

Е. С. Нежевенко, А. А. Сотников

(Новосибирск)

**АДАПТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
В ЗАДАЧАХ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ
ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

Рассмотрен метод обработки гидроакустических сигналов, использующий адаптивную модель помехосигнальной обстановки, включающую в себя среду распространения и находящиеся в ней источники излучения, а также модель приемной антенной решетки. Приведены результаты исследований на программном исследовательском комплексе. Показано, что данный метод может успешно применяться для задач первичной обработки гидроакустических сигналов.

Введение. В настоящее время все более актуальной становится задача пассивного обнаружения малых целей вблизи береговой линии (на шельфе, в фиордах и т. д.). Для такой среды характерны: сильная граничная и объемная реверберация, многолучевое распространение звука, в том числе переотражение гидроакустических сигналов (ГАС) от берегов и дна, а также большое количество локальных помех [1]. В таких условиях эффективно могут работать только адаптивные гидроакустические системы. Исследование существующих алгоритмов адаптивной обработки позволяет сделать вывод, что на текущий момент не существует универсального метода, с помощью которого можно решать комплексные задачи обнаружения целей в условиях сложной помехосигнальной обстановки. Это связано с ограничениями, присущими в той или иной степени каждому известному методу. В основе большинства описанных алгоритмов формирования характеристики направленности (ФХН) лежит решение обратной задачи, когда по известной выборке сигналов, записанных на элементах антенного массива, определяются свойства присутствующих в среде источников акустических колебаний. При таком подходе достоверное и устойчивое решение можно получить только путем сведения общей задачи к какой-либо частной, ограничивая таким образом область применения используемого метода.

Особо отметим случай обработки сигналов для многолучевого распространения гидроакустических сигналов в условиях мелководья, сложного рельефа границ среды и, как следствие, сильной граничной реверберации. При таких условиях идентификация источников звука традиционными методами решения обратной задачи становится практически неразрешимой. Помимо того что сложна сама задача нахождения обратного оператора, в этом случае некоторые параметры прямого оператора часто известны с большой

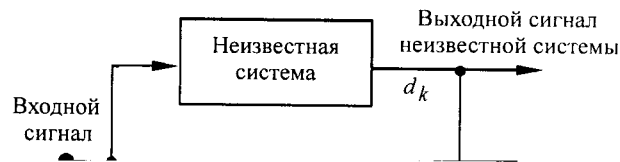


Рис. 1

погрешностью. Поэтому задача определения координат и частот источников должна совмещаться с задачей идентификации среды распространения звуковых волн.

Подобные проблемы возникают при создании адаптивных систем управления, когда некоторые параметры передаточной функции этих систем известны неточно [2, 3]. В таких случаях эффективно применяется адаптивное моделирование, схема которого в соответствии с [2] представлена на рис. 1.

Принцип адаптивного моделирования в системах управления и в гидроакустике. Пусть имеется неизвестная система, которая определенным образом реагирует на входные сигналы (в терминах кибернетики это «черный» или «серый» ящик, последний термин обозначает, что структура системы известна, неизвестны лишь ее параметры). Исходя из данных о структуре системы, сконструируем ее математическую модель. Подадим на вход модели те же сигналы, что и на реальную систему, и будем подстраивать параметры модели в процессе обучения так, чтобы выходной сигнал модели был максимально близок к выходному сигналу объекта. Когда разность между сигналами (сигнал ошибки) станет меньше заданного числа, будем считать, что неизвестная система идентифицирована.

Цель предлагаемой работы – исследование возможности применения концепции адаптивного моделирования для обработки гидроакустических сигналов приемных антенн произвольной формы в сложной среде. Показано, что такая концепция вполне подходит и для идентификации гидроакустических объектов. Неизвестная система здесь – это помехосигнальная обстановка, куда входят источники излучения (цели и локальные помехи) и среда распространения ГАС, а также гидроакустическая антенна. Настраиваемыми параметрами являются как координаты и спектры мощности источников, так и параметры среды распространения ГАС, которые, как правило, известны с некоторой погрешностью. В отличие от адаптивного моделирования систем управления в гидроакустических системах невозможно управлять входными сигналами, поэтому качество идентификации существенно зависит от сложности помехосигнальной обстановки. Парадоксально, но чем больше источников ГАС, т. е. локальных помех, тем более точно можно идентифицировать среду, а затем и цели.

