(m-n)^2 / 2\Delta^2}, \quad (5)$$

где параметр  $\Delta$  – некоторый характерный (зависящий от дистанции и частоты) масштаб межмодовых корреляций (число мод, коррелированных с данной). На рис. 3 продемонстрированы результаты вычислений при значениях  $\Delta = 5, 10$  и  $20$ . Видно, что при относительно больших значениях  $\Delta \sim M$  этот параметр практически перестает влиять на когерентность. На рис. 4 модельные ФПК показаны для случая частично коррелированных мод ( $\Delta = 10$ ) при существенно различной ширине модового спек-

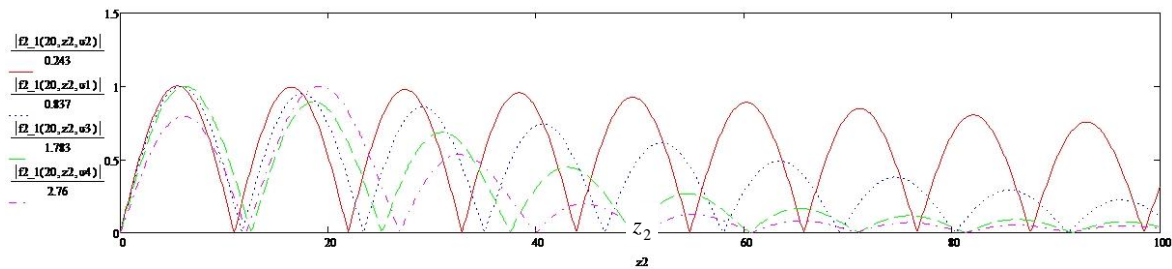


Рис. 2. ФПК для случая взаимно-некоррелированных мод и различной ширине спектра интенсивностей мод:  $\sigma = 0.4$  (сплошная линия);  $\sigma = 1$  (пунктирная линия);  $\sigma = 2$  (штриховая линия);  $\sigma = 4$  (точки-тире)

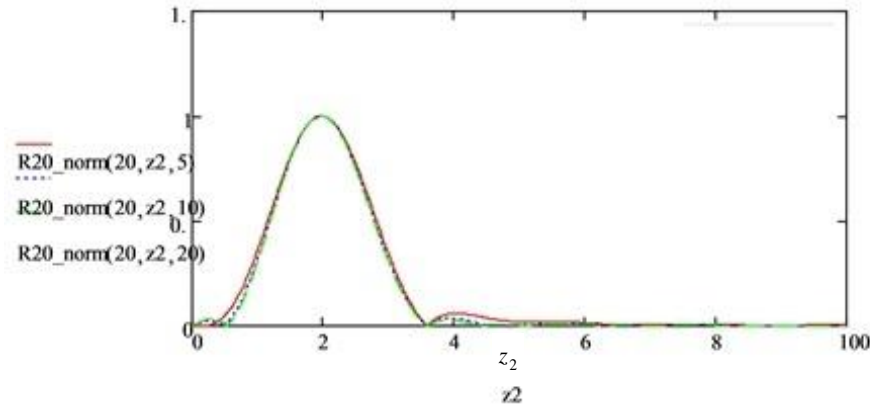


Рис. 3. ФПК для случая частично-коррелированных мод и равномерного спектра интенсивности мод:  $\Delta = 5$  (сплошная линия); 10 (штриховая линия); 20 (пунктирная линия)

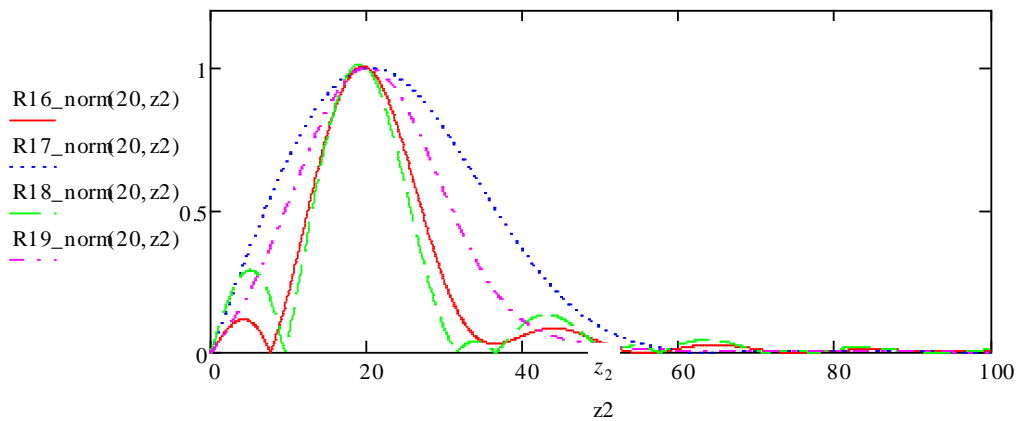


Рис. 4. ФПК для случая частично коррелированных мод и различной ширине спектра интенсивности мод:  $\sigma = 2$  (пунктирная линия); 3 (штрих-пунктирная линия); 7 (сплошная линия); 10 (штриховая линия)

тра сигнала (величине параметра  $\sigma$ ). Видно, что при заданном масштабе межмодовых корреляций (фактически, дистанции до источника) результирующая ФПК существенно зависит от вида модового спектра сигнала.

