

УДК 534.6:551.46

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ
КОРРЕЛЯЦИИ ПОЛЯ ИНТЕНСИВНОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО
ШИРОКОПОЛОСНОГО ИСТОЧНИКА В МЕЛКОМ МОРЕ**

© 2008 г.

А.В. Хромов, Е.Ф. Орлов

Нижегородский государственный технический университет

khromov@tecom.nnov.ru

Поступила в редакцию 30.04.2008

Рассматриваются корреляционные свойства интерференционной модуляции поля интенсивности широкополосного акустического источника в мелком море. При этом используется понятие пространственной корреляции регулярной двумерной структуры как интеграла-свертки с усреднением по двум координатам (частота, дистанция). Исследуется зависимость интервала пространственной корреляции от используемого диапазона частот. Рассматриваются возможности определения дистанции до источника широкополосного акустического сигнала в мелком море при помощи одиночного ненаправленного приемника.

Ключевые слова: корреляционные свойства, интерференционная модуляция, поле интенсивности.

Введение

До конца 1970-х годов на основе экспериментальной практики было принято считать, что влияние случайных неоднородностей при распространении звуковых волн в океане настолько велико, что физический смысл в теоретических расчетах и постановках экспериментов по исследованию акустических полей имеют лишь выводы о средних величинах значений интенсивности поля. В этой модели распространения звука моды (лучи) считались некогерентными, что и учитывалось в формировании модели сигнала как сигнала со случайными изменениями амплитуды и фазы. В 1970–80-х годах были выполнены экспериментальные работы [1–3], показавшие существование и временную устойчивость интерференционной структуры пространственно-частотного распределения акустических полей в океане в широкой полосе частот и на значительных дистанциях. Данные экспериментов подтвердили результаты проведенного моделирования для различных районов Мирового Океана. Вопрос о когерентности мод различных номеров был решен. Главный результат – данные об особенностях интерференционной структуры акустических полей в океане. Было показано, что структура регулярна, устойчива во времени и имеет дискретный спектр в пространстве «частот» изменений интенсивности по осям частоты и дистанции. Вопрос изучения регулярных свойств интерференционной структуры акустических полей в океане и возможностей их использова-

ния в гидроакустике является актуальным и имеет практическую значимость. Одним из возможных вариантов прикладного использования свойств интерференционной структуры является создание гидроакустической измерительной системы, позволяющей определять дистанцию до источника широкополосного сигнала в волноводе при помощи одиночного ненаправленного приемника.

**Акустическое поле и интенсивность поля
в модовом представлении**

Поле гармонического источника в однородной по трассе слоистой среде представимо в виде суммы нормальных волн (мод) [4, 5]:

$$P(\omega, r, z, z_{\text{н}}) = \frac{P_0(\omega)}{\sqrt{r}} \sum_{m=1}^M A_m(\omega, r, z, z_{\text{н}}) e^{-i\kappa_m(\omega)r}, \quad (1)$$

где $P(\omega, r, z, z_{\text{н}})$ – комплексная амплитуда поля в точке наблюдения (r, z) на частоте ω , $P_0(\omega)$ – амплитуда сигнала в источнике $(0, z_{\text{н}})$, $\kappa_m(\omega)$ — горизонтальное волновое число моды номера m , z и $z_{\text{н}}$ — заглубления приемника и источника соответственно, $A_m(\omega, r, z, z_{\text{н}})$ — амплитуда моды номера m в точке наблюдения

$$A_m(\omega, r, z, z_{\text{н}}) = B_m \varphi_m(z) \varphi_m(z_{\text{н}}),$$

которая определяется значениями собственных функций φ_m на горизонтах источника и приемника, а также затуханием мод в среде с дистанцией. B_m — нормировочный коэффициент.

