

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СОПРОВОЖДЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО УГЛОМЕРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Н.Г. Воронина

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»¹

Рассматриваются вопросы, связанные с построением алгоритма сопровождения траекторий морских объектов с использованием только угломерной гидроакустической информации в режиме пеленгования объектов наблюдения. За основу взят метод совместного вероятностного отождествления данных, фильтрации параметров траектории и порогового критерия принятия решения о наличии наблюдаемого объекта. Для решения задачи фильтрации параметров траектории использованы два фильтра: рекуррентный фильтр Калмана и нерекуррентный фильтр с конечной выборкой на основе метода функции максимума правдоподобия. Представлены результаты имитационного моделирования синтезированного алгоритма с использованием данных широкополосного шумопеленгования на линейную антенну. Проведено сравнение результатов для двух методов фильтрации.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в гидроакустических системах слежения широко используются линейные антенны. В частности, они используются в донных рубежных системах, а также на судах в составе станций с линейными антеннами [1]. Возможно использование таких антенн при выполнении актуальных в настоящее время поисково-обследовательских работ в море [2, 3]. Например, это может быть целесообразно при решении широкого круга задач, решаемых подводными роботами с применением гидроакустических средств [4–6]. При выполнении специальных миссий подводные роботы снабжаются гидроакустическими станциями для обнаружения и слежения за морскими объектами. Использование антенн различной конфигурации для таких систем расширяет возможности применения подводных аппаратов-роботов. Линейные антенны имеют ряд преимуществ работы перед станциями с многомерными антенными решетками. Во-первых, они являются ненаправленными в вертикальной плоскости и могут принимать сигналы не только от подводных и надводных, но и от воздушных и подземных источников излучения. Во-вторых, такие антенны часто имеют большую протяженность, что позволяет им эффективно работать в низком звуковом и инфразвуковом диапазонах частот,

где коэффициент затухания звука меньше, благодаря чему обеспечивается большая дальность действия для сильно шумящих объектов по сравнению с другими гидроакустическими станциями.

В отличие от радиолокационных систем, которые применяются обычно либо в активном режиме, либо в режиме обнаружения импульсных сигналов сторонних радиолокаторов, в гидроакустике часто используется режим широкополосного шумопеленгования шумящих объектов. В радиолокации аналогом таких систем являются тепловизионные станции, которые практически всегда оснащены развитыми в двух измерениях антеннами.

Конструкция линейной антенны определяет особенности проведения обработки полученных с помощью ее данных. Режим широкополосного пеленгования, в котором обнаружение осуществляется по сплошной части спектра объекта наблюдения, при локации на линейную антенну уникален по степени сложности траекторной обработки данных в гидроакустике, так как построение траектории в нем возможно только по одной пространственной координате – пеленгу или курсовому углу (КУ). Это снижает разрешимость наблюдаемых объектов и точность определения их координат.

¹ 192286, г. Санкт-Петербург, ул. Будапештская, д. 60. Тел.: +7 (921) 9180840. E-mail: voroninang@gmail.com

Цель работы состоит в синтезе последовательного алгоритма, обеспечивающего по результатам измерения только КУ устойчивое сопровождение траекторий морских объектов, в условиях большого количества мешающих источников. При формировании алгоритма используются известные в литературе методы траекторного анализа [7–14].

Статья имеет следующую структуру. В первом разделе содержится постановка задачи и описываются входные и выходные данные алгоритма сопровождения объектов наблюдения. Во втором разделе представлено математическое описание алгоритма сопровождения траектории, где рассмотрены основные этапы траекторного анализа и выбраны методы решения каждого этапа задачи в соответствии с ее спецификой. В третьем разделе приводится математическое моделирование синтезированного алгоритма на примере обработки данных, получаемых при работе гидроакустической станции с линейной антенной. В заключительном разделе сделаны основные выводы работы.