Таким образом, выполненное численное моделирование показывает, что в условиях дальнего распространения звука в ПЗК когерентные свойства многомодового сигнала существенно зависят от таких физических факторов, как эволюция модового спектра сигнала, приводящая к уменьшению числа энергонесущих мод с ростом дистанции, и взаимная декорреляция модовых амплитуд, приводящая к уменьшению масштаба межмодовых корреляций с ростом дистанции. Эти факторы оказывают, однако, конкурентное влияние на результирующий масштаб пространственной когерентности. Уменьшение числа мод в спектре сигнала повышает его когерентность, в то время как декорреляция мод, напротив, уменьшает. Априорные оценки обоих этих факторов необходимы для адекватного расчета масштаба и уровня пространственной когерентности входного сигнала на приемной антенне.

*Работа выполнена при частичной поддержке гранта государственной поддержки Ведущих научных школ НШ-339.2014.2 и в рамках базовой части государственного задания на выполнение работ в сфере научной деятельности (№ 2014/134).*

#### ON COHERENCE PROPERTIES OF A MULTIMODE SIGNAL IN THE VERTICAL PLANE OF THE UNDERWATER SOUND CHANNEL

*M.S. Labutina, A.I. Malekhanov*

The results of model calculations of the spatial coherence function of a multimode signal in the vertical plane of a randomly inhomogeneous underwater sound channel are presented, which can be used for the analysis of an extended vertical antenna with the account of statistical effects of long-range signal propagation. We show the influence of the main physical factors of propagation: the signal intensity modal distribution and intermode correlation coefficients.

*Keywords:* underwater sound channel, inhomogeneous media, intermode correlation matrix, spatial coherence function.

#### References

1. Brehovskih L.M., Lysanov Ju.P. Teoreticheskie osnovy akustiki okeana. M.: Gidrometeoizdat, 1982. 264 s.
2. Klej K., Medvin G. Akusticheskaja okeanografiya. Per. s angl. M.: Mir, 1980. 580 s.
3. Kaljuzhnyj A.Ja., Krasnyj L.G., Krizhanovskij V.V. Prostranstvennaja obrabotka akusticheskikh

#### Список литературы

1. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. М.: Гидрометеоздат, 1982. 264 с.
2. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 580 с.
3. Калюжный А.Я., Красный Л.Г., Крижановский В.В. Пространственная обработка акустических сигналов в плоско-параллельном волноводе // Акуст. журн. 1984. Т. 30. № 4. С. 495–501.
4. Городецкая Е.Ю., Малеханов А.И., Таланов В.И. Моделирование оптимальной пространственной обработки сигналов в подводных звуковых каналах // Акуст. журн. 1992. Т. 38. № 6. С. 1044–1051.
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. Т. 43. № 6. С. 756–763.
6. Нечаев А.В. Затухание интерференционной структуры акустического поля в океане со случайными неоднородностями // Акуст. журн. 1987. Т. 33. № 3. С. 535–538.
7. Вировлянский А.Л., Костерин А.Г., Малеханов А.И. Флуктуации мод в каноническом подводном звуковом канале // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 2. С. 229–235.
8. Артельный В.В., Раевский М.А. Межмодовые корреляции акустического поля в волноводе со случайными объёмными неоднородностями // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 5. С. 774–778.
9. Артельный В.В., Кукушкин В.Д., Раевский М.А. Об энергетических и корреляционных характеристиках низкочастотных акустических волн в подводных звуковых каналах // Акуст. журн. 1986. Т. 32. № 5. С. 591–597.

signalov v plosko-parallel'nom volnovode // Akust. zhurn. 1984. T. 30. № 4. S. 495–501.

4. Gorodeckaja E.Ju., Malekhanov A.I., Talanov V.I. Modelirovanie optimal'noj prostranstvennoj obrabotki signalov v podvodnyh zvukovyh kanalakh // Akust. zhurn. 1992. T. 38. № 6. S. 1044–1051.

5. Vdovicheva N.K., Gorodeckaja E.Ju., Malekhanov A.I., Sazontov A.G. Kojefficient usilenija vertikal'noj anteny v sluchajno-neodnorodnom okeanicheskom

volnovode // Akust. zhurn. 1997. T. 43. № 6. S. 756–763.

6. Nechaev A.V. Zatuhanie interferencionnoj struktury akusticheskogo polja v okeane so sluchajnymi neodnorodnostjami // Akust. zhurn. 1987. T. 33. № 3. S. 535–538.

7. Virovljanskij A.L., Kosterin A.G., Malahov A.N. Fluktuacii mod v kanonicheskom podvodnom zvukovom kanale // Akust. zhurn. 1989. T. 35. № 2. C. 229–235.

8. Artel'nyj V.V., Raevskij M.A. Mezhhodovye korrelyacii akusticheskogo polja v volnovode so sluchajnymi ob#jomnymi neodnorodnostjami // Akust. zhurn. 1989. T. 35. № 5. S. 774–778.

9. Artel'nyj V.V., Kukushkin V.D., Raevskij M.A. Ob jenergeticheskikh i korrelyacionnykh harakteristikah nizkochastotnykh akusticheskikh voln v podvodnykh zvukovykh kanalah // Akust. zhurn. 1986. T. 32. № 5. S. 591–597.