МОДЕЛИРОВАНИЕ АНИЗОТРОПНОГО ШУМА НА ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНЫХ ПРИЕМНИКАХ

© 2007 г. О.Е. Шимко,
рук. Г.М. Глебова

В настоящее время в гидрофизике для оценки параметров грунта и поиска полезных ископаемых широко используются буксируемые антенны, состоящие не только из скалярных, но и из векторных приемных элементов [1]. Для анализа разрешающей способности векторно-скалярных антенн необходимо использовать модель помех, на фоне которых производится обработка полезного сигнала. Основной вклад в шумовую помеху вносят распределенные по поверхности моря шумы и кильватерный след от судна-буксировщика. К сожалению, в литературе практически отсутствуют как теоретические, так и экспериментальные данные о частотных и пространственных характеристиках этих видов помех. В данной работе предпринимается попытка получить спектрально-корреляционные матрицы помех от распределенных на поверхности шумов моря путем численного моделирования для различной модели распространения сигналов от источников излучения к приемным элементам. Для проверки корректности результатов проведенного моделирования использовалось сравнение с известными теоретическими и экспериментальными данными для одиночного векторно-скалярного приемника [2,3].

Как известно шум от взволнованной морской поверхности генерируется элементарными некоррелированными источниками и излучающими с амплитудной диаграммой $\cos^n\theta$.

Если приемная антенна состоит из M векторно-скалярных модулей, каждый из которых представляет собой приемник давления и три ортогональных приемника колебательной скорости, то размерность вектора U равна $\mu = 4\cdot M$. Вектор U можно представить в виде:

$$U_k(p,V) = \begin{cases} p_k, & k = m, \\ V_{kx}, & k = M+m, \\ V_{ky}, & k = 2\cdot M+m, \\ V_{kz}, & k = 3\cdot M+m \end{cases}, \quad \begin{matrix} m = 1,\ldots,M, \\ k = 1,\ldots,4\cdot M, \end{matrix} \tag{1}$$

Для гауссовых сигналов и шумов с нулевым математическим ожиданием статистика измерений полностью определяется матрицей ковариаций для вектора U, соответствующего фиксированной частоте, имеет размерность $\mu \cdot \mu$ и записывается в виде:

$$K = \left\langle U \cdot U^* \right\rangle, \tag{2}$$

Представим матрицу (2) в блочном виде, в которой размер каждого блока равен $M \times M$.

$< PP^* >$ (1)	$< PV_x >$	$< PV_y >$	$< PV_z >$(5)
$< V_x P >$	$< V_x V_x^* >$(2)	$< V_x V_y >$	$< V_x V_z >$
$< V_y P >$	$< V_y V_x >$	$< V_y V_y^* >$(3)	$< V_y V_z >$
$< V_z P >$	$< V_z V_x >$	$< V_z V_y >$	$< V_z V_z^* >$(4)

(3)

Для одиночного приемного элемента геометрическая схема измерений представлена на рис.1. В волноводе глубиной H на глубине h находится приемный элемент, на который поступает совокупность сигналов от локальных источников, находящихся на поверхности моря.

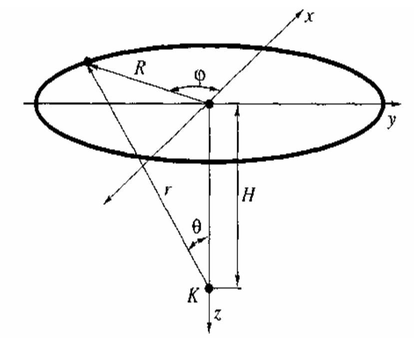

Рис.1. Геометрическая схема измерений на одиночном векторно-скалярном приемнике

В цилиндрической системе координат положение точки определяются тремя величинами R, φ, z (для источников шума $z = 0$). Считаем, что поверхностные источники, издающие шум, независимы друг от друга и имеют одинаковую амплитуду A и начальную фазу, равномерно распределенную в интервале значений $[0, 2\pi]$, изменяющуюся случайным образом для каждой последующей временной выборки. Звуковое давление при однолучевом распространении сигнала, создаваемое в точке наблюдения на m-том приемном элементе единичным источником, записывается в виде

$$P_m = A[\exp(jkr_m)/r_m]\cos^n \theta \tag{4}$$

а при многолучевом распространении в виде:

$$P_m = \sum_i A_i[\exp(jkr_{mi})/r_{mi}]\cos^n \theta_i, \tag{5}$$

где i – число лучей, приходящих в точку приема по различным путям.