1. Постановка задачи сопровождения объекта в режиме шумопеленгования на линейную антенну

Решение задачи траекторного анализа пространственных координат объектов наблюдения принято разделять на две стадии [7]:

- завязку и обнаружение траекторий;
- сопровождение траекторий.

На стадии завязки и обнаружения траектории принимается предположение о возможном наличии нового объекта наблюдения и формируется гипотеза закона, описывающего его движение. Соответствующие алгоритмы в литературе достаточно подробно описаны в различных источниках [7, 9–13] и в работе рассматриваться не будут.

Задача сопровождения заключается в определении параметров траектории наблюдаемых на текущий момент времени объектов для предсказания значений этих параметров на произвольный интервал времени и принятии решения о возможности продолжения сопровождения траектории или его прекращения (сброса траектории). В настоящей работе траектория считается известной, если на любой момент времени известен КУ объекта наблюдения.

Рассмотрим постановку задачи сопровождения J траекторий при наличии M объектов наблюдения в зоне видимости линейной антенны. Число траекторий J может быть как меньше числа объектов M (в случае не обнаружения сигналов от них), так и больше (в случае сопровождения ложных объектов).

Время работы гидроакустической станции T может быть продолжительным, за этот период число объектов M может меняться. Некоторые из них могут выходить за пределы зоны видимости антенн, к тому же возможно вхождение в эту зону новых объектов, ранее не наблюдаемых. Момент начала работы гидроакустической станции соответствует начальному моменту времени наблюдения.

Входные данные поступают циклично. Под циклом приема понимается период времени накопления информации в задаче расчета пространственно-частотного спектра сигнала. Диапазон времени T наблюдения за окружающей обстановкой содержит K циклов приема данных.

Входными данными для алгоритма сопровождения траекторий являются:

- I_k отметок сигналов, где $k = 1 \dots K$ – индекс цикла приема данных. Под отметкой понимается набор оценок параметров наблюдения объекта, полученный в результате предварительной обработки гидроакустических сигналов на датчиках антенны [7]. В нашем случае в качестве параметров отметки будут рассматриваться КУ на объект наблюдения и расчетная среднеквадратическая ошибка (СКО) измерения КУ. Отметки могут быть как истинными, если описываемые ими объекты являются реальными, так и ложными, если их обнаружение связано со случайным превышением шумами моря порога обнаружения;

- J_k формуляров траекторий. Формуляр представляет собой набор параметров траектории, оцененных на этапах завязки, обнаружения и сопровождения. Число формуляров J_k определяет количество объектов, сопровождаемых в текущий момент k , и может меняться от цикла к циклу. Если на этапе обнаружения траекторий были зафиксированы новые траектории, то число формуляров увеличивается, а если на предшествующем $k-1$ этапе сопровождения принимается решение о сбросе траекторий с сопровождения, то число формуляров уменьшается. При использовании линейной антенны формуляр содержит следующие параметры, необходимые для решения поставленной задачи: оценку КУ, величину его изменения и соответствующие им СКО.

Для рассматриваемой задачи уравнение траектории может быть записано в виде [12, 14, 15]:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ V_\alpha \end{bmatrix}_k^j = \begin{bmatrix} 1 & dT \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \alpha \\ V_\alpha \end{bmatrix}_{k-1}^j + \begin{bmatrix} \varepsilon_\alpha \\ \varepsilon_{V_\alpha} \end{bmatrix}_k^j, \quad (1)$$

где α^j – текущее значение КУ j -й сопровождаемой траектории; V_α^j – скорость изменения КУ j -й сопровождаемой траектории; k – индекс момента времени,

который в данном случае совпадает с номером цикла ($k = 1 \dots K$); dT – интервал дискретизации, который совпадает с периодом накопления информации в задаче расчета пространственно-частотного спектра сигнала; ε_{ak} и $\varepsilon_{V_{ak}}$ – центрированные порождающие белозумные последовательности с заданными СКО оценок КУ $\sigma_{\alpha_{0,k}}$ и скорости изменения КУ $\sigma_{V_{\alpha_{0,k}}}$ соответственно. С помощью этих последовательностей учитывается отличие предлагаемой траектории от прямолинейной.