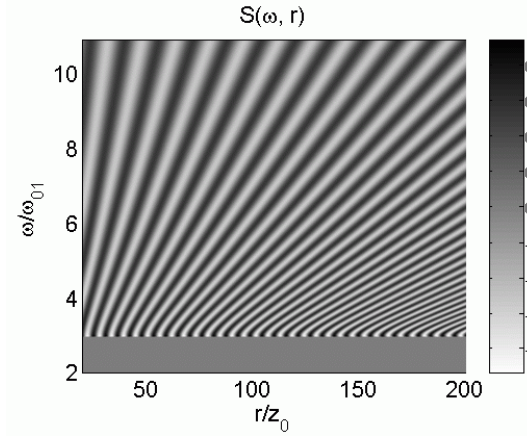


Рис. 1. Интерференционная модуляция поля интенсивности первых двух мод

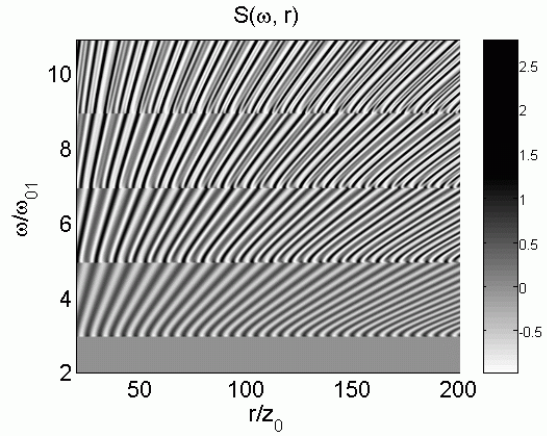


Рис. 2. Интерференционная модуляция поля интенсивности в многомодовом режиме

Применимость модели (1) в реальных условиях мелкого моря получила неоднократное экспериментальное подтверждение.

Интенсивность поля в соответствии с (1) будет

$$I(\omega, r) = P(\omega, r)P^*(\omega, r) = \frac{I_0(\omega)}{r} H_0(\omega, r) [1 + S(\omega, r)], \quad (2)$$

где $I_0(\omega) = P_0(\omega)P_0^*(\omega)$ — интенсивность поля в источнике,

$$H_0(\omega, r) = \sum_{m=1}^M A_m^2(\omega, r) \quad (3)$$

— интенсивность поля, определяемая суммой квадратов амплитуд мод,

$$S(\omega, r) = \frac{1}{H_0(\omega, r)} \sum_{\substack{m, n=1 \\ m \neq n}}^M A_m(\omega, r) A_n(\omega, r) \times \cos[\kappa_{mn}(\omega)r] \quad (4)$$

— интерференционная модуляция поля интенсивности. (В выражениях (2)–(4) и далее аргументы z, z_n опущены). Входящие в (4) разности горизонтальных волновых чисел мод $\kappa_{mn}(\omega) = \kappa_m(\omega) - \kappa_n(\omega)$ определяют пространственные частоты интерференции мод номеров m, n . В дальнейшем под полем интенсивности понимается интерференционная модуляция $S(\omega, r)$.

На плоскости дистанция-частота интерференционная модуляция поля интенсивности $S(\omega, r)$ каждой пары мод образует регулярную структуру в виде расходящихся полос. На рис. 1 приведен результат расчета $S(\omega, r)$ для первых двух мод в двухслойной среде (волноводе Пекериса) с параметрами $\rho_1 = 1000 \text{ кг/м}^3$, $c_1 = 1500 \text{ м/с}$, $\rho_2 = 2000 \text{ кг/м}^3$, $c_2 = 1800 \text{ м/с}$ в

координатах $20 \leq r/z_0 \leq 200$ и в полосе частот $2 \leq \omega/\omega_{01} \leq 11$, где z_0 — глубина верхнего слоя, ω_{01} — критическая частота первой моды.

В многомодовом режиме поле интенсивности определяется суперпозицией структур, образованных всеми парами разноименных мод. С увеличением частоты число распространяющихся мод растет, и вступление каждой новой моды приводит к усложнению результирующей интерференционной структуры (рис. 2).

Пространственная корреляция поля интенсивности

Функцию пространственной корреляции поля интенсивности можно определить в соответствии с формулой

$$B(\rho, r_0, \Delta\omega) = \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\min} + \Delta\omega} S(\omega, r_0) \cdot S(\omega, r_0 - \rho) d\omega, \quad (5)$$

что соответствует выделению сечения $S(\omega, r)$ при фиксированной дистанции r_0 и сканированием этим сечением по дистанции с усреднением по частоте.

