

УДК 681.88

ОБНАРУЖЕНИЕ И РАЗРЕШЕНИЕ СЛАБЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРИ НАЛИЧИИ ИНТЕНСИВНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ МЕШАЮЩИХ ИСТОЧНИКОВ

Г. С. Малышкин

Рассмотрены оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов в антенных решетках. Представлены результаты компьютерного моделирования различных алгоритмов обнаружения и разрешения слабых гидроакустических сигналов при наличии интенсивных локальных мешающих источников.

Ключевые слова: гидроакустическое поле, антенная решетка, многолучевость, слабые сигналы, алгоритм обнаружения.

Keywords: hydroacoustic field, antenna array, multipath, weak signals; detection algorithm.

Введение

Важнейшими задачами гидроакустического целеуказания являются обнаружение и разрешение слабых сигналов, маскируемых более мощными сигналами от посторонних источников. Исследованию этого направления посвящена обширная литература [1–6], в которой исследуются оптимальные и адаптивные методы обработки сигналов в антенных решетках применительно к приему как электромагнитных, так и гидроакустических полей.

Специфика гидроакустического поля такова, что мешающее действие интенсивных сигналов существенно усиливается за счет их многолучевого распространения и рассеяния на неоднородностях среды и границах — поверхности и дне моря [5, 6]. Это усложняет наблюдение за малошумными объектами при наличии в гидроакустическом поле помех многих посторонних интенсивных мешающих источников.

Классические алгоритмы адаптации

Основным направлением приема слабых сигналов в сложных помеховых ситуациях в настоящее время является применение классических адаптивных алгоритмов (Кейпон, MUSIC, EV и многие другие). Сущность этих алгоритмов заключается в формировании корреляционной матрицы, размерность которой равна числу элементов используемой антенны L , а объем необходи-

мой выборки не менее учетверенного числа от элементов антенны. Адаптивные алгоритмы формируются при суммировании слагаемых $X_t^* X_t$ в пределах времени накопления (от первого до T_a) с использованием K частотных отсчетов:

$$\overline{\mathbf{Q}(T)} = \frac{1}{N_a} \sum_{t=1}^{T_a} \sum_{k=1}^K X_t(k) X_t^{*T}(k) = \sum_{l=1}^L \sigma_l^2 U_l U_l^{*T}. \quad (1)$$

С позиций спектрального разложения корреляционных матриц [второе равенство (1)] накопленная матрица представляет сумму собственных чисел σ_l^2 , умноженных на диаду собственных векторов $U_l U_l^{*T}$. Собственные числа характеризуют энергетические параметры (сильные сигналы формируют большие собственные числа), а собственные векторы — фазовую структуру принятых колебаний. Современные адаптивные методы используют собственные векторы как носители информации о структуре сигналов, но изменяют весовые коэффициенты при них. Наша дальнейшая задача — видоизменить весовые коэффициенты при собственных векторах так, чтобы максимально усилить выходные эффекты от слабых сигналов, не допустив искажения пеленгационных рельефов за счет чрезмерного ослабления выходных эффектов от сильных сигналов.

Другим недостатком классических алгоритмов является большой объем выборки $N_a = T_a K$ для формирования соответствующей корреляционной матрицы. При этом усредняются флуктуации рассеянного поля

