

Раздел IV. Применение суперкомпьютерных технологий в науке, технике и промышленности

УДК 681.883.77

DOI 10.18522/2311-3103-2016-11-121132

А.И. Машошин

УЧЕТ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ АЛГОРИТМОВ КЛАССИФИКАЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ*

Как известно, основным отличием гидроакустического поля от полей другой физической природы является сложная зависимость закона распространения сигнала от текущих гидроакустических условий (ГАУ) в районе работы. Ввиду этого алгоритмы решения большинства практических задач гидроакустики, которые, как правило, являются обратными задачами, должны учитывать текущие ГАУ, т.е. должны быть согласованными со средой распространения гидроакустических сигналов. Отличительной особенностью структуры алгоритмов, согласованных со средой, является то, что на их вход, кроме параметров сигналов, измеренных на выходе приёмной гидроакустической антенны, поступает модель передаточной характеристики канала распространения сигнала, сформированная с использованием параметров текущих ГАУ, полученных тем или иным способом. Классификация морских объектов по излучаемым ими шумам является одной из наиболее сложных практических задач гидроакустики, решение которой должно учитывать текущие ГАУ. Обусловлено это тем, что решение о классе наблюдаемого объекта нужно принять на основе анализа параметров сигнала, прошедшего через океанический волновод и существенно преобразованного им. Причем содержание и степень этого преобразования зависит от текущих ГАУ в районе. Целью работы является изложение подхода к учету гидроакустических условий при разработке и реализации алгоритмов классификации шумящих объектов. В работе кратко излагается методика синтеза алгоритма классификации, согласованного со средой, а также его разновидности – алгоритма совместного решения задач классификации и определения координат морских шумящих объектов. Приводится и обсуждается вычислительная схема реализации синтезированного алгоритма, которая предполагает 2 циклических процесса: процесс формирования моделей рабочих КП и процесс определения класса и координат объекта. Оба процесса являются асинхронными: вычисления запускаются при получении новых входных данных, что для первого процесса происходит один раз в 1–2 часа, а для второго с интервалом 1–20 с. На каждом цикле обоих процессов реализуются однотипные вычисления, отличающиеся только входными данными. Вычисления, выполняемые на каждом цикле, хорошо распараллеливаются, поскольку включают большое число однотипных вычислений. Ввиду существенно различающейся цикличности процессы предъявляют разные требования к быстродействию вычислителя: если для реализации первого процесса достаточно ЭВМ общего назначения с производительностью в десятки Мфлопс, то для реализации второго процесса необходим специализированный процессор с производительностью в единицы Гфлопс.

Гидроакустика; классификация морских объектов; гидроакустические условия; вычислительная схема алгоритма.

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-08-02928-а).

A.I. Mashoshin

THE HYDROACOUSTIC CONDITIONS CONSIDERING WHEN SOLVING THE PROBLEM OF SEA OBJECTS CLASSIFICATION AND THEIR COORDINATES DETERMINATION

As known, the main peculiarity of hydro acoustic field is a complicated dependence of signal propagation law on hydro acoustic conditions in the region. That is why the algorithms solving the majority of the practical problems, which as a rule are the inverse, must consider the current hydro acoustic conditions or in other words they must be matched with signal propagation medium. The distinctive peculiarity of matched field algorithms structure is that their input receives not only the signal parameters measured at the hydro acoustic antenna output but so it receives the model of the transmission characteristic of the propagation channel which has been formed using current condition parameters. The classification of the sea objects on background of processing their radiated noise is one of the most complicated practical hydro acoustic problems. Its solution must consider the current hydro acoustic conditions because the decision about the object class must be adopted on the background of parameters analyses of the signal which had traveled through the oceanic waveguide and had been transformed by it in accordance with the hydro acoustic conditions in the waveguide. The target of the work is to discuss the approach to consideration of the hydro acoustic conditions when developing and realizing noisy sea objects classification algorithms. The work contains the brief description of the methodology of the syntheses of classification algorithm and its species, namely the algorithm of simultaneous object classification and ranging. The computing circuit of implementation of the synthesized algorithm which assumes 2 cyclic processes, namely the process of formation of working models of classification features and the process of object classification and ranging, is brought and discussed. Both processes are asynchronous: computation is launched when obtaining new input data that for the first process occur once in 1–2 hours, and once in 1–20 seconds for the second. On each cycle of both processes the same computation differing only in input data is implemented. The computation executed on each cycle is well parallelized as includes a large number of the same computations. The process demand different requirements for the calculator speed: tens Mflops for the first process and some Gflops for the second process.

Hydro acoustics; sea object classification; hydro acoustic conditions; algorithm computational scheme.

Введение. Как известно [1–3], основным отличием гидроакустического поля от полей другой физической природы является сложная зависимость закона распространения сигнала от текущих гидроакустических условий (ГАУ) в районе работы. Ввиду этого алгоритмы решения большинства практических задач гидроакустики, которые, как правило, являются обратными задачами, должны учитывать текущие ГАУ, т.е. должны быть согласованными со средой распространения гидроакустических сигналов [4–12].

