



УДК 551.465

Буй Чыонг Занг

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Методы обработки сигналов, согласованные с каналом распространения, для стационарной гидроакустической системы, работающей в режиме шумопеленгования

Рассмотрены алгоритмы согласованной обработки сигналов для стационарной гидроакустической системы, работающей в режиме шумопеленгования, расположенной в районе мелкого моря Вьетнама. Разработана программа, позволяющая производить сравнительную оценку эффективности адаптивных алгоритмов по сравнению с традиционным методом (без учета условий распространения). Оценивается устойчивость предложенного алгоритма к ошибкам оценки характеристик канала распространения.

Гидроакустическая система, шумопеленгование, мелкое море, согласованная обработка, канал распространения

Постановка задачи. Автором решается задача согласованной со средой распространения обработки сигналов в стационарной гидроакустической системе (СГАС), работающей в режиме шумопеленгования (ШП) и расположенной в районе мелкого моря Вьетнама. Этот район, называемый «залив Бакбо», играет важную роль в политической и экономической деятельности Вьетнама [1]. Изменчивость во времени и зависимость от внешних гидролого-акустических факторов полей сигналов и помех в этой акватории, а также наличие мешающих целей определяют необходимость применения в постоянно функционирующих гидроакустических средствах алгоритмов, обеспечивающих адаптацию к изменяющейся во времени и пространстве помеховой обстановке [2], [3].

Развитие методов согласованной со средой обработки гидроакустических сигналов является перспективным направлением в гидроакустике, однако до настоящего времени этот вопрос не в полной мере изучен теоретически и недостаточно широко опубликован в специальной литературе. Тем не менее, существует довольно детально описанный в литературе один из вариантов алгоритма согласованной обработки, разработанный А. В. Гладилиным и В. М. Баронкиным [4].

Рассмотрим вариант точечного источника, когда ковариационная матрица сигнала имеет вид $G_{s,f} = g_{s,f} \cdot H_{s,f}(r) \cdot H_{s,f}^+(r)$, где $g_{s,f}$ – спектральная плотность шума источника сигнала; $H_{s,f}(r)$ – вектор, описывающий распространение звукового поля от источника, расположенного в точке r до антенны («+» означает эрмитово сопряжение). Предположим, для определенности, что $g_{s,f}$ и $H_{s,f}(r)$ известны для каждого значения r, f . Предположим также, что статистика локально-оптимального алгоритма обнаружения ориентирована на ковариационную матрицу помехи $Q_{n,f}$, когда на самом деле имеет место матрица $G_{n,f}$. Таким образом, указанная статистика обнаружения имеет вид [4]

$$T(p_f, f \in F_d; r) = \sum_{f \in F_d} g_{s,f} \left| H_{s,f}^+(r) \cdot Q_{n,f}^{-1}(r) \cdot P_f \right|^2, \quad (1)$$

где F_d – множество дискретных частот в области F ; $P_f = S_f + N_f$, $f \in F_d$, S_f и N_f – поля сиг-

нала и помехи в виде спектральной плотности давления (СПД) соответственно.

Далее значение, полученное из выражения (1), сравнивается с некоторым порогом, выбираемым, например, согласно критерию Неймана–Пирсона. Вследствие того, что в выражение для статистик обнаружения по методу максимального правдоподобия входит описание статистических свойств сигнала и помехи, а также передаточные функции морской среды, эти алгоритмы получили наименование *алгоритмов согласованной со средой обработки* (в английской литературе: *match-field processing algorithm*).