Блок-схема адаптивного моделирования помехосигнальной обстановки приведена на рис. 2. Функциональная диаграмма алгоритма, соответствующего этой блок-схеме, приведена на рис. 3. На первом этапе обработки производится классическое ФХН, или пространственная фильтрация реальных

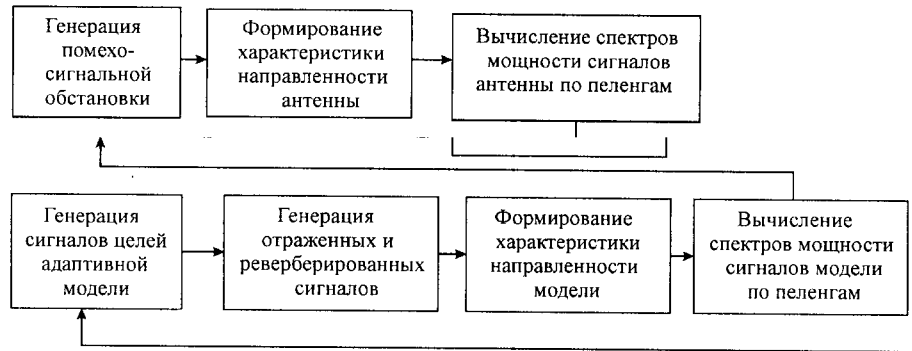


Рис. 2

сигналов $s_{m,k}$ (m – номер гидрофона, k – номер временного отсчета), результатом которого становится двумерный массив спектров мощности $|H|_{l,n}^2$ (здесь l – индекс пеленга, n – индекс частоты дискретного спектра).

На втором этапе на основании известных данных об акватории и конфигурации антенны строится модель акустического поля, образованного точечными источниками звука [1, 4]. Результатом моделирования является массив выборки сигналов гидрофонов $sm_{m,k}$, который обрабатывается аналогично реальным сигналам. Затем по этим данным вычисляется матрица невязки

$$|Hd|_{l,n}^2 = |H|_{l,n}^2 - |Hm|_{l,n}^2,$$

где $|Hm|_{l,n}^2$ – массив спектров мощности для модели.

Если максимальный элемент невязки становится меньше пороговой величины, адаптация прекращается. В противном случае в модель добавляется источник гармонического колебания. Его характеристики (пространственное положение, частота, акустическая интенсивность) рассчитываются на основании данных классического ФХН таким образом, чтобы уменьшить невязку. После этого заново моделируются сигналы гидрофонов и программа начинает новую итерацию адаптации, в которой максимальный элемент в матрице возникает в другом месте, поскольку предыдущий максимум компенсируется адаптированной моделью. Для первой итерации матрицей невязки является сам массив реальных сигналов $|H|_{l,n}^2$. Порог адаптации выбирается исходя из оценок уровня фонового шума и желаемого диапазона звуковой интенсивности целей. На основании модели, полученной в результате адаптации, делается вывод об окружающей обстановке, фиксирование всех источников звука и определение их пространственных и спектральных характеристик.