Экспериментальные данные дают основание полагать $n \sim 1$ (то есть излучающие источники представляют собой диполи).

Выражая колебательную скорость частиц среды в эквивалентных единицах звукового давления путем формального домножения значений колебательной скорости на импеданс среды ρc, при $kH > 3$ для однолучевого распространения [1]:

$$P_m = A\exp(jkr_m)\cos\theta / r_m;$$
$$V_{mx} = P_m \cos\varphi \sin\theta;\ V_{my} = P_m \sin\varphi \sin\theta; \quad (6)$$
$$V_{mz} = P_m \cos\theta$$

и для многолучевого:

$$P_m = \sum_i A_i \exp(jkr_{mi})\cos\theta / r_{mi};$$
$$V_{mx} = P_m \sum_i \cos\varphi_i \sin\theta_i;\ V_{my} = P_m \sum_i \sin\varphi_i \sin\theta_i; \quad (7)$$
$$V_{mz} = P_m \sum_i \cos\theta_i$$

Аналогично схеме на рис.1 для одного приемного модуля, на рис.2 представлена схема приема сигнала на многоканальную антенну, приемные модули которой расположены случайным образом в окружности, радиусом ρ.

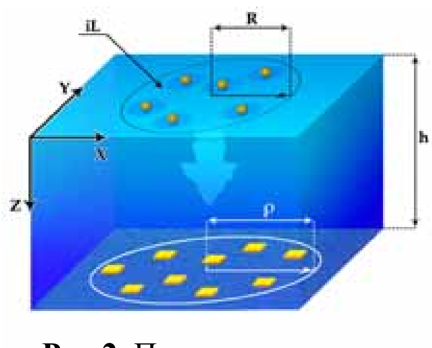

Рис.2. Приемная система

Как известно, при однолучевом распространении на горизонтальной скалярной антенне определяет однопараметрическое семейство матриц пространственной когерентности шумов моря (модель Крона-Шермана) $K_n(r_{ij})$, $n \geq 0$, хорошо согласующееся с экспериментальными данными. Так для горизонтальной решетки элементы спектрально-корреляционной матрицы шумов моря $K_n(r_{ij})$ имеют вид

$$\left(K_n(r_{ij})\right)_{ij} = \frac{2^n \cdot n!}{\left[2\pi f \frac{r_{ij}}{c}\right]^n} J_n\left[2\pi f \frac{r_{ij}}{c}\right] \quad (8),$$

где J_n - функция Бесселя n-ого порядка, с – скорость звука, r_{ij} - расстояние между i-ым и j-ым приемным модулями.

Естественно, что результаты расчетов будут сильно зависеть от числа случайных источников, создающих пространственный шум и от размера поверхности, по которой разбросаны источники. Поэтому сначала был проведен анализ, позволяющий выбрать сочетание источников и размера поверхности, при котором точность и длительность расчета оптимальны. На рис.3 можно увидеть зависимости $<V_x V_x^*>, <V_y V_y^*>$ и $<V_z V_z^*>$ от радиуса поверхности, по которой распределяются источники. После анализа зависимостей можно сделать вывод, что наибольшего совпадения с теоретическими расчетами можно достичь путем увеличения плотности источников, распределенных по рассматриваемой поверхности. В дальнейшем для расчетов в рассматриваемом диапазоне частот было выбрано 200000 источников, которые распределены по поверхности радиусом $R = 1000 м$ м.