Обобщенная структура алгоритмов, согласованных со средой, приведена на рис. 1. Её отличительной особенностью является то, что на вход алгоритма, кроме параметров входных сигналов, измеренных на выходе приёмной гидроакустической антенны, поступает модель передаточной характеристики канала распространения сигнала, сформированная с использованием параметров текущих ГАУ, измеренных с применением специальных технических средств (глубина моря, вертикальное распределение скорости звука, волнение поверхности, толщина ледового покрова) либо считанных с цифровых морских карт (рельеф дна), либо загруженных из баз гидрологических данных (коэффициенты затухания, отражения, рассеяния).

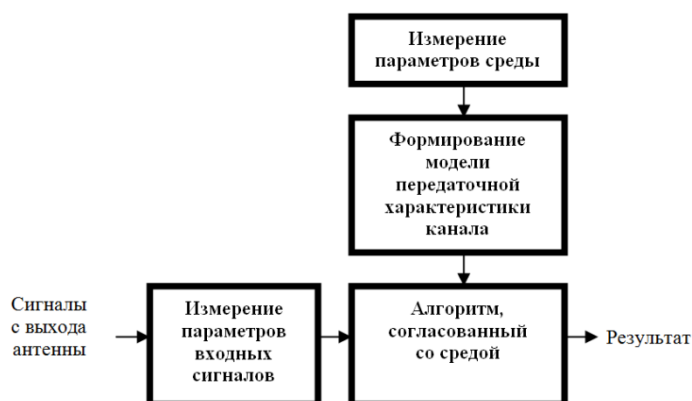


Рис. 1. Обобщенная структура алгоритмов, согласованных со средой

Формирование модели передаточной характеристики канала распространения сигнала осуществляется системой гидроакустических расчётов [13]. Заметим, что используемые модели передаточной характеристики канала носят статистический характер [2, 14], что обусловлено неточным знанием параметров ГАУ, их флуктуацией во времени и в пространстве и ограниченной точностью гидроакустических расчётов.

Классификация морских объектов по излучаемым ими шумам является одной из наиболее сложных практических задач гидроакустики, решение которой должно учитывать текущие ГАУ [15–19]. Обусловлено это тем, что решение о классе наблюдаемого объекта нужно принять на основе анализа параметров сигнала, прошедшего через океанический волновод и существенно преобразованного им. Причем содержание и степень этого преобразования зависит от текущих ГАУ в районе.

Целью работы является изложение подхода к учету гидроакустических условий при разработке и реализации алгоритмов классификации шумящих объектов. Излагается методика синтеза алгоритма классификации, согласованного со средой, и его разновидности – алгоритма совместного решения задач классификации и определения координат морских шумящих объектов. Приводится вычислительная схема реализации синтезированного алгоритма, отличающаяся высокой степени параллелизма.

Методика синтеза алгоритма классификации морских объектов. В самом общем виде задача классификации морских объектов по излучаемым ими сигналам состоит в сравнении параметров сигнала объекта, измеренных на выходе гидроакустической антенны, со статистическими моделями этих параметров, сформированными для каждого из распознаваемых классов с учетом модели канала распространения сигнала. В качестве результата классификации принимается тот класс, для которого имеет место наилучшее (с точки зрения выбранного критерия) согласование измеренных параметров с их моделями.

Синтез алгоритма классификации морских объектов по излучаемым ими сигналам, учитывающего гидроакустические условия, осуществляется следующим образом [15].

1) Формируется алфавит классов морских объектов, подлежащих распознаванию, $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K\}$, где K – количество классов.

2) Формируется вектор $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_L\}$, содержащий, так называемые, исходные классификационные признаки (КП), которыми являются параметры, отражающие физические особенности шумоизлучения, расположения и поведения объектов каждого класса. Исходными КП являются:

- ◆ параметры частотно-временной структуры сигнала, излучаемого объектом, и их динамика во времени;
- ◆ глубина погружения объекта;
- ◆ скорость хода объекта;
- ◆ и другие.

3) Для каждого исходного КП X_i , принадлежащего вектору \mathbf{X} , строится его вероятностная модель в точке излучения в виде условной (в зависимости от класса объекта ω_k) плотности распределения вероятностей (ПРВ) $g_{X_i/\omega_k}(x)$.

4) Далее исследуется трансформация каждого исходного КП при распространении сигнала в океаническом волноводе. В результате этого исследования формируется вектор $\mathbf{Y} = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_N\}$, содержащий совокупность рабочих КП (или просто КП), которыми являются параметры сигнала объекта, которые могут быть измерены на выходе гидроакустической антенны и несут информацию о классе объекта. К рабочим КП относятся параметры:

- ◆ лучевой (модовой) структуры сигнала, включающие углы прихода, относительные запаздывания и амплитуды лучей (мод) на входе приёмной антенны;
- ◆ частотной структуры сигнала, принимаемого по каждому лучу (форма и уровень сплошной части спектра, параметры дискретных составляющих), и их динамики во времени;
- ◆ дискретной части спектра амплитудной огибающей сигнала, принимаемого по каждому лучу;
- ◆ другие.

Следует особо отметить, что распространение сигнала морского объекта в океаническом волноводе, с одной стороны, приводит к искажению части исходных КП (это, в частности, относится к форме частотного спектра сигнала), а, с другой стороны, формирует новые рабочие КП, напрямую не связанные с исходными КП (в частности, лучевая структура сигнала, обусловленная ГАУ в районе, несёт информацию о глубине излучающего объекта и дистанции до него).