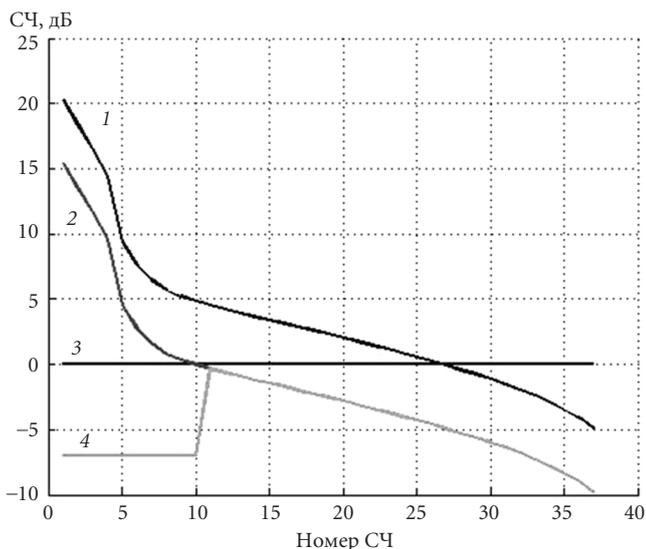


Рис. 1 Варианты исходного и модифицированного распределения собственных чисел (СЧ):

1 — исходное; 2 — смещенное исходное; 3 — равномерное; 4 — оптимизированное для обнаружения наиболее слабых сигналов

и помеха растет пропорционально рассеянному фону. Алгоритм для обнаружения слабых сигналов должен строиться таким образом, чтобы максимально ослабить M_1 сильных сигналов на коротком интервале наблюдения, ослабив при этом и рассеянные составляющие, стабильные на коротком интервале накопления матрицы. Характер необходимой коррекции собственных чисел представлен на рис. 1 кривой 4, которая показывает, что необходимо дозированно уменьшить собственные числа наиболее сильных сигналов, однако оставив их в ограниченном объеме.

Алгоритм реализуется соотношением

$$S_j(t) = \sum_{m=1}^{M_1} \frac{b}{|\sigma_m|^2} |Z_{jt}^{*T} Y_{mt}|^2 + \sum_{k=M_1+1}^K \frac{1}{|\sigma_{M_1}|^2} |Z_{jt}^{*T} Y_{kt}|^2. \quad (2)$$

Адаптивный алгоритм реализуется с использованием неадаптивно сформированных пространственных каналов $Z_{jt}^{*T} = V_j^{*T} X_t$, где вектор направления V_j^{*T} после умножения на вектор входной выборки X_t обеспечивает формирование неадаптивного j -го пространственного канала, а вектор $Y_{mt}(r)$ — собственные векторы матрицы с размерностью примерно $0,35L$ меньше числа элементов.

Результаты моделирования

Модельные исследования сравнительных характеристик адаптивных и неадаптивных методов проводились в рамках типовой помеховой ситуации. На рис. 2 представлена ситуация с 14 мешающими источниками, а прием сигналов осуществляется линейной антенной, состоящей из 96 элементов.

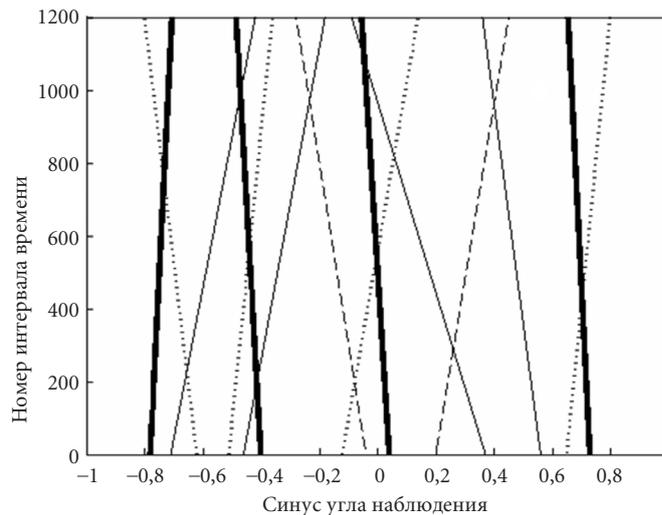


Рис. 2 Взаимное положение источников и их перемещение в процессе наблюдения

Четыре самых сильных многолучевых сигнала (жирные сплошные линии) имеют интенсивность сигнала каждого луча на элементах антенны от -2 до -3 дБ. Следующие четыре сигнала имеют интенсивности на $17-18$ дБ ниже (тонкие сплошные линии), следующие два сигнала имеют интенсивности еще на 5 дБ ниже (штрихпунктирные линии) и четыре самых слабых сигнала имеют интенсивности в среднем -29 дБ (пунктирные линии) по отношению к наиболее сильным сигналам. При моделировании учитывались условия многолучевого распространения, интенсивное рассеяние и распределенная помеха.