Результат расчета в соответствии с (5) корреляционной функции поля интенсивности, представленного на рис. 2, показан на рис. 3.

Как видно из рис. 3, корреляционная функция имеет ярко выраженный главный максимум. Сглаживания боковых максимумов можно добиться введением дополнительного усреднения по дистанции в соответствии с формулой

$$B_2(\rho, r_0, \Delta\omega, \Delta r) = \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\min} + \Delta\omega} \int_{r_0 - \frac{\Delta r}{2}}^{r_0 + \frac{\Delta r}{2}} S(\omega, r_0) \times S(\omega, r_0 - \rho) d\omega dr.$$

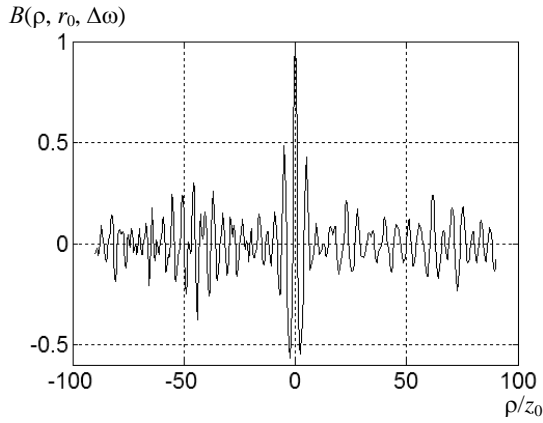


Рис. 3. Функция пространственной корреляции поля интенсивности

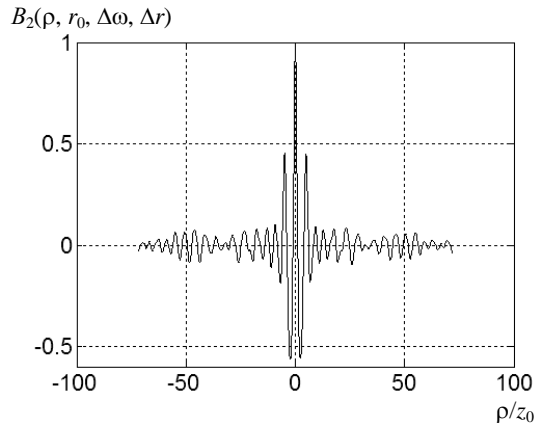


Рис. 4. Функция пространственной корреляции поля интенсивности с дополнительным усреднением по дистанции

Корреляционная функция $B_2(\rho, r_0, \Delta\omega, \Delta r)$ представлена на рис. 4.

Интервал пространственной корреляции в обоих случаях составил 2.8 глубин волновода или 14 длин волн максимальной частоты рабочего диапазона.

Зависимость интервала пространственной корреляции от частоты

В работе [6] обращается внимание на то, что интервал пространственной корреляции поля интенсивности не зависит от дистанции r_0 . В данной статье приводятся результаты исследования зависимости величины интервала пространственной корреляции от используемого диапазона частот.

Как отмечено выше, поле интенсивности на плоскости дистанция-частота в многомодовом режиме образуется суперпозицией регулярных двумерных структур, соответствующих каждой паре разноименных интерферирующих мод.

Таким образом, результирующее поле можно представить в виде

$$S(\omega, r) = \sum_{\substack{m,n=1 \\ m \neq n}}^M S_{mn}(\omega, r),$$

где

$$S_{mn}(\omega, r) = A_{mn} \cos(\kappa_{mn}(\omega)r),$$

$$A_{mn}(\omega, r) = \frac{A_m(\omega, r)A_n(\omega, r)}{\sum_{m=1}^M A_m^2(\omega, r)}.$$

Для оценки интервала пространственной корреляции Π_{mn} поля интенсивности и определения характера зависимости интервала пространственной корреляции от используемого диапазона частот были выполнены модельные расчеты корреляционных функций и исследована зависимость величины интервала корреляции от ширины и средней частоты диапазона частот.