Однако в приведенном алгоритме рассмотрены поля сигнала и помехи в виде гауссовских (нормальных) стационарных случайных процессов, что не всегда выполняется в практических ситуациях. Примером может служить поле шума дальнего судоходства в условиях мелкого моря Бразилии [5]. Результаты практических исследований показывают, что распределение амплитуд собственных шумов в этом районе не подчиняется гауссовскому закону, но хорошо согласуется с законом Стьюдента. С другой стороны, в данном алгоритме (1) требуется «точное априорное знание о среде», доступ к характеристикам которой затруднен на практике. Таким образом, приведенный алгоритм является достаточно трудным для реализации из-за сложности вычисления и отсутствия полной достоверной априорной информации о характеристиках помехи. Кроме того, судя по опубликованным в литературе результатам, не проводилась оценка устойчивости этого алгоритма к ошибкам определения передаточной функции канала распространения сигнала или к ошибкам определения характеристик среды (вертикальное распределение скорости звука, характеристики дна, отличие закона распределения для поля помех от нормального и т. д.).

Поэтому создание нового адаптивного алгоритма обработки, согласованного с каналом распространения сигналов, с учетом изменчивости гидролого-акустических условий, и его имитационной модели, является актуальной задачей для современной гидроакустики и обеспечивает повышение эффективности существующих и перспективных СГАС в режиме ШП, что является целью данной статьи.

В качестве входных параметров модели предлагается использовать информацию о СПД сигнала и помехи, но для упрощения вычислений

предполагается отсутствие корреляции между элементарными каналами антенны по полю помех.

В алгоритме предполагается использовать информацию о форме волнового фронта сигнала, а также полную или частичную информацию о передаточной функции (функции Грина). На базе приведенного подхода и без учета ковариационной матрицы помех используется мощность на выходе пространственного канала (ПК) антенны:

$$T_w(P_f, f \in F) = \sum_{f \in F_d} [P_f \otimes H^{(-1)}(f, x)]^+ [P_f \otimes H^{(-1)}(f, x)],$$

где $H^{(-1)}(f, x)$ – матрица, элементы которой являются обратными значениями элементов передаточной функции, таким образом, она имеет вид

$$H^{(-1)}(f, x) = \begin{bmatrix} 1/h_1(f, x) \\ 1/h_2(f, x) \\ \dots \\ 1/h_N(f, x) \end{bmatrix}, \text{ а функция Грина соответствует } H(f, x) = \begin{bmatrix} h_1(f, x) \\ h_2(f, x) \\ \dots \\ h_N(f, x) \end{bmatrix} \text{ (} i = 1, \dots, N \text{ – номер}$$

элемента антенны); \otimes – оператор умножения по элементам.

Данный алгоритм представляет собой вариант *согласованной со средой обработки*, поскольку в выражении присутствует информация о передаточной функции среды. Алгоритм использует возможное априорное знание условий распространения сигналов без дополнительных предположений о характеристиках поля помех. Работоспособность рассмотренного алгоритма зависит от правильного задания параметров передаточной функции гидроакустического канала.

Для *согласованного метода* обнаружения (получения мощности на выходе антенны) предполагается использование трех вариантов его реализации:

1. Вариант амплитудно-фазового распределения при полном учете характеристики среды

(функции Грина):
$$W_{P1} = \sum_{f \in F_d} \left| \sum_{x \in A} P_f \otimes H^{(-1)}(f, x) \right|^2.$$

2. Вариант амплитудного распределения при учете амплитудной части ($A(f, x)$) функции Грина:

$$W_{P2} = \sum_{f \in F} \left| \sum_{x \in A} P_f \otimes A^{(-1)}(f, x) \otimes e^{-i \cdot F_3(f, x)} \right|^2,$$

где F_3 – задержки для плоского фронта.

3. Вариант фазового распределения при учете фазовой части ($\Phi(f, x)$) функции Грина (т. е. только формы волновых фронтов) $W_{P3} =$

$$= \sum_{f \in F} \left| \sum_{x \in A} P_f \otimes \Phi^{-1}(f, x) \right|^2.$$

В традиционном методе отношение сигнал/помеха (ОСП) на выходе антенны представляет собой отношение по мощности:

$$\beta_{\text{трад}} = \frac{\hat{W}_P - \hat{W}_N}{\sigma_N},$$

где \hat{W}_P – среднее значение

мощности при наличии смеси сигнала и помехи на входе антенны – соответствует величине

$$W_P = \sum_{f \in F} \left| \sum_{x \in A} P_f \otimes e^{-i \cdot F_3} \right|^2;$$