При сопровождении объектов на каждом цикле поступает набор измерений КУ для отметок в виде их величин и соответствующих СКО. Каждая отметка может быть получена в результате обработки сигнала, полученного от реального объекта, либо оказаться ложной. В задаче сопровождения любая отметка рассматривается как потенциально принадлежащая любой j -й траектории из всех имеющихся. С учетом сказанного для измерения, соответствующего каждой i -й отметке в момент времени k , можно записать набор выражений в виде:

$$\tilde{\alpha}_k^i = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \alpha \\ V_{\alpha} \end{bmatrix}_k^j + v_k^i, \quad i = 1 \dots I_k, j = 1 \dots J_k \quad (2)$$

где $\tilde{\alpha}_k^i$ – измеренное значение КУ, соответствующего i -й отметке; v_k^i – белый шум наблюдения с заданными значениями СКО ошибок измерения КУ – $\tilde{\sigma}_{\alpha_k^i}$.

Из сказанного следует, что на каждом цикле обработки для сопровождаемых траекторий формируются следующий набор входных данных:

- оценки КУ $\hat{\alpha}_{k-1}^j = \{\hat{\alpha}_{k-1}^1, \dots, \hat{\alpha}_{k-1}^j\}$ и соответствующие им расчетные СКО $\hat{\sigma}_{\alpha_{k-1}^j} = \{\hat{\sigma}_{\alpha_{k-1}^1}, \dots, \hat{\sigma}_{\alpha_{k-1}^j}\}$, полученные на предыдущих циклах обработки;

- оценки скорости изменения КУ $\hat{V}_{\alpha_{k-1}^j} = \{\hat{V}_{\alpha_{k-1}^1}, \dots, \hat{V}_{\alpha_{k-1}^j}\}$ и соответствующие им расчетные СКО $\hat{\sigma}_{V_{\alpha_{k-1}^j}} = \{\hat{\sigma}_{V_{\alpha_{k-1}^1}}, \dots, \hat{\sigma}_{V_{\alpha_{k-1}^j}}\}$, полученные на предыдущих циклах обработки;

- измеренные значения КУ отметок $\tilde{\alpha}_k = \{\tilde{\alpha}_k^1, \dots, \tilde{\alpha}_k^{I_k}\}$ и соответствующие им заданные СКО $\tilde{\sigma}_{\alpha_k} = \{\tilde{\sigma}_{\alpha_k^1}, \dots, \tilde{\sigma}_{\alpha_k^{I_k}}\}$, полученные на текущем

цикле обработки.

Требуется на основании перечисленных входных данных решить задачу сопровождения траекторий, а именно для каждой j -й траектории, $j = 1 \dots J_k$, в момент k -го цикла приема данных:

- оценить ее параметры в виде оценки КУ – $\hat{\alpha}_k^j$, скорости изменения КУ – $\hat{V}_{\alpha_k^j}$ и их СКО – $\hat{\sigma}_{\alpha_k^j}, \hat{\sigma}_{V_{\alpha_k^j}}$;
- рассчитать веса L_k^j , являющиеся мерой веро-

ятности того, что полученные на k -циклах сопровождения траектории оценки ее параметров отражают движение реального объекта;

- сравнить текущее полученное значение величины L_k^j с порогом сброса с сопровождения $P_{\text{сброс}}$ и принять решение о возможности продолжения сопровождения траектории.

Рассмотрим более подробно возможные методы решения задачи сопровождения объекта, представленные в литературе [7–13, 16], применительно к обработке данных, полученных с помощью линейной приемной антенны, т.е. на основе только информации о КУ.