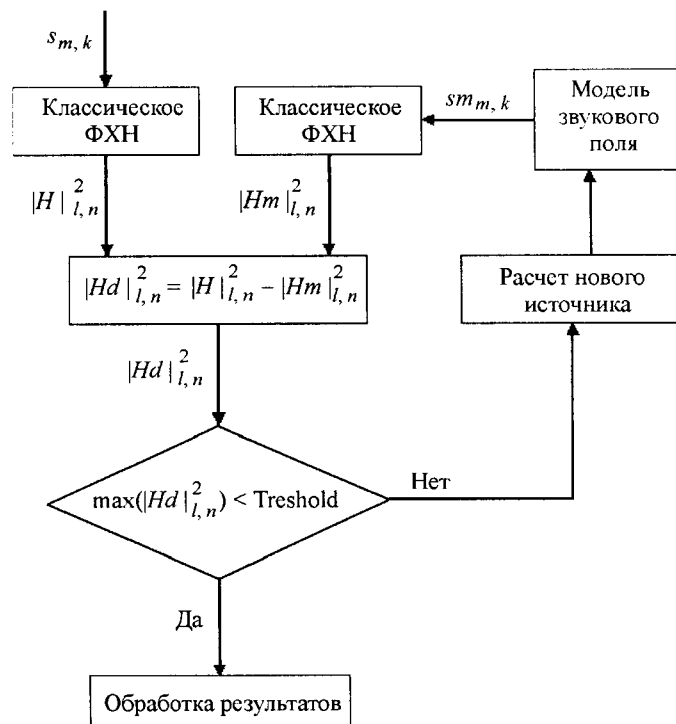


Рис. 3

Программный исследовательский комплекс. С целью исследования данного метода и оценки эффективности его работы в различных условиях для различных антенн был создан программный комплекс, состоящий из программы-генератора помехосигнальной обстановки и программы, реализующей обработку ГАС с применением адаптивного моделирования.

Генератор позволяет моделировать желаемую акустическую среду, наблюдать ее поведение в течение некоторого времени и формировать выборку тестовых сигналов гидрофонов для антенной решетки, находящейся в звуковом поле. При разработке генератора учитывалось, что в настоящее время вместо стационарных или буксируемых антенных решеток с периодическим расположением элементов все чаще используются конформные антенны с произвольным расположением гидрофонов. Для расчета звукового поля, сформированного точечными источниками гармонических колебаний, допустим, что скорость звука в среде постоянна и равна c . Антенна состоит из M гидрофонов. Количество лучей, или траекторий распространения акустических волн от источников к приемнику, для каждого отдельного гидрофона обозначим I_m . В данной работе рассматривается моделирование при отсутствии отражений волн. В этом случае I_m совпадает с количеством источников, а траектория распространения каждого из них представляет собой прямую линию. Выборка сигналов гидрофонов производится с заданной частотой дискретизации F_s . Для каждого источника задается вектор скорости, поэтому через интервал времени $\Delta = 1/F_s$ происходит обновление пространственных координат источника звука. Затем для каждого элемента антенны произво-

дится расчет суммирующего воздействия звуковых полей всех источников и фонового шума N :

$$s_{m,k} = N_{m,k} + \sum_i RT p_i TL \cos \left(2\pi f_i \left(k\Delta - \frac{|\mathbf{r}'_{i,m,k}|}{c} \right) \right),$$

где i – номер луча (источника); p_i – амплитуда колебания i -го луча; f_i – частота звукового колебания i -го источника; $|\mathbf{r}'_{i,m,k}|$ – длина траектории прохождения звука до m -го гидрофона из точки нахождения i -го источника в момент излучения фронта колебания, пришедшего на гидрофон в момент $t = k\Delta$; TL – коэффициент потерь, рассчитываемый по $|\mathbf{r}'_{i,m,k}|$ и f_i (в расчет принимаются потери от расширения фронта и абсорбции (размывания)); RT – функция, определяющая попадание i -го луча в раствор m -го гидрофона в момент времени k :

$$RT = \begin{cases} 0, & \alpha_{i,m,k} \geq \theta_m/2; \\ 1, & \alpha_{i,m,k} < \theta_m/2. \end{cases}$$

Здесь θ_m – раствор m -го элемента антенны, $\alpha_{i,m,k}$ – угол между единичным вектором направленности элемента антенны \mathbf{a}_m и вектором $\mathbf{r}'_{i,m,k}$:

$$\alpha_{i,m,k} = \arccos \left(\frac{(\mathbf{a}_m, \mathbf{r}'_{i,m,k})}{|\mathbf{a}_m| |\mathbf{r}'_{i,m,k}|} \right).$$

Вектор направленности вычисляется из горизонтальной и вертикальной ориентации m -го гидрофона.