\hat{W}_N – среднее значение

мощности при наличии только помехи на входе антенны – соответствует величине $W_N =$

$$= \sum_{f \in F} \left| \sum_{x \in A} N_f \otimes e^{-i \cdot F_3} \right|^2;$$

$\sigma_N = \sqrt{(\mu_{N2} - \mu_{N1}^2)}$ – ана-

литическая оценка СКО при отсутствии сигнала (μ_{N2} – нецентрированный момент мощности; μ_{N1} – оценка математического ожидания).

Результаты моделирования. Предположим, что поле помех в месте размещения приемных антенн стационарной ГАС представляет собой аддитивную смесь трех основных независимых компонентов: динамические шумы (собственный шум) моря, шум дальнего судоходства, гидродинамические шумы. С помощью разработанной автором программы были созданы модели СПД шумового сигнала и основных аддитивных шумов (рис. 1–4): приведены мгновенные спектры, внутренняя гладкая линия в каждом графике показывает усредненное значение (рис. 1 – модель для шумового сигнала; рис. 2 – модель для динамических шумов моря; рис. 3 – модель для гидродинамических шумов; рис. 4 – модель для шума судоходства).

Далее были промоделированы значения ОСП на выходе тракта обработки при использовании трех вариантов адаптивного алгоритма и на этом основании проанализировано значение выигрыша (или проигрыша) предлагаемых вариантов реализации алгоритма согласованной со средой обработки по сравнению с традиционным методом с помощью выражения $\beta_{\text{адап(1,2,3)}} / \beta_{\text{трад}}$ (где $\beta_{\text{адап(1,2,3)}}$ и $\beta_{\text{трад}}$ – оценки ОСП в трех адаптивных и традиционном методах соответственно). Результаты