В соответствии с (5) функцию пространственной корреляции поля интенсивности для пары мод m, n можно переписать в виде

$$B_{mn}(\rho, r_0, \omega_0, \Delta\omega) = \int_{\omega_0 - \Delta\omega/2}^{\omega_0 + \Delta\omega/2} S_{mn}(\omega, r_0) \times \\ \times S_{mn}(\omega, r_0 - \rho) d\omega. \quad (6)$$

Модельные расчеты корреляционных функций (7) выполнялись в двух вариантах.

Первый вид расчета соответствует усреднению поля интенсивности в полосе частот переменной ширины $\Delta\omega$, симметричной относительно фиксированного значения средней частоты ω_0 .

На рис. 5 представлен вид корреляционной функции B_{mn} , рассчитанной в соответствии с (6) для мод номеров 3 и 4. Средняя частота ω_0 соответствовала $35\omega_{01}$. На рис. 6 показана зависимость интервала пространственной корреляции от ширины полосы $\Delta\omega$.

Из рис. 6 видно, что интервал корреляции не зависит от ширины полосы частот, в которой производится усреднение. При этом величина интервала пространственной корреляции совпала с величиной полупериода пространственных осцилляций интерференционной модуляции поля интенсивности на средней частоте полосы, рассчитанной как

$$p_0(\omega_0) = \frac{\pi}{\kappa_{mn}(\omega_0) \cdot z_0}. \quad (7)$$

Второй способ расчета соответствует усреднению поля интенсивности в полосе частот постоянной ширины $\Delta\omega$ при изменении средней частоты полосы ω_0 .

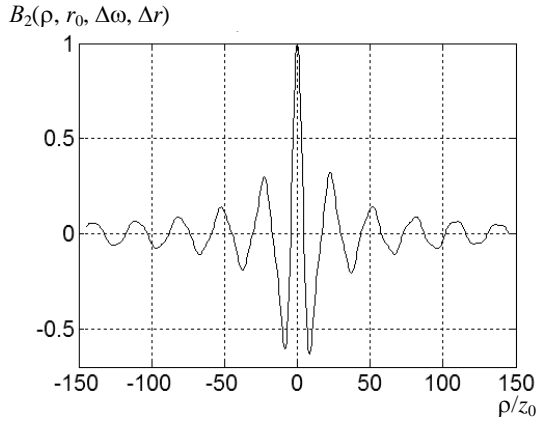


Рис. 5. Функция пространственной корреляции поля интенсивности мод номеров 3 и 4

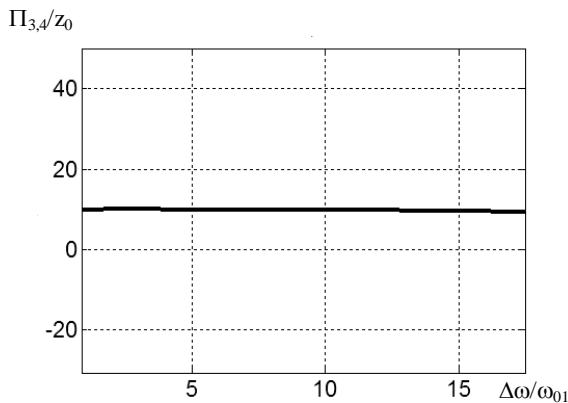


Рис. 6. Зависимость интервала пространственной корреляции от ширины полосы частот

На рис. 7 представлена полученная зависимость интервала пространственной корреляции интерференционной модуляции поля интенсивности мод 3 и 4 от средней частоты ω_0 . Ширина полосы частот $\Delta\omega$ фиксировалась на уровне $9\omega_{01}$. Пунктирной линией на графике показана зависимость p_0 от ω_0 , рассчитанная в соответствии с (7).