Единственный неизвестный параметр, необходимый для расчета звукового поля на гидрофоне – это $\mathbf{r}'_{i,m,k}$. Для нахождения траектории луча допустим, что вектор скорости i -го источника и скорость звука неизменны в течение времени прохождения фронта звука от источника к приемнику. С учетом практической скорости изменения данных параметров в реальных условиях такое допущение обосновано и может быть принято как факт.

Результаты экспериментального исследования. Рис. 4 и 5 являются иллюстрацией к работе программы. Антенна в данном случае представляет собой 360 гидрофонов, расположенных на окружности диаметром 40 м. На расстоянии 1000 м от антенны по различным пеленгам расположено семь точечных источников гармонических колебаний, параметры которых приведены в таблице. Уровень фонового шума 80 дБ. На рис. 4 приведен график распределения спектра звукового поля, полученного традиционным ФХН.

Для порога 77 дБ адаптация заняла 15 шагов. В таблице представлены характеристики точечных источников гармонических колебаний, добавляемых в модель, в сравнении с исходными данными. В процессе адаптации делаются выводы о наличии в среде разных объектов и происходит накопление информации о них. В частности, если два точечных источника, добавленные на разных этапах адаптивного моделирования, имеют одинаковые или соседние частоты и пеленги в пределах ширины основного лепестка антенны (для данных частоты и пеленга), то подразумевается, что они относятся к од-

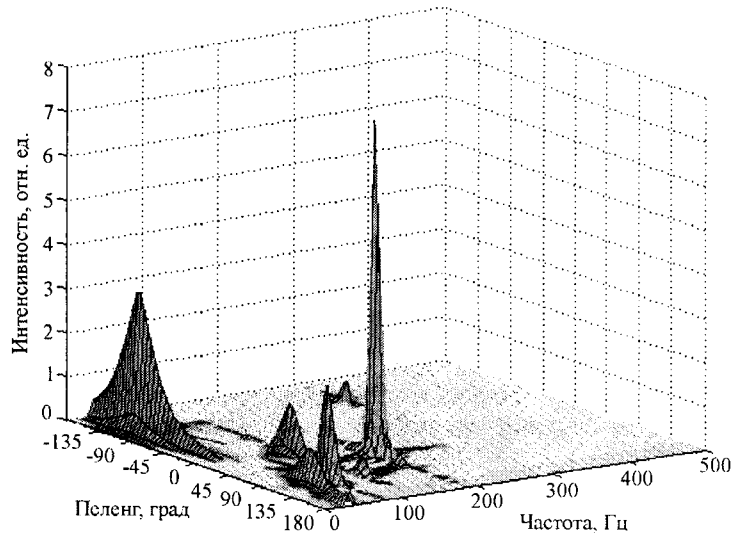


Рис. 4

ному и тому же объекту, пространственное положение которого определяется более ранней итерацией.

В данном случае (см. таблицу) результатом обработки стало фиксирование всех присутствующих источников гармонических колебаний и определение их пространственных, частотных и энергетических характеристик. Время накопления, или временная апертура, здесь 1,024 с (1024 выборки при частоте 1кГц). Таким образом, интервал дискретизации спектра, характеризующий точность определения частоты, равен 0,98 Гц. Результат моделирования можно наблюдать на рис. 5, где изображены сравнительные гра-