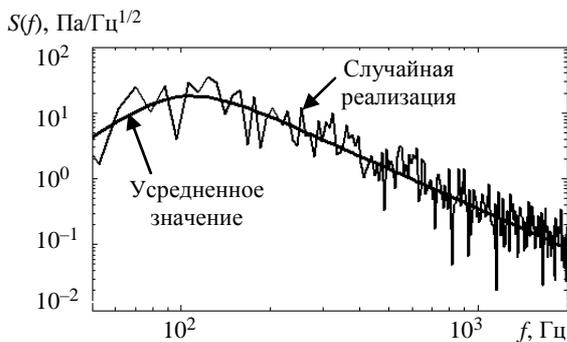


Рис. 1

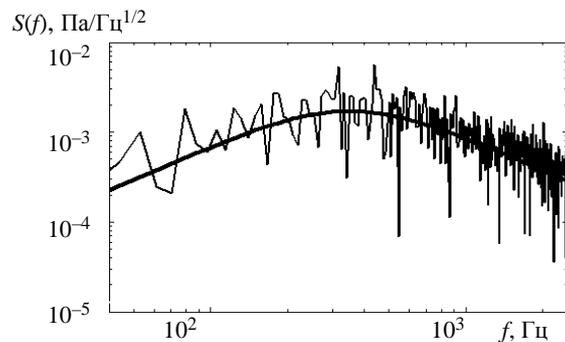


Рис. 2

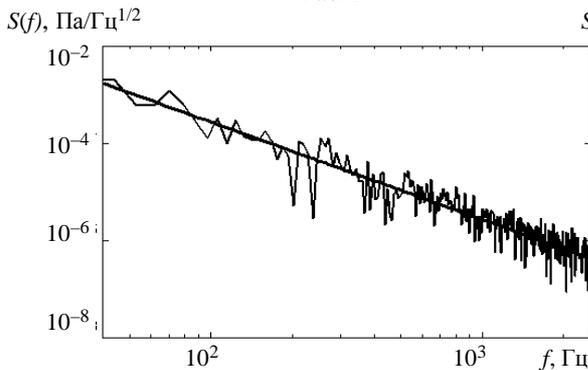


Рис. 3

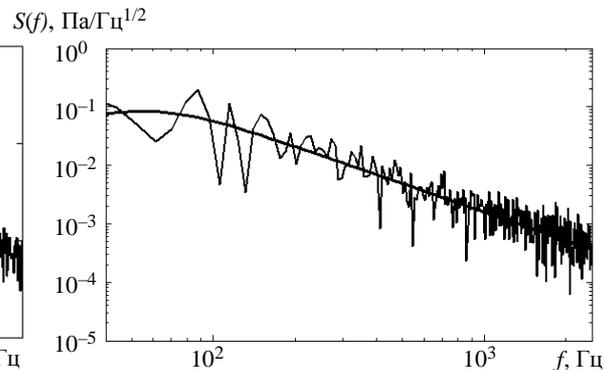


Рис. 4

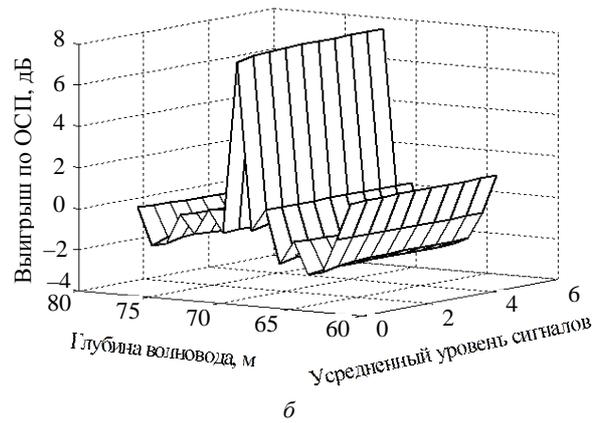
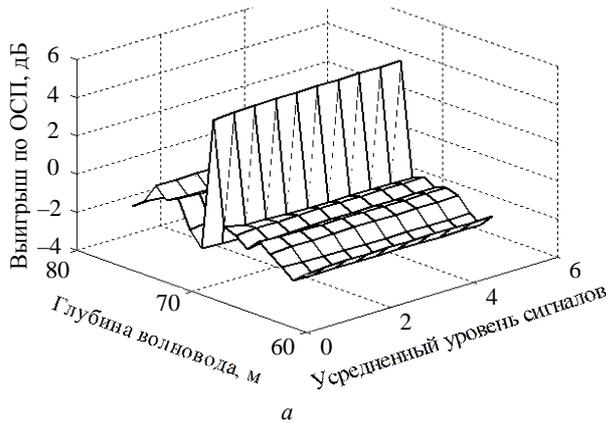


Рис. 5

моделирования эффективности трех вариантов подробно описаны в [6], где основное внимание уделено оценке эффективности фазового метода, для которого характерен наибольший выигрыш по ОСП среди трех вариантов реализации адаптивного алгоритма.

При моделировании в качестве приемной антенны рассматриваются две дискретные линейные антенные решетки с рабочим диапазоном частот 0.5...3 кГц, верхний приемник которых погружен на глубину 20 м, и с разным количеством приемных элементов в линейке. Источник сигналов находится на глубине 40 м и расстоянии 8 км от антенны. На рис. 5 показан выигрыш фазового метода по ОСП по сравнению с традиционным методом в зависимости от глубин волновода (при этом точная глубина волновода составляет 70 м) и усредненных уровней сигналов для этих двух линеек: *а* – антенна из 30 элементов, *б* – антенна из 60 элементов.

На рис. 6 приведено сравнение ОСП двух методов при фиксированном значении глубины для вышеуказанных антенн: *а* – антенна из 30 элементов; *б* – антенна из 60 элементов; линия 1 – ОСП для фазового варианта; линия 2 – ОСП для традиционного варианта.