5) Затем разрабатываются вероятностные модели рабочих КП, учитывающие модели исходных КП, модель волновода, модель приёмного тракта и статистические ошибки измерения КП на его выходе. Модель рабочего КП Y_j имеет вид:

$$\hat{Y}_j = f_j(\mathbf{X}, \mathbf{W}, \mathbf{B}) + \Delta Y_j, \quad j=1, \dots, N, \quad (1)$$

где \hat{Y}_j – оценка рабочего КП Y_j ; $f_j(\mathbf{X}, \mathbf{W}, \mathbf{B})$ – неслучайная функция с неслучайными аргументами, связывающая истинное значение КП Y_j с истинными значениями исходных КП, содержащихся в векторе \mathbf{X} , истинными значениями вектора \mathbf{W} , содержащего параметры волновода, и истинными значениями вектора \mathbf{B} , содержащего параметры приёмного тракта:

$$Y_j = f_j(\mathbf{X}, \mathbf{W}, \mathbf{B}), \quad j=1, \dots, N; \quad (2)$$

ΔY_j – ошибка измерения КП Y_j .

Следует заметить, что ошибки измерения КП ΔY_j , как правило, взаимно не зависимы, чего нельзя сказать об оценках КП \hat{Y}_j , которые являются взаимно зависимыми в силу идентичных аргументов функций $f_j(\mathbf{X}, \mathbf{W}, \mathbf{B})$.

б) Синтезируется алгоритм вычисления совместной условной (в зависимости от класса объекта) ПРВ оценки вектора \mathbf{Y} :

$$g_{\hat{\mathbf{Y}}/\omega_k}(y_1, y_2, \dots, y_N) = \int_{\mathbf{x}} \int_{\mathbf{w}} g_{\mathbf{x}/\omega_k}(\mathbf{x}) \cdot g_{\mathbf{w}}(\mathbf{w}) \cdot \prod_{j=1}^N g_{\Delta Y_j}(y_j - f_j(\mathbf{X}, \mathbf{W}, \mathbf{B})) \cdot d\mathbf{x} \cdot d\mathbf{w}, \quad k=1, \dots, K, \quad (3)$$

где $g_{\mathbf{w}}(\mathbf{w})$ – ПРВ вектора \mathbf{W} , содержащего параметры волновода; $g_{\Delta Y_j}(z)$ – ПРВ ошибки измерения параметра \hat{Y}_j . Интегрирование в правой части формулы (3) осуществляется по областям определения векторов \mathbf{X} и \mathbf{W} .

7) Формируется алгоритм принятия решения о классе объекта

$$\omega_{opt} = \arg \max_{\omega_k} P_{аност}(\omega_k, \hat{\mathbf{Y}}), \quad (4)$$

где ω_{opt} – оптимальное (по критерию максимума апостериорной вероятности) решение о классе объекта; $P_{аност}(\omega_k, \hat{\mathbf{Y}})$ – апостериорная вероятность принадлежности объекта классу ω_k , вычисляемая по формуле:

$$P_{аност}(\omega_k, \hat{\mathbf{Y}}) = \frac{g_{\hat{\mathbf{Y}}/\omega_k}(\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_N)}{\sum_{m=1}^M g_{\hat{\mathbf{Y}}/\omega_m}(\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_N)}, \quad k=1, \dots, K; \quad (5)$$

$g_{\hat{\mathbf{Y}}/\omega_k}(\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_N)$ – функция правдоподобия (ФП) принадлежности объекта классу ω_k , получаемая путем подстановки в условную ПРВ $g_{\hat{\mathbf{Y}}/\omega_k}(y_1, y_2, \dots, y_N)$ вместо неслучайных аргументов y_j оценок соответствующих параметров, составляющих вектор $\hat{\mathbf{Y}}$.

Таким образом, классификация морских объектов осуществляется в соответствии с алгоритмом (4), который является согласованным со средой, поскольку условная ПРВ оценок рабочих КП, лежащая в основе этого алгоритма (формула (3)), вычисляется с учетом вероятностной модели среды, в качестве которой выступает ПРВ параметров волновода $g_{\mathbf{w}}(\mathbf{w})$.

При этом следует заметить, что эффективность классификации морских объектов существенно зависит от того, насколько точно вероятностная модель волновода $g_{\mathbf{w}}(\mathbf{w})$ соответствует действительности. А поскольку эта точность определяется возможностями технических средств по оперативному контролю текущих ГАУ, можно сделать вывод о необходимости всемерного развития этих средств.

Структура алгоритма классификации морских объектов приведена на рис. 2. Поясним её. При работе гидроакустического средства периодически измеряются переменные акустические характеристики среды в районе работы (вертикальное распределение скорости звука, волнение поверхности моря) (блок 1). Эти переменные характеристики среды вместе с постоянными характеристиками для района работы (рельеф дна, акустические характеристики дна и толщи воды), загружаемыми из баз гидрологических данных, поступают на вход системы гидроакустических расчетов, которая рассчитывает коэффициенты передачи среды для сиг-

налов, распространяющихся из разных точек пространства (блок 2). Из специального банка извлекаются статистические модели исходных (в точке излучения) классификационных признаков объектов, подлежащих распознаванию (блок 3). В блоке 4 по формуле (3) с использованием моделей исходных классификационных признаков классов объектов и коэффициентов передачи среды для каждого из них формируются статистические модели рабочих КП для каждого класса, усредненные по всем возможным координатам объекта данного класса. В блоке 5 путем обработки сигнала объекта происходит циклическое измерение рабочих КП. В блоке 6 по формуле (5) вычисляются апостериорные вероятности принадлежности объекта каждому из распознаваемых классов и принимается решение в пользу того класса, которому соответствует наибольшая из вычисленных апостериорных вероятностей (формула (4)). Сама эта апостериорная вероятность является оценкой достоверности принятого решения.