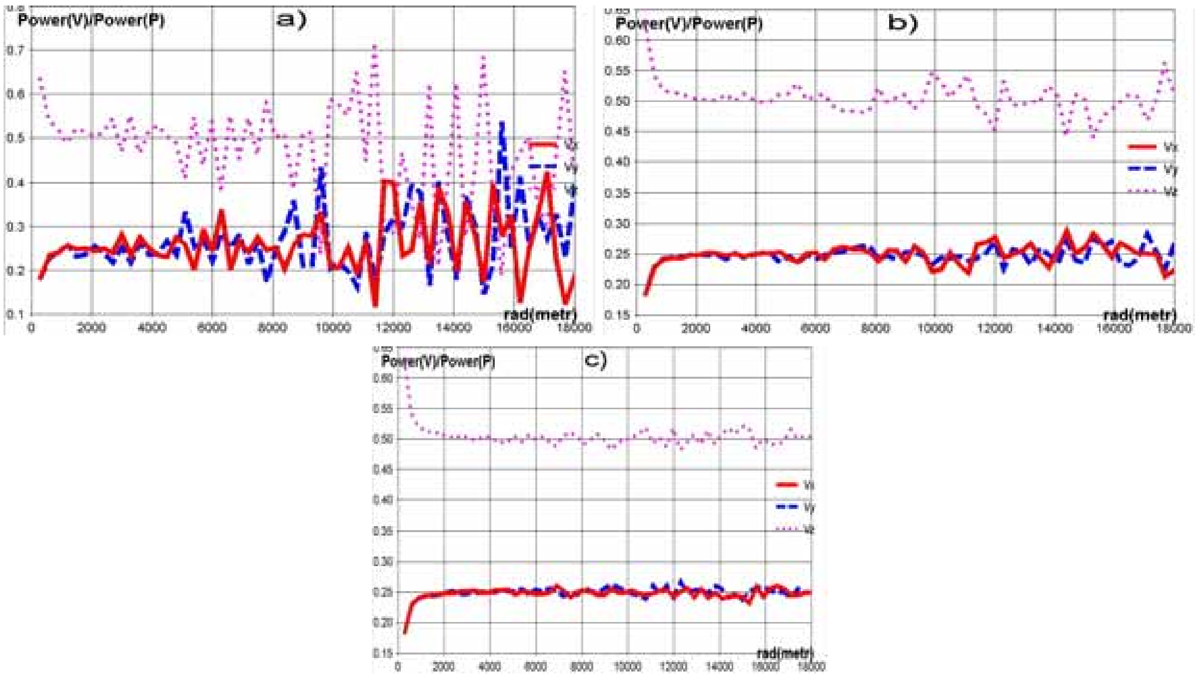

Рис.3. Зависимость ковариационных мощностей от радиуса разброса при количестве случайных шумящих источников, равном 10000 (a), 200000 (b) и 1000000 (c)

В качестве проверки корректности расчетов рассмотрена нормированная корреляционная матрица на одиночном четырехкомпонентном модуле, которая имеет вид:

$$K = \begin{matrix} 1.0000 & 0.0053 & 0.0033 & 0.6836 \\ 0.0053 & 0.2435 & 0.0000 & 0.0050 \\ 0.0033 & 0.0000 & 0.2421 & 0.0029 \\ 0.6836 & 0.0050 & 0.0029 & 0.5144 \end{matrix}$$

Полученные значения диагональных элементов матрицы соответствуют теоретическим для выбранных условий распространения и модели шумящей поверхности, т.е. выполняется условие

$$< PP^* >= 4 < V_x V_x^* >= 4 < V_y V_y^* >= 2 < V_z V_z^* >.$$

Отметим также, что корреляция между P и V_x, V_y практически отсутствует, в то время как между V_z и P она достаточно существенна и равна 0.68. Поэтому в дальнейшем были рассмотрены зависимости корреляционной функции между V_z и P.

Путем моделирования была рассчитана пространственная корреляционная матрица шумов (2,3) как на скалярных, так и на векторных приемниках для однолучевой и многолучевой модели распространения сигнала в волноводе и для совокупности приемных модулей случайным образом распределенных в пределах окружности $\rho = 3мм$.

Корреляционная зависимость от расстояний между приемными модулями рассчитывалась путём осреднения значений функции для пар приемников, попавших в заданный интервал. Расстояние между приемными модулями также находилось путем осреднения всех расстояний, попавший на данный интервал. В результате этой работы были получены следующие зависимости, изображенные на рис.4.

Как видно из рис.4 смоделированная корреляционная функция $< PP^* >$ совпадает с хорошо известной теоретической зависимостью (8), что косвенно подтверждает правильность моделирования.