Как показано на рис. 6, в обоих случаях фазовый метод дает заметный выигрыш по ОСП по сравнению с традиционным методом. В первом случае выигрыш достигает значения 5 дБ при точном задании глубины 70 м и наглядно падает при присутствии ошибок в оценке характеристик волновода. В втором случае ситуация такая же, однако выигрыш при точном задании глубины оказывается выше – до 8 дБ.

Чтобы оценить устойчивость данного алгоритма к ошибкам, вызванным неверной оценкой глубин волновода и скоростей звука, зададим ряд величин ошибки с малыми шагами. Моделирование проводилось для такой же антенной линейки из 60 элементов (как и на рис. 5, 6, б). На рис. 7, *а* показано сравнение ОСП для этих двух методов при фиксированном значении уровня сигналов для истинной глубины 70 м и ошибки глубины с шагом 0.1 м (линия 1 – ОСП для фазового варианта; линия 2 – ОСП для традиционного варианта). Из приведенных результатов наглядно видно, что фазовый метод дает существенный выигрыш (по ОСП) по сравнению с традиционным методом при точном задании глубины волновода (ошибка по глубине равна нулю) и при ошибках определения глубины

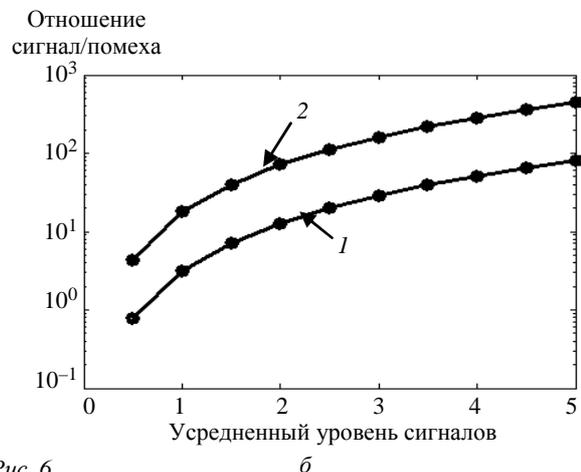
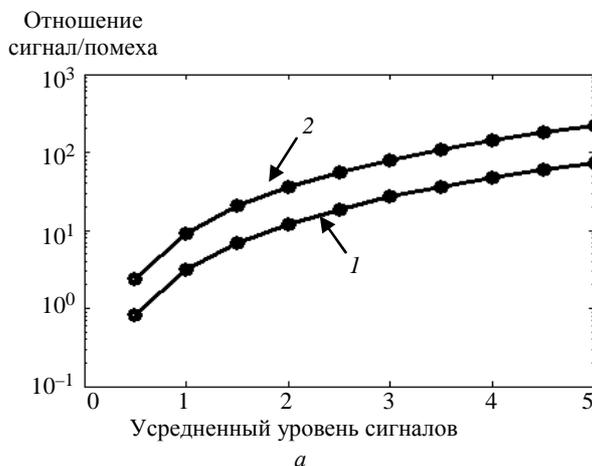