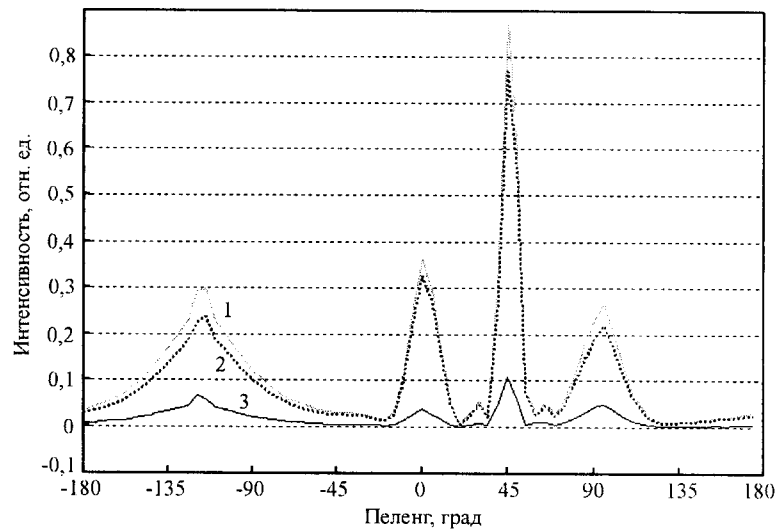


Рис. 5

Трассировка процедуры адаптации

Номер итерации	Параметры исходных источников звука (пеленг, частота, интенсивность колебаний в области приемника)						
	1°	46°	95°	95°	95°	243°	243°
	115 Гц 90 дБ	190 Гц 94 дБ	80 Гц 86 дБ	53 Гц 82 дБ	121,5 Гц 80 дБ	29 Гц 88 дБ	302 Гц 84 дБ
Параметры моделируемых источников (разница с параметрами исходных источников приведена в скобках)							
1	–	46,4° (+0,4°) 190,43 Гц (+0,43 Гц) 90,3 дБ	–	–	–	–	–
2	1,0° (0°) 115,23 Гц (+0,23 Гц) 88,4 дБ	–	–	–	–	–	–
3	–	46,0° (0°) 189,45 Гц (–0,55 Гц) 88,2 дБ	–	–	–	–	–
4	–	–	–	–	–	242,7° (–0,3°) 29,30 Гц (+0,30 Гц) 86,4 дБ	–
5	–	–	94,6° (–0,4°) 80,08 Гц (+0,08 Гц) 85,6 дБ	–	–	–	–
6	–	45,5° (–0,5°) 190,43 Гц (+0,43 Гц) 68,1 дБ	–	–	–	–	–
7	–	–	–	94,1° (–0,9°) 52,73 Гц (–0,27 Гц) 80,1 дБ	–	–	–
8	–	47,0° (+1,0°) 189,45 Гц (–0,55 Гц) 67,7 дБ	–	–	–	–	–

Продолжение таблицы
Трассировка процедуры адаптации

Номер итерации	Параметры моделируемых источников (разница с параметрами исходных источников приведена в скобках)						
	9	-	46,0° (0°) 191,41 Гц (+1,41 Гц) 79,7 дБ	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	242,6° (-0,4°) 301,76 Гц (-0,24 Гц) 80,9 дБ
11	-	46,4° (+0,4°) 188,48 Гц (-1,52 Гц) 78,9 дБ	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	243,0° (0°) 28,32 Гц (-0,68 Гц) 79,0 дБ	-
13	1,4° (+0,4°) 114,26 Гц (-0,74 Гц) 78,3 дБ	-	-	-	-	-	-
14	359,9° (-1,1°) 115,23 Гц (+0,23 Гц) 60,9 дБ	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	94,6° (-0,4°) 121,09 Гц (-0,31 Гц) 76,9 дБ	-	-
Параметры источников звука, зафиксированных путем адаптивного моделирования							
	1,0° 114,26- 115,23 Гц 88,8 дБ	46,4° 188,48- 191,41 Гц 92,8 дБ	94,6° 80,08 Гц 85,6 дБ	94,1° 52,73 Гц 80,1 дБ	94,6° 121,09 Гц 76,9 дБ	242,7° 28,32- 29,30 Гц 87,1 дБ	242,6° 301,76 Гц 80,9 дБ

фики суммарного спектра мощности после адаптации, полученные обработкой реальных данных (кривая 1), данных модели (2) и невязки (3).