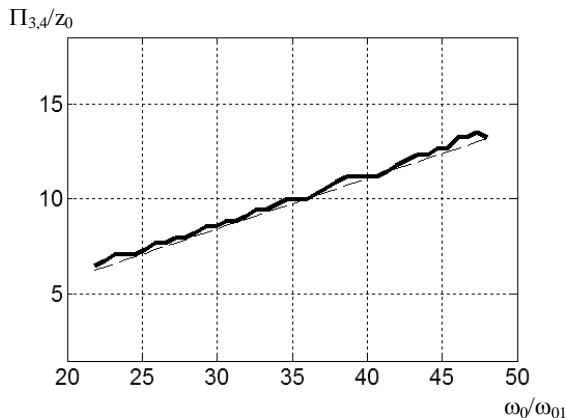


Рис. 7. Зависимость интервала пространственной корреляции от средней частоты диапазона частот

Видно хорошее совпадение кривой интервала пространственной корреляции и кривой p_0 .

Таким образом, результаты расчетов показывают, что интервал пространственной корреляции поля интенсивности каждой пары интерферирующих мод определяется величиной полупериода пространственных осцилляций интерференционной модуляции поля интенсивности на средней частоте рабочего диапазона частот.

Определение дистанции до источника широкополосного сигнала в волноводе

Существование и устойчивость интерференционной структуры широкополосного звука в мелком море, а также корреляционные свойства этой структуры, освещенные в [6] и в данной статье, позволяют предложить схему гидроакустической измерительной системы определения дистанции до широкополосного акустического источника в волноводе при помощи одиночного ненаправленного приемника.

Принципиальная блок-схема системы, реализующей метод измерения дистанции до широкополосного источника, должна содержать следующие элементы:

- 1) приемный гидрофон, осуществляющий прием сигнала $P(t)$ (воздействие аддитивных шумов здесь не рассматривается);
- 2) анализатор спектра для получения динамического спектра сигнала $P(t)$ в некоторой полосе частот $\Delta\omega$ с разрешением $\delta\omega = 2\pi/T$, где T — время усреднения, в соответствии с выражением

$$P_{T\omega}(\omega, t(r)) = \int_{t(r)}^{t(r)+T} P(t) e^{-i\omega t} dt,$$

где $t(r)$ — медленное время, связанное с изменением дистанции до источника;

3) устройство выделения интерференционной модуляции сигнала и составления двумерного массива (сигнальной матрицы) $S_T(\omega, t(r))$ на плоскости частота-время;

4) устройство, осуществляющее составление опорной матрицы интерференционной модуляции $S(\omega, r)$ по результатам расчета, либо предварительных измерений;

5) коррелятор, выполняющий измерение корреляции опорной и сигнальной матриц и оценку дистанции до источника сигнала.

Список литературы

1. Орлов Е.Ф. Интерференция широкополосного звука в океане // Современные проблемы акустики океана. М.: Наука, 1984. С. 85–89.

2. Орлов Е.Ф. Интерференционная структура широкополосного звука в океане. Интерференция широкополосного звука в океане // Сб. науч. трудов. Горький, 1984. С. 7–33.
3. Орлов Е.Ф., Шаронов Г.А. Интерференция звуковых волн в океане. Владивосток: Дальнаука, 1998. С. 8–26.
4. Pekeris C.L. Theory of propagation of explosive sound in shallow water // Geol. Soc. Am. Mem. 1948. P. 48–156.
5. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 344 с.
6. Орлов Е.Ф., Хромов А.В. Математическое моделирование пространственной корреляции поля интенсивности звуковых волн в мелком море // Сб. трудов XIX сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2007. Т. 2. С. 212–216.

MATHEMATICAL SIMULATION OF SPATIAL CORRELATION OF INTENSITY FIELD OF A BROADBAND ACOUSTIC SOURCE IN SHALLOW WATER

A.V. Khromov, E.F. Orlov

Correlation characteristics are considered of the field intensity interference modulation of a broadband acoustic source in shallow water. The concept used here is that of spatial correlation of a regular two-dimensional structure as a convolution integral with averaging over two coordinates (frequency, distance). The dependence of the spatial correlation interval on the frequency band is studied. Possible methods to determine the distance to the broadband acoustic source using a single nondirectional receiver are considered.