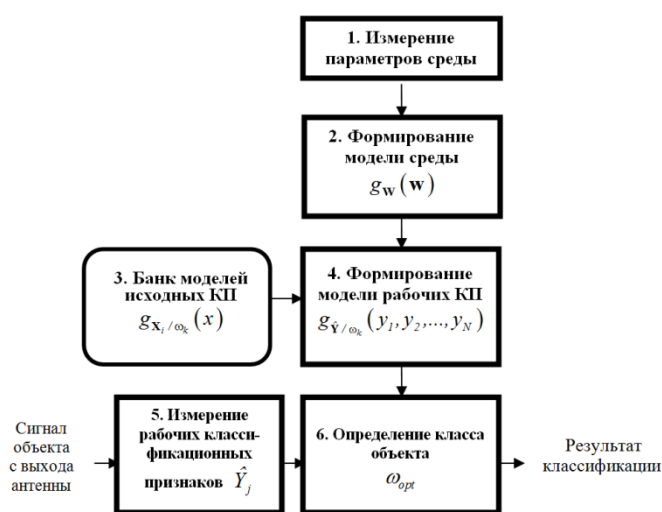


Рис. 2. Структура алгоритма классификации

Методика синтеза алгоритма совместного решения задач классификации и пассивного определения координат обнаруженных объектов. Определение координат морских объектов (дальности и глубины) в пассивном режиме работы гидроакустических средств (по излучаемым ими сигналам) по сложности стоит в одном ряду с задачей их классификации [20–23].

Проведенные исследования [20] привели к выводу, что информация о координатах морского объекта, излучающего сигнал, содержится в тех же параметрах сигнала, что и информация о классе цели. И это вполне естественно, поскольку определив координаты объекта, как правило, можно с уверенностью сказать о его классе и наоборот.

Из сделанного вывода следует, что задачи классификации и определения координат морских объектов целесообразно решать совместно.

Алгоритм совместного решения названных задач в целом аналогичен рассмотренному в предыдущем разделе алгоритму решения задачи классификации. Отличие состоит только в том, что условная ПРВ оценки вектора \mathbf{Y} формируется зависящей не только от класса объекта ω_k , но и от координат объекта – дистанции R и глубины H :

$$g_{\hat{Y}/\omega_k, R, H}(y_1, y_2, \dots, y_N) = \int \int_{\mathbf{X} \mathbf{W}} g_{\mathbf{X}/\omega_k}(\mathbf{x}) \cdot g_{\mathbf{W}}(\mathbf{w}) \cdot \prod_{j=1}^N g_{\Delta Y_j}(y_j - f_j(\mathbf{X}, \mathbf{W}, \mathbf{B}, R, H)) \cdot d\mathbf{x} \cdot d\mathbf{w}, \quad (6)$$

где $f_j(\mathbf{X}, \mathbf{W}, \mathbf{B}, R, H)$ – неслучайная функция с неслучайными аргументами, связывающая истинное значение КП Y_j с конкретными (неслучайными) значениями векторов \mathbf{X} , \mathbf{W} , \mathbf{B} , а также скалярных величин R и H .

В результате решение выносится в 3 этапа:

- 1) на 1-м этапе для каждого распознаваемого класса определяются координаты объекта $R_{opt/\omega_k}, H_{opt/\omega_k}$, которым соответствует наибольшее значение ФП $g_{\hat{Y}/\omega_k, R, H}(\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_N)$:

$$(R_{opt/\omega_k}, H_{opt/\omega_k}) = \arg \max_{R, H} g_{\hat{Y}/\omega_k, R, H}(\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_N), \quad k=1, \dots, K; \quad (7)$$

- 2) на 2-м этапе вычисляются апостериорные вероятности принадлежности объекта каждому классу ω_k при условии, что его координаты равны $R_{opt/\omega_k}, H_{opt/\omega_k}$:

$$P_{аносм}(\omega_k // R_{opt/\omega_k}, H_{opt/\omega_k}) = \frac{g_{\hat{Y}/\omega_k, R_{opt/\omega_k}, H_{opt/\omega_k}}(\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_N)}{\sum_{m=1}^M g_{\hat{Y}/\omega_m, R_{opt/\omega_k}, H_{opt/\omega_k}}(\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_N)}, \quad k=1, \dots, K; \quad (8)$$

- 3) на 3-м этапе в качестве решения выбирается класс, которому соответствует наибольшая из вычисленных апостериорных вероятностей:

$$\omega_{opt} = \arg \max_{\omega_k} P_{аносм}(\omega_k // R_{opt/\omega_k}, H_{opt/\omega_k}). \quad (9)$$

В результате решением задачи является класс объекта ω_{opt} и его координаты

$$R_{opt/\omega_{opt}}, H_{opt/\omega_{opt}}.$$

Алгоритм совместного решения задач классификации и определения координат морских объектов также является согласованным со средой, поскольку условная ПРВ оценок рабочих КП, лежащая в основе этого алгоритма (формула (6)), вычисляется с учетом вероятностной модели среды, в качестве которой выступает ПРВ параметров волновода $g_{\mathbf{W}}(\mathbf{w})$. И как и в случае решения задачи классификации, точность определения координат морских объектов с использованием этого алгоритма существенно зависит от точности знания модели среды.