Рис. 6

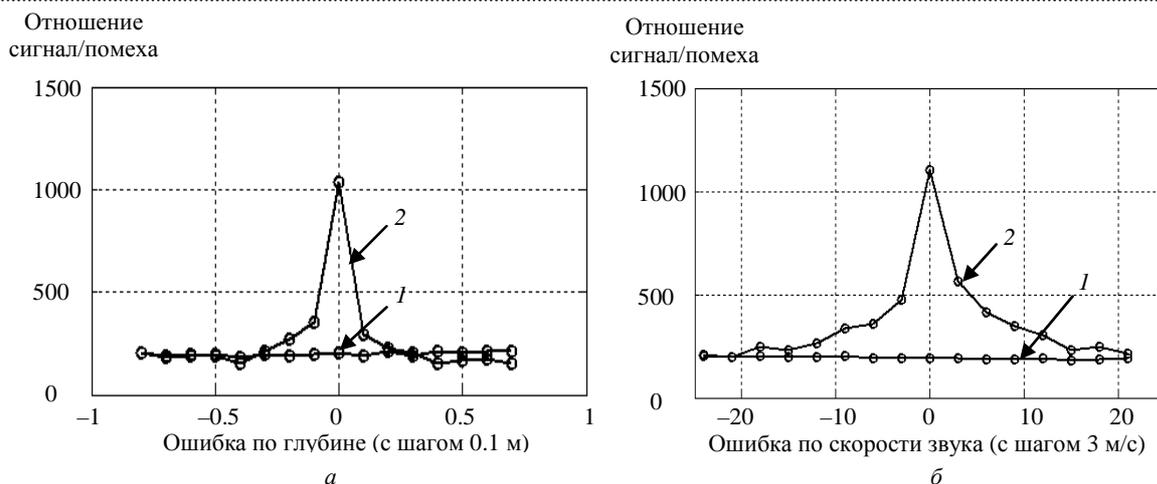


Рис. 7

волновода до 0.5 м. При больших ошибках фазовый метод теряет выигрыш по ОСП по сравнению с традиционным методом и возникает проигрыш на небольшую величину.

Аналогично, на рис. 7, б представлено сравнение ОСП для двух методов при фиксированном значении уровня сигналов для истинной скорости звука 1500 м/с и ошибки с шагом 3 м/с. Ясно, что в этом случае ситуация схожа с результатами на рис. 7, а – фазовый метод показывает заметный выигрыш по сравнению с традиционным методом. Более того, даже при наличии значительных ошибок по скорости звука фазовый метод также

имеет преимущество по сравнению с традиционным методом. Отсюда очевидна его перспективность при использовании в условиях неточного знания характеристик волновода.

Приведенные результаты показывают, что фазовый метод согласованной со средней обработки сигналов является эффективным и устойчивым вариантом реализации первичной обработки сигналов и представляется целесообразным его применение в некоторых практических ситуациях, особенно в случае, когда отсутствует точное знание о глубине волновода и скорости звука.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолаев В. И., Селезнев И. А., Буй Чыонг Занг. Анализ гидролого-акустических характеристик и расчет звукового поля в Северном регионе Восточного моря Вьетнама // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 10. С. 83–91.
2. Буй Ч. З. Анализ и моделирование гидроакустических помех в районе залива Бакбо // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 2. С. 77–86.
3. Ermolaev V., Bui Truong Giang. Modeling of Noise and Acoustic Field Calculations in the Limited Water Area of Beibu Gulf Using Geospatial Data // Information Fusion and Geographic Information Systems (IF AND GIS 2013). Germany: Springer Verlag, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, 2014. P. 277–287.
4. Гладилин А. В., Баронкин В. М. Эффективность алгоритмов обнаружения согласованных с передаточной функцией среды в пассивном режиме // Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. Вып. 41(325). С. 171–183.
5. Underwater Acoustic Noise Model for Shallow Water Communications / José S. G. Panaro, Fábio R. B. Lopes, Leonardo M. Barreira, Fidel E. Souza // XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações «SBTr'12», de Setembro de 2012, Brasília, df. P. 13–16.
6. Селезнев И. А., Янпольская А. А., Буй Чыонг Занг. Обработка гидроакустических сигналов в стационарной системе шумопеленгования с учетом согласования со средой // Гидроакустика: науч.-техн. сб. / ОАО «Концерн "Океанприбор"». 2014. № 19. С. 93–98.

Bui Truong Giang

Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

METHOD OF SIGNAL PROCESSING FOR THE STATIONARY SONAR SYSTEM, WORKING IN THE MODE OF NOISE DIRECTION-FINDING, MATCHED WITH THE DISTRIBUTION CHANNEL

In article algorithms of matched-field processing for the stationary sonar system, working in the mode of noise direction-finding, located in the shallow sea of Vietnam are considered. The program, allowing to make a comparative assessment of the efficiency of adaptive algorithms in comparison with traditional method (excluding distribution conditions) is developed. The stability of offered algorithm to the errors of the assessment of distribution channel characteristics is estimated.

Sonar system, noise direction-finding, shallow sea, matched field processing, distribution channel