На рис. 3 представлены траектории сигналов, выявленные неадаптивным алгоритмом Бартлетта (жирные сплошные линии) и адаптивным алгоритмом, реализованным по формуле (2). Анализ рис. 2 показывает, что

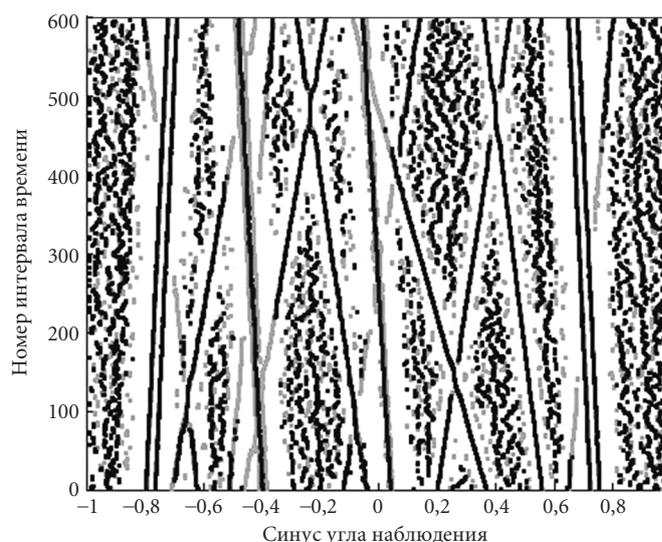


Рис. 3 Траектории сигналов, выявленные алгоритмом Бартлетта (жирные сплошные линии) и оптимизированным алгоритмом (серые сплошные линии)

неадаптивный алгоритм обнаруживает четыре наиболее слабых сигнала только на незначительных участках трасс вдали от точек пересечения с интенсивными сигналами и сигналами средней интенсивности.

Заключение

При модельных исследованиях сравнительных характеристик адаптивных и неадаптивных методов учитывались условия многолучевого распространения, интенсивное рассеяние и распределенная помеха.

В отличие от неадаптивного синтезированный алгоритм обеспечивает надежное обнаружение основных участков трасс слабых сигналов, за исключением узкой зоны области пересечения с наиболее интенсивными мешающими сигналами. Целесообразно продолжить исследования по упрощению реализации и улучшению характеристик адаптивных алгоритмов этого типа.

Литература

1. **Capon J.** High resolution frequency–wavenumber spectral analysis // Proc. IEEE. 1969. Vol. 57. P. 1408–1418.
2. **Schmidt R. O.** Multiple emitter location and signal parameter estimation // IEEE Trans. 1986. Vol. AP_34. N 3. P. 276–280.
3. **Krim H., Viberg M.** Two decades of array signal processing research // IEEE Signal Processing Magazine. 1996. N 7. P. 67–95.
4. **Эффективный** проекционный алгоритм адаптивной пространственной фильтрации / О. П. Черемисин, М. В. Ратынский, А. А. Комов, А. Е. Пушин // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39, № 2. С. 259–263.
5. **Мальшкин Г. С.** Анализ влияния физических и технических факторов на эффективность адаптивных алгоритмов обработки гидроакустических сигналов // Акустический журнал. 2014. Т. 60, № 3. С. 284–299.
6. **Мальшкин Г. С.** Влияние рассеяния сильных мешающих гидроакустических сигналов на эффективность адаптивных алгоритмов при разрешении слабых сигналов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. Т. 6, № 1. С. 78–89.