Отметим также, что корреляционная функция для горизонтальных компонент V_x и V_y практически совпадает. Период корреляционной функции по давлению и по горизонтальным компонентам одинаков, однако значения корреляционной функции в первых двух максимумах для горизонтальных компонент V_x и V_y выше, чем для давления. Корреляция по V_z убывает значительно быстрее, чем по V_x и V_y. В силу того, что V_z и P достаточно сильно коррелируют $< V_z V_z^* > \approx < PV_z >$.

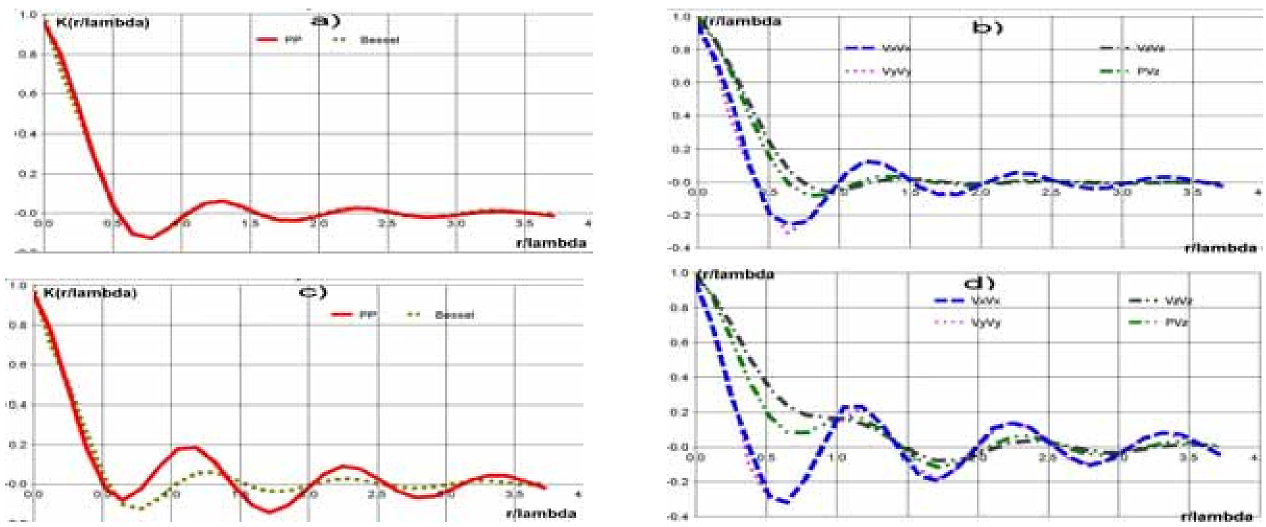

Рис. 4. Зависимость корреляционной функции от нормированного межэлементного расстояния r_{ij} / λ; a),c) - для давления и для аналогичной теоретической зависимости, рассчитанной по формуле (8); b),d) - для компонент колебательной скорости V_x, V_y, V_z, а также зависимость между V_z и P; a,b) – для однолучевого распространения; c,d) – для многолучевого

Методический подход, заложенный в алгоритме, позволяет менять свойства алгоритма и, следовательно, произвести его оптимизацию. В результате обработки согласно алгоритму модельных сигналов показано, что воздействие моделируемого анизотропного шума приближено к реальному при определенных параметрах модели, что в дальнейшем можно использовать для моделирования более сложных ситуации и согласно этому создавать алгоритмы обработки сигнала с учетом анизотропного шума.

Литература

1. *Гордиенко В.А., Илюшин Я.А.* О флуктуациях угла пеленга сосредоточенного источника, определяемого векторным приемником в поле шумов океана// Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 1. С. 2–8.
2. *Гордиенко В.А., Ильичев В.И.* Одиночный приемник потока акустической мощности как эквивалент пространственной антенной решетки // Докл. РАН, 1994. Т.339, № 5. С. 1–4.
3. *Гордиенко В.А., Ильичев В.И., Илюшин Я.А.* Об особенностях определения направления прихода слабых сигналов в поле шумов океана одиночным векторным приемником // Докл. РАН. 1994. Т.339, № 6. С.1–4.