Структура алгоритма совместного решения задач классификации и определения координат морских объектов приведена на рис. 3. Её отличие от структуры, изображенной на рис.2, состоит в следующем: в блоке 4 сформированные статистические модели рабочих КП не усредняются по возможным координатам объекта, а в блоке 6 сначала для каждого распознаваемого класса определяются наиболее вероятные координаты объекта, а затем вычисляются вероятности принадлежности объекта каждому из распознаваемых классов при условии нахождения объекта в точке с наиболее вероятными координатами для данного класса.

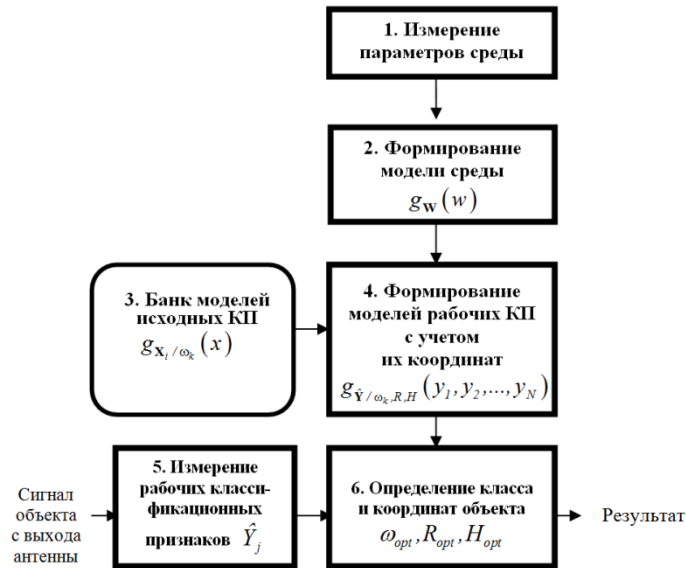


Рис. 3. Структура алгоритма совместного решения задач классификации и определения координат морских объектов

Структура вычислительного процесса, реализующего алгоритм совместного решения задач классификации и пассивного определения координат. Как следует из описания алгоритма, его реализация предполагает 2 циклических процесса:

1) процесс формирования моделей рабочих КП. Данный процесс объединяет блоки 2–4 на рис. 3. Процесс является асинхронным: вычисления запускаются при получении из блока 1 новых данных о параметрах среды, что происходит с интервалом 1–4 часа. На каждом цикле процесса реализуются однотипные вычисления, отличающиеся только входными данными. Вычисления, выполняемые на каждом цикле, хорошо распараллеливаются, поскольку включают большое число однотипных вычислений по формуле (6) условной ПРВ вектора \hat{Y} для каждой возможной точки расположения объекта;

2) процесс определения класса и координат объекта. Данный процесс реализуется в блоке 6 на рис. 3. С вычислительной точки зрения данный процесс похож на предыдущий:

- ◆ он также является асинхронным: вычисления запускаются при получении из блока 5 новых замеров рабочих КП, что происходит с интервалом 1–20 с;
- ◆ на каждом цикле процесса реализуются однотипные вычисления, отличающиеся только входными данными;
- ◆ вычисления, выполняемые на каждом цикле, хорошо распараллеливаются, поскольку включают большое число однотипных вычислений функции правдоподобия $g_{\hat{Y}/\omega_k, R, H}(\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_N)$ для каждой из возможных точек нахождения объекта.

Структура вычислительного процесса, реализующего алгоритм совместного решения задач классификации и пассивного определения координат, приведена на рис. 4.

Ввиду существенно различающейся цикличности процессы предъявляют разные требования к быстродействию вычислителя: если для реализации 1-го процесса достаточно ЭВМ общего назначения с производительностью в десятки Мфлопс, то для реализации 2-го процесса необходим спецпроцессор с производительностью в единицы Гфлопс.