Принцип моделирования помехосигнальной обстановки позволяет при формировании невязки компенсировать для каждого источника не только

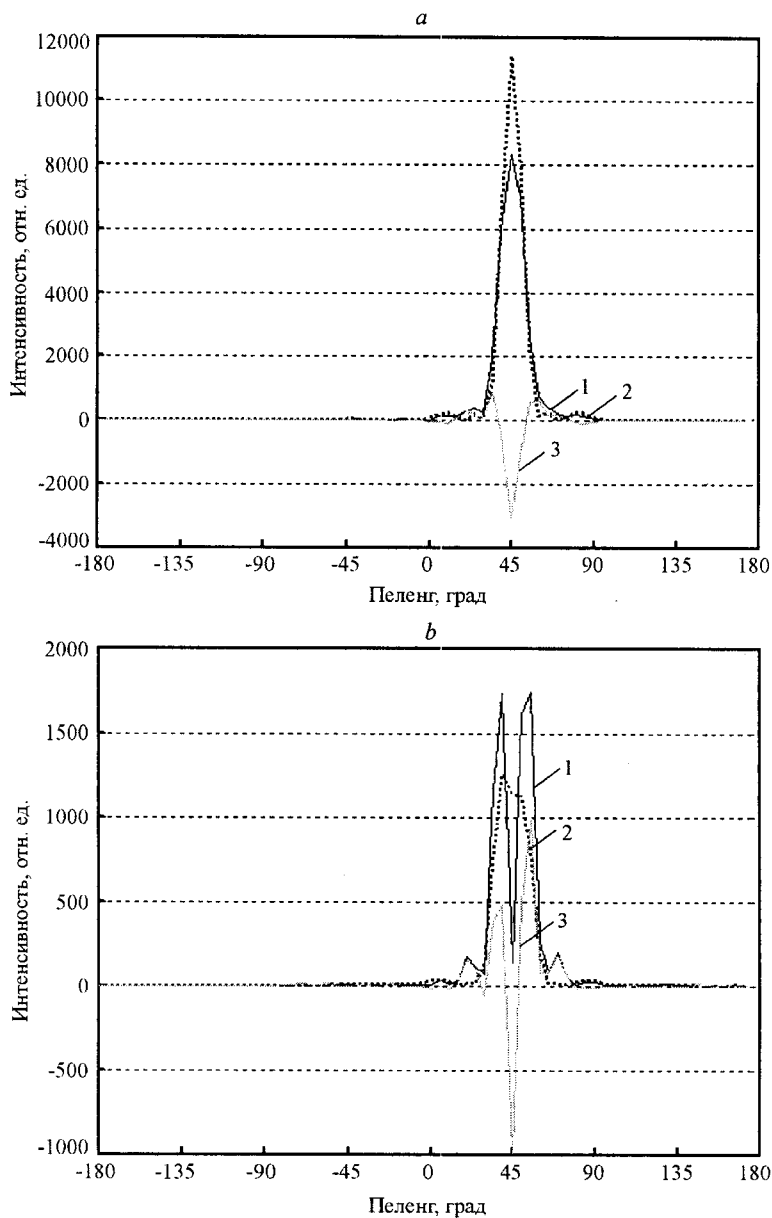


Рис. 6

основной лепесток, но и боковые лепестки основного луча, а также пики, образовавшиеся в результате многолучевого распространения или отражения звуковых волн от границ среды. При таком подходе возможно выявление слабых источников на фоне сильных в гораздо более широком диапазоне интенсивностей звуковых колебаний, чем при традиционном ФХН.

Характерным признаком источника, ошибочно добавленного в модель на основании максимума невязки, не являющегося следствием реального источника звука, будет явно выраженное отрицательное значение для данного

элемента матрицы невязки. Таким образом, если невязка становится меньше отрицательной пороговой величины, делается вывод о неадекватном моделировании и ложный источник из модели убирается.