2. Математическое описание алгоритма сопровождения объекта

Для решения задачи сопровождения объекта на фоне помех разработано много методов [7–14], для которых характерно разбиение на четыре этапа:

- определение положения и величины строба идентификации;
- идентификация отметок с траекториями;
- оценка параметров траектории (КУ и его СКО);
- принятие решения о статусе траектории (сопровождаясь либо более не сопровождаемая).

Определение размера строба идентификации

Под стробом идентификации понимается диапазон значений КУ, которому с заданной вероятностью P_G должно принадлежать значение КУ объекта, описываемого j -й траекторией – α_k^j [7, 9, 11]. Для определения положения строба идентификации вычисляется экстраполированное значение КУ каждой j -й траектории на текущем k -м цикле по данным на момент $k-1$ -го цикла. Экстраполированное значение КУ является центральной точкой j -ого строба. Для расчета размера строба идентификации i -й отметки ($i = 1 \dots I_k$) с j -й траекторией предложено использовать алгоритм, представленный в работах [7, 11]. В работе [7] представлен расчет размера строба идентификации для обработки сигнала, полученного радиолокационной станцией. Так как при построении этого алгоритма вводится единственное предположение о нормальном распределении СКО экстраполированной величины КУ и СКО единичного измерения КУ объекта, а далее используются формализованные методы математической статистики, то справедливо применение предложенного правила и для случая обработки гидроакустической информации. Согласно

этому алгоритму при сопровождении объекта на основе только угломерной информации, если положить значение вероятности попадания истинной отметки в строб $P_G = 0,9$, значение порога будет $\gamma = 2,5$. Тогда критерий попадания отметки в строб имеет следующий вид:

$$\frac{(\tilde{\alpha}_k^i - \hat{\alpha}_{k|k-1}^j)^2}{\tilde{\sigma}_{\alpha_k^i}^2 + \hat{\sigma}_{\hat{\alpha}_{k|k-1}^j}^2} \leq 2,5, \quad (3)$$

где $\hat{\alpha}_{k|k-1}^j$ – экстраполированная на момент k -го цикла оценка КУ при условии принадлежности ее j -й траектории, $\hat{\sigma}_{\hat{\alpha}_{k|k-1}^j}$ – оценка СКО экстраполированной величины КУ.

Идентификация отметок с траекториями

На этом этапе работы алгоритма принимается решение о соответствии каждой i -й из полученных отметок каждой j -й, из сопровождаемых траекторий на k -м цикле наблюдения.

Существует множество методов идентификации отметок с траекториями, каждый из которых имеет достоинства и недостатки. На практике для идентификации отметок с траекториями чаще всего применяется метод ближайшего соседа. Этот метод самый простой в реализации из всех существующих на сегодняшний день и заключается в выборе ближайшей к траектории из стробированных отметок. В качестве критерия близости может выступать отклонение координатной информации (КУ) отметки от экстраполированного значения КУ траектории. Однако, как показано в литературных источниках [7], при использовании такого метода, если в строб идентификации наряду с истинными попадают ложные отметки, вероятность правильного отождествления не превышает 0,85.

Наиболее точным методом, из известных в настоящее время, принято считать оптимальное байесовское многогипотезное отождествление [7, 11, 12], которое основано на идее о том, что на каждом цикле оценка $\hat{\alpha}_k^j$ для каждой траектории рассчитывается для случая идентификации с каждой из отметок, принадлежащих заданному стробу. При этом каждая траектория получает свою вероятность существования. Траектории, чьи вероятности существования оказываются ниже некоторого заданного порогового значения, сбрасываются с сопровождения. Методы расчета вероятности существования или веса траектории получены в работах [11, 12]. Таким образом, количество траекторий на каждом цикле увеличивается на число новых отметок, что не позволяет применять

его в условиях большого числа помех. Поэтому на этапе идентификации отметок с траекториями предлагается использовать частный случай многогипотезного отождествления, разработанный в работе [11], – метод совместного вероятностного отождествления данных, известный в литературе как Joint Probabilistic Data Association (JPDA). В этом случае также на каждом цикле формируются гипотезы отождествления траектории со всеми стробированными отметками и оцениваются их вероятности. Затем из всех отметок формируется одна новая, которая является взвешенной суммой всех стробированных отметок. Таким образом, оценка КУ каждой траектории рассчитывается с учетом параметров всех отметок, попавших в строб траектории и взвешенных согласно вероятностям вариантов отождествления [11]:

$$\hat{\alpha}_k^j = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^{I'^j} \hat{\alpha}_k^{i,j} \beta^{i,j} \omega^{i,j}, \quad (4)$$

где I'^j – число отметок, попавших в строб j -ой траекторий на момент k -го цикла приема данных ($I'^j \leq I_k$); $\hat{\alpha}_k^j$ – оценка КУ j -й траектории; $\beta^{i,j}$ – безусловная вероятность отождествления отметки i с траекторией j (метод расчета представлен в [7]); $\hat{\alpha}_k^{i,j}$ – частная оценка КУ, обусловленная принадлежностью отметки i траектории j ; $\omega^{i,j} = 1$ в случае, если измеренное значение КУ отметки с индексом i попадает в строб отождествления траектории j и $\omega^{i,j} = 0$ в противном случае; $c = \sum_{i=1}^{I'} \beta^{i,j} \omega^{i,j}$ – нормализующая константа.

При этом СКО оценки КУ для каждой j -й траектории на k -м цикле наблюдения рассчитывается по формуле [7]:

$$\hat{\sigma}_{\alpha_k^j}^2 = \sqrt{\beta_0^j \hat{\sigma}_{\alpha_{k-1}^j}^2 + \sum_{i \in I'} \hat{\sigma}_{\alpha_k^{i,j}}^2 \beta^{i,j} \omega^{i,j} + \hat{\sigma}_{\alpha_k^j}^{\prime 2}}, \quad (5)$$

где β_0^j – безусловная вероятность того, что с j -й траекторией не отождествлена ни одна отметка; $\hat{\sigma}_{\alpha_k^{i,j}}$ – оценка СКО оценки КУ, обусловленная принадлежностью отметки i траектории j ; $\hat{\sigma}_{\alpha_k^j}^{\prime 2}$ – слагаемое, учитывающее увеличение ошибки с ростом неопределенности при появлении в стробе более чем одной отметки:

$$\hat{\sigma}_{\alpha_k^j}^{\prime 2} = \sum_{i \in I'} \omega^{i,j} \frac{\left(\hat{\sigma}_{\alpha_{k-1}^i}^2 + \hat{\sigma}_{V_{\alpha_{k-1}^i}}^2 dT^2 + \hat{\sigma}_{\alpha_0, k-1}^2 \right)^2}{\left(\tilde{\sigma}_{\alpha_k^i}^2 + \hat{\sigma}_{\hat{\alpha}_{k|k-1}^i}^2 \right)^2} ;$$

$$\cdot \left(\beta^{i,j} \left(\tilde{\alpha}_k^i - \hat{\alpha}_{k|k-1}^j \right)^2 - \left(\sum_{i \in I'} \left(\tilde{\alpha}_k^i - \hat{\alpha}_{k|k-1}^j \right) \beta^{i,j} \omega^{i,j} \right)^2 \right)$$

$\tilde{\sigma}_{\alpha_k^i}$ – СКО измерения КУ i -й отметки; $\hat{\sigma}_{V_{\alpha_k^{i,j}}}$ – оценка

СКО измерения величины изменения КУ, обусловленная принадлежностью i -й отметки j -й траектории.

Для определения значений $\hat{\alpha}_k^{i,j}$ и $\hat{\sigma}_{\alpha_k}^{i,j}$ необходимо использование фильтра для каждого сочетания значений i и j .

Фильтрация параметров траектории

На этом этапе производится расчет оценок положений объектов $\hat{\alpha}_k^{i,j}$, полученных при условии отнесения отметки i к траектории j . В работе рассматриваются два широко применяемых варианта фильтров: фильтр Калмана и нерекуррентный фильтр с конечной памятью.

Для сглаживания и экстраполяции траекторий в большинстве первоисточников предлагается использовать фильтр Калмана [8–15]. Классический рекуррентный фильтр Калмана предполагает задание моделей оцениваемого и наблюдаемого процессов, которые для случая обработки угломерных данных будут иметь вид (1) и (2). Обновление оценок положений объектов $\hat{\alpha}_k^{i,j}$ и их СКО можно записать:

$$\hat{\alpha}_k^{i,j} = \hat{\alpha}_{k-1}^j + \hat{V}_{\alpha_{k-1}}^j dT + \left(\hat{\sigma}_{\alpha_{k-1}}^2 + \hat{\sigma}_{V_{\alpha_{k-1}}}^2 dT^2 + \sigma_{\alpha_{0,k-1}}^2 \right) \frac{\tilde{\alpha}_k^i - \hat{\alpha}_{k-1}^j}{\hat{\sigma}_{\alpha_k}^i + \hat{\sigma}_{\alpha_{k-1}}^j}, \quad (6)$$

$$\hat{V}_{\alpha_k}^{i,j} = \hat{V}_{\alpha_{k-1}}^j + \hat{\sigma}_{V_{\alpha_{k-1}}}^2 dT \frac{\tilde{\alpha}_k^i - \hat{\alpha}_{k-1}^j}{\hat{\sigma}_{\alpha_k}^i + \hat{\sigma}_{\alpha_{k-1}}^j}, \quad (7)$$

$$\hat{\sigma}_{\alpha_k}^{i,j} = \left(\hat{\sigma}_{\alpha_{k-1}}^2 + \hat{\sigma}_{V_{\alpha_{k-1}}}^2 dT^2 + \sigma_{\alpha_{0,k-1}}^2 \right) - \frac{\left(\hat{\sigma}_{\alpha_{k-1}}^2 + \hat{\sigma}_{V_{\alpha_{k-1}}}^2 dT^2 \right)^2}{\hat{\sigma}_{\alpha_k}^i + \hat{\sigma}_{\alpha_{k-1}}^j}, \quad (8)$$

$$\hat{\sigma}_{V_{\alpha_k}^{i,j}}^2 = \left(\hat{\sigma}_{V_{\alpha_{k-1}}}^2 + \sigma_{V_{\alpha_{0,k-1}}}^2 \right) - \frac{\left(\hat{\sigma}_{V_{\alpha_{k-1}}}^2 dT \right)^2}{\hat{\sigma}_{\alpha_k}^i + \hat{\sigma}_{\alpha_{k-1}}^j}, \quad (9)$$

где $\hat{V}_{\alpha_k}^j$ – оценка скорости изменения КУ j -й траектории на k -м цикле; $\hat{V}_{\alpha_k}^{i,j}$ – оценка скорости изменения КУ, рассчитанная в предположении принадлежности i -й отметки j -й траектории.

Как показывают результаты ранее проведенных исследований, фильтр Калмана хорошо работает в системах радиолокации [8–13, 16] и геопозиционирования [17], когда вектор состояния содержит помимо угловой координаты дистанцию до объекта. Вместе с

тем в работе [18] отмечается, что для случая использования неточной или неполной нелинейной модели движения объекта при высоком быстродействии вычислительных систем предпочтительнее применение нерекуррентных алгоритмов фильтрации с конечной памятью, когда производится одновременная обработка данных, полученных на последних K' циклах. Поэтому в качестве еще одного метода фильтрации в настоящей работе был рассмотрен нерекуррентный вариант фильтрации на основе метода максимума функции правдоподобия, традиционно применяемый в траекторном