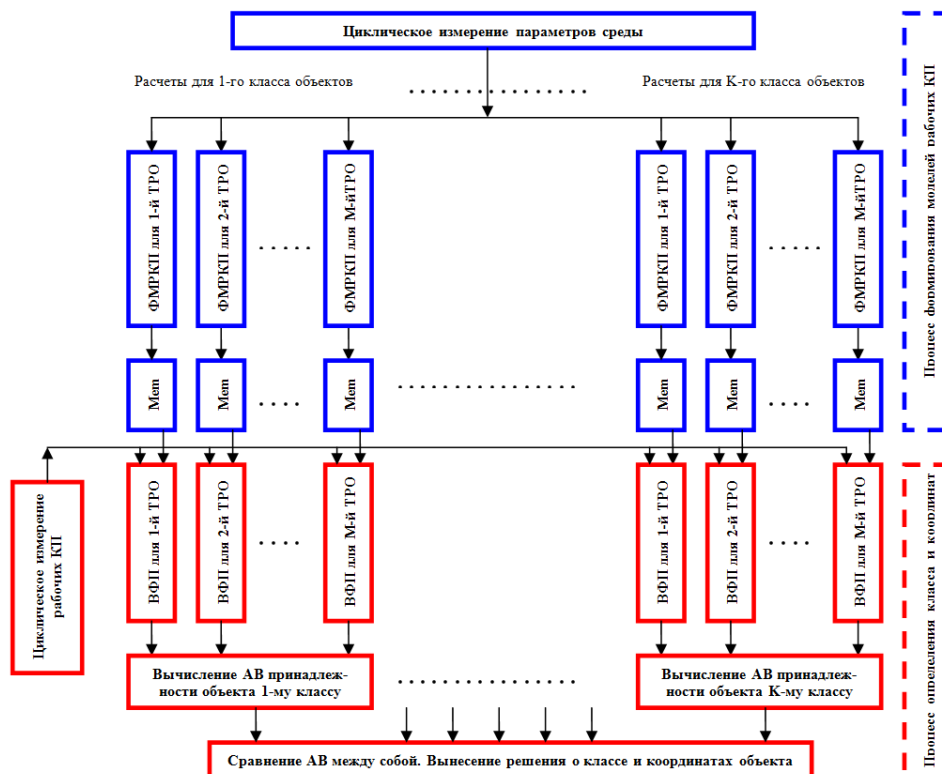


Рис. 4. Структура вычислительного процесса, реализующего алгоритм совместного решения задач классификации и пассивного определения координат (ФМРКП – формирование моделей рабочих КП; ТРО – точка расположения объекта; ВФП – вычисление функции правдоподобия; Мем – память; АВ – апостериорная вероятность)

Выводы. В работе изложен подход к учету гидроакустических условий при разработке и реализации алгоритмов классификации морских шумящих объектов. Изложена методика синтеза алгоритма классификации, согласованного со средой, и его разновидности – алгоритма совместного решения задач классификации и определения координат морских шумящих объектов. Приведена вычислительная схема реализации синтезированного алгоритма, отличающаяся высокой степени параллелизма.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики. – Л.: Судостроение, 1978. – 448 с.
2. Акустика океана / под ред. Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1974.
3. Распространение звука во флюктуирующем океана / под ред. С. Флатте. – М.: Мир, 1982. – 336 с.

4. *Bucker H.P.* Use of calculated sound fields and matched field detection to locate sources in shallow water // *Journal of the Acoustical Soc. of America*. – 1976. – Vol. 59, No 2. – P. 368-373.
5. *Baggeroer A.B., Kuperman W.A., Schmidt H.* Matched field processing: Source localization in correlated noise as an optimum parameter estimation problem // *J. of the Acoustical Society of America*. – 1988. – Vol. 83. – P. 571-587.
6. *Baggeroer A.B., Kuperman W.A.* Matched Field Processing in Ocean Acoustics // in *Acoustic Signal Processing for Ocean Exploration*, ed. by J.M.F. Moura and I.M.G. Loutrie, Kluwer Publishing, 1993.
7. *Tolstoy A.* Matched Field Processing for Ocean Acoustics. – New Jersey: World Scientific Publishing Co., 1993.
8. *Зуйкова Н.В., Свет В.Д.* Согласованная обработка сигналов в океанических волноводах // *Акустический журнал*. – 1993. – Т. 39. – Вып. 3. – С. 389-403.
9. *Porter M.D., Tolstoy A.* The matched field processing benchmark problems // *J. of Computational Acoustics*. – 1994. – No. 3. – P. 161-185.
10. *Мальшикин Г.С.* Современное состояние с разработкой методов и алгоритмов обработки гидроакустических сигналов, согласованных со средой распространения: Труды XI Всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики". – СПб.: Наука, 2012. – С. 369-371.
11. *Сазонтов А.Г., Малеханов А.И.* Согласованная пространственная обработка сигналов в подводных звуковых каналах (обзор) // *Акустический журнал*. – 2015. – Т. 61, № 2. – С. 233-253.
12. *Baggeroer A.B.* Why did applications of MFP fail, or did we not understand how to apply MFP? // *Proceedings of the 1st International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics*. – Corfu Island, Greece: Heraklion, 2013. – P. 41-49.
13. *Марасёв С.В., Маиошин А.И.* Задачи, решаемые системой гидроакустических расчётов // *Морская радиоэлектроника*. – 2015. – № 2 (52). – С. 40-45.
14. *Марасёв С.В., Маиошин А.И.* Расчет дальности действия гидроакустических средств в условиях неполного знания о текущих гидроакустических условиях // 7-я российская мультikonференция по проблемам управления. Материалы конференции "Управление в морских и аэрокосмических системах" (УМАС-2014), г. Санкт-Петербург, 7-9 октября. – 2014. – С. 809-812.
15. *Маиошин А.И.* Особенности синтеза алгоритмов классификации подводных объектов по их гидроакустическому полю // *Акустический журнал*. – 1996. – Т. 42. – № 3. – С. 396-400.
16. *Broadhead M.K.* Broadband source signature extraction from underwater acoustics data with sparse environment information // *JASA*. – 1995. – Vol. 97. – P.1322-1325.
17. *Azimi-Sadjadi M.R., Yao D., Jamshidi A.A., Dobeck G.J.* Underwater target classification in changing environments using an adaptivefeature mapping // *IEEE Transactions on neural networks*. – 2002. – Vol. 13, No. 5. – P. 1099-1111.
18. *Jimenez L.A.T., Mayen H.G., Arteagoitia O.B., Garza D., Torres R.* System for acoustic detection and autonomous classification of targets in the sea (SIDACAM) // *Proceedings of 3rd Underwater Acoustics Conference and Exhibition, 21-26 June 2015, Crete island, Greece*. – 2015. – P. 137-144.
19. *Fischell E.M., Schmidt H.* Classification of underwater targets from autonomous underwater vehicle sampled bistatic acoustic scattered fields // *JASA*. – 2015. – Vol. 138. – P. 3773.
20. *Маиошин А.И.* Об одном подходе к совместному решению задач классификации и определения координат подводных объектов по их гидроакустическому полю // *Акустический журнал*. – 1999. – Т. 45, № 1. – С. 124-127.
21. *Lucas C., Heard G.J., Pelavas N.* DRDC Starfish acoustic sentinel and phase gradient histogram tracking // *Proceedings of 3rd Underwater Acoustics Conference and Exhibition, 21-26 June 2015, Crete island, Greece*. – 2015. – P. 669-676.
22. *Bao C., Ma S., Zhang Z., Hu X., Wu Y., Meng Z.* A robust passive source localization method using a single vector sensor // *Proceedings of 3rd Underwater Acoustics Conference and Exhibition, 21-26 June 2015, Crete island, Greece*. – 2015. – P. 857-864.
23. *Skarsoulis E., Papadakis P., Kalogerakis M., Piperakis G., Orfanakis E.* A passive acoustic localization system for broadband sources // *Proceedings of 3rd Underwater Acoustics Conference and Exhibition, 21-26 June 2015, Crete island, Greece*. – 2015. – P. 341-348.

REFERENCES

1. *Urik R. Dzh.* Osnovy gidroakustiki [Principles of underwater sound]. Leningrad: Sudostroenie, 1978, 448 p.
2. Akustika okeana [Underwater acoustics], ed. by L.M. Brekhovskikh. Moscow: Nauka, 1974.
3. Rasprostranenie zvuka vo flyuktuiruyushchem okeana [Sound transmission through a fluctuating ocean], ed. by S. Flatte. Moscow: Mir, 1982, 336 p.
4. *Bucker H.P.* Use of calculated sound fields and matched field detection to locate sources in shallow water, *Journal of the Acoustical Soc. of America*, 1976, Vol. 59, No. 2, pp. 368-373.
5. *Baggeroer A.B., Kuperman W.A., Schmidt H.* Matched field processing: Source localization in correlated noise as an optimum parameter estimation problem, *J. of the Acoustical Society of America*, 1988, Vol. 83, pp. 571-587.
6. *Baggeroer A.B., Kuperman W.A.* Matched Field Processing in Ocean Acoustics, in *Acoustic Signal Processing for Ocean Exploration*, ed. by J.M.F. Moura and I.M.G. Loutrier, *Kluwer Publishing*, 1993.
7. *Tolstoy A.* Matched Field Processing for Ocean Acoustics. New Jersey: World Scientific Publishing Co., 1993.
8. *Zuykova N.V., Svet V.D.* Soglasovannaya obrabotka signalov v okeanicheskikh volnovodakh [Matched Field Processing in ocean waveguide], *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskij Zhurnal], 1993, Vol. 39, Issue 3, pp. 389-403.
9. *Porter M.D., Tolstoy A.* The matched field processing benchmark problems, *J. of Computational Acoustics*, 1994, No. 3, pp. 161-185.
10. *Malyshekin G.S.* Sovremennoe sostoyanie s razrabotkoy metodov i algoritmov obrabotki gidroakusticheskikh signalov, soglasovannykh so sredoy rasprostraneniya [Modern state of the matched field processing algorithms design], *Trudy XI Vserossiyskoy konferentsii "Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki"* [Proceedings of the XI Allrussian conference "Applied technologies of hydroacoustics and hydrophysics"]. St. Petersburg: Nauka, 2012, pp. 369-371.
11. *Sazontov A.G., Malekhanov A.I.* Soglasovannaya prostranstvennaya obrabotka signalov v podvodnykh zvukovykh kanalakh (obzor) [Matched Field Processing in underwater waveguide (review)], *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskij Zhurnal], 2015, Vol. 61, No. 2, pp. 233-253.
12. *Baggeroer A.B.* Why did applications of MFP fail, or did we not understand how to apply MFP?, *Proceedings of the 1st International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics*. Corfu Island, Greece: Heraklion, 2013, pp. 41-49.
13. *Marasev S.V., Mashoshin A.I.* Zadachi, reshaemye sistemoy gidroakusticheskikh raschetov [Problems solving with the help of hydroacoustic calculation system], *Morskaya radioelektronika* [Marine Radio electronics], 2015, No. 2 (52), pp. 40-45.
14. *Marasev S.V., Mashoshin A.I.* Raschet dal'nosti deystviya gidroakusticheskikh sredstv v usloviyakh nepolnogo znaniya o tekushchikh gidroakusticheskikh usloviyakh [The calculation of sonar range in the lack of knowledge of hydroacoustic conditions], *7-ya rossiyskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya. Materialy konferentsii "Upravlenie v morskikh i aerokosmicheskikh sistemakh" (UMAS-2014), g. Sankt-Peterburg, 7-9 oktyabrya* [7th Russian multimedia conference on the problems of management. Proceedings of the conference "Management in the marine and aerospace systems" (BUTTER-2014), Saint-Petersburg, 7-9 October], 2014, pp. 809-812.
15. *Mashoshin A.I.* Osobennosti sinteza algoritmov klassifikatsii podvodnykh ob"ektov po ikh gidroakusticheskomu polyu [Synthesis of Algorithms for the Classification of Underwater Objects from Their Underwater Sound Field], *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskij Zhurnal], 1996, Vol. 42, No. 3, pp. 396-400.
16. *Broadhead M.K.* Broadband source signature extraction from underwater acoustics data with sparse environment information, *JASA*, 1995, Vol. 97, pp.1322-1325.
17. *Azimi-Sadjadi M.R., Yao D., Jamshidi A.A., Dobeck G.J.* Underwater target classification in changing environments using an adaptivefeature mapping, *IEEE Transactions on neural networks*, 2002, Vol. 13, No. 5, pp. 1099-1111.
18. *Jimenez L.A.T., Mayen H.G., Arteagoitia O.B., Garza D., Torres R.* System for acoustic detection and autonomous classification of targets in the sea (SIDACAM), *Proceedings of 3rd Underwater Acoustics Conference and Exhibition, 21-26 June 2015, Crete island, Greece*, 2015, pp. 137-144.

19. Fischell E.M., Schmidt H. Classification of underwater targets from autonomous underwater vehicle sampled bistatic acoustic scattered fields, *JASA*, 2015, Vol. 138, pp. 3773.
20. Mashoshin A.I. Ob odnom podkhode k sovместnomu resheniyu zadach klassifikatsii i opredeleniya koordinat podvodnykh ob"ektov po ikh gidroakusticheskomu polyu [An Approach to the Problems of Simultaneous Classification and Localization of Underwater Objects from Their Underwater Sound Fields], *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskij Zhurnal], 1999, Vol. 45, No. 1, pp. 124-127.
21. Lucas C., Heard G.J., Pelavas N. DRDC Starfish acoustic sentinel and phase gradient histogram tracking, *Proceedings of 3rd Underwater Acoustics Conference and Exhibition, 21-26 June 2015, Crete island, Greece*, 2015, pp. 669-676.
22. Bao C., Ma S., Zhang Z., Hu X., Wu Y., Meng Z. A robust passive source localization method using a single vector sensor, *Proceedings of 3rd Underwater Acoustics Conference and Exhibition, 21-26 June 2015, Crete island, Greece*, 2015, pp. 857-864.
23. Skarsoulis E., Papadakis P., Kalogerakis M., Piperakis G., Orfanakis E. A passive acoustic localization system for broadband sources, *Proceedings of 3rd Underwater Acoustics Conference and Exhibition, 21-26 June 2015, Crete island, Greece*, 2015, pp. 341-348.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.Г. Голубев.

Машошин Андрей Иванович – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: aimashoshin@mail.ru; 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30; тел.: 89217632345; д.т.н.; профессор; начальник НИЦ интегрированных систем освещения обстановки.

Mashoshin Andrei Ivanovich – Concern CSRI Elektropribor, JSC; e-mail: aimashoshin@mail.ru; 30, Malaya Posadskaya street, St. Petersburg, 197046, Russia; phone: +79217632345; dr. of eng. sc.; professor; chief of scientific center.

УДК 519.8

DOI 10.18522/2311-3103-2016-11-132139

А.А. Семенякина

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ДИФФУЗИИ-КОНВЕКЦИИ НА ОСНОВЕ СХЕМ ПОВЫШЕННОГО ПОРЯДКА ТОЧНОСТИ

Статья посвящена параллельной реализации задач диффузии-конвекции, выполненной на многопроцессорной вычислительной системе Южного федерального университета. Разработанные схемы повышенного (четвертого) порядка точности, учитывающие частичную заполненность контрольных областей, были использованы при решении задач гидрофизики для моделирования распространения загрязняющих веществ, оказывающих негативное влияние на экологическое состояние прибрежных систем. Аппроксимация задачи диффузии-конвекции, к которой сводится нахождение решения задачи транспорта загрязняющих веществ в прибрежных системах, выполнялась на основе схем повышенного порядка точности. Для повышения запаса устойчивости явных схем были использованы регуляризованные схемы. Алгоритм расчета, учитывающий частичную заполненность ячеек, лишен недостатка, связанного со ступенчатым представлением границы области на прямоугольной сетке. В работе приведена построенная модель транспорта нефтепродуктов в прибрежных системах, отличающаяся от известных учетом многих факторов, влияющих на картину распространения загрязнений в акватории водоема: нейтральной и неиспаряющейся псевдофракций нефтяного пятна; испарений легкой фракции; растворения и растекания нефтяного сликка; осаждения; диффузии; адвекции и биоразложения. На базе многопроцессорной вычислительной системы была разработана библиотека прикладных программ, включающая численную реализацию двухслойных итерационных методов вариационного типа, предназначенная для решения тридиагональных сеточных уравнений, возникающих при дискретизации задач диффузии-конвекции. Было разработано экспериментальное программное обеспечение, предназначенное для математического моделирования всевозможных сценариев развития экологической обстановки прибрежных систем на примере Азово-Черноморского бассейна при нефтяных разливах. Проведено моделирование распространения нефти и нефтепродук-