Например, в случае источников звука с близкими частотами и близким угловым расположением традиционное ФХН будет давать максимумы по другим пеленгам в зависимости от взаимных фаз колебаний. На рис. 6 представлены результаты обработки данных звукового поля, сформированного двумя источниками, расположенными по направлениям $46,2$ и $42,4^\circ$ и излучающими колебание одинаковой частоты (190 Гц). (Графики суммарной мощности спектра после адаптации получены обработкой реальных данных (кривая 1), данных модели (2) и невязки (3).) Помехосигнальная обстановка для рис. 6, *a* и *b* отличается только взаимным смещением фазы источников. Обработка с помощью классического ФХН может дать один максимум на пеленге 44° (см. рис. 6, *a*) или два максимума на пеленгах 38 и 52° (см. рис. 6, *b*). Тем не менее в обоих случаях адаптивное моделирование приводит к значительному отрицательному значению в одном и том же элементе матрицы невязки.

Задача определения угловых координат таких источников может успешно решаться на следующем этапе обработки ГАС некоторыми известными алгоритмами ФХН для конформных антенн, например алгоритмом взвешенной подгонки подпространства, для которых метод адаптивного моделирования позволяет сузить угловой диапазон поиска, дать информацию о частоте звука, а также убрать влияние других источников звука.

Заключение. На основании результатов экспериментов можно сделать выводы о том, что метод адаптивного моделирования:

- 1) позволяет идентифицировать источники звука (координаты и спектры мощности) и уточнять параметры среды распространения звуковых волн;
- 2) работает в условиях когерентных помех, возникающих в результате реверберации и многолучевого распространения;
- 3) обеспечивает существенное повышение точности определения координат целей по сравнению с классическим ФХН, причем это повышение тем больше, чем выше уровень шума и количество целей;
- 4) объем вычислений ставит в зависимость от количества целей (степени сложности помехосигнальной обстановки) и количества итераций (точности вычисления).

Предложенный метод требует большого объема вычислений, поскольку на каждом шаге адаптации производится пространственная фильтрация моделируемых сигналов и вычисление спектра мощности. Однако при аппаратной реализации этого метода, учитывая характер вычислительных процедур, можно применять высокопроизводительные вычислительные средства, в том числе оптоэлектронные [5]. Кроме того, параметры среды, в которой проводится адаптивное моделирование, как правило, известны неточно, что существенно влияет на достоверность модели [4]. Для подстройки параметров среды разрабатывается нейрокомпьютерный вариант адаптивной модели, позволяющий не только проводить адаптацию координат целей, но и уточнять параметры среды: коэффициенты отражения и преломления звука, береговую конфигурацию и т. п.

Результаты обработки гидроакустических сигналов с применением разработанного метода можно использовать для непосредственной идентификации источников звука в случае сложной помехосигнальной обстановки. Для повышения разрешающей способности возможно применение более

точных алгоритмов. В этом случае адаптивное моделирование позволяет получить необходимую для таких алгоритмов априорную информацию о помехосигнальной обстановке, а также выделить цели путем компенсации локальных помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Jensen F. B., Kuperman W. A., Porter M. B., Schmidt H.** Computational Ocean Acoustics. N. Y.: American Institute of Physics, 1994.
2. **Ундрю Б., Стирнз С.** Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1989.
3. **Цыпкин Я. З.** Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968.
4. **Porter M. B.** Acoustic models and sonar systems // IEEE Journ. Oceanic Eng. 1993. **18**, N 4. P. 425.
5. **Гофман М. А., Нежевенко Е. С., Фельдбуш В. И.** Оптико-электронные сигнальные процессоры // Автометрия. 1989. № 3. С. 53.

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
E-mail: sotnikov@iae.nsk.su*

*Поступила в редакцию
8 апреля 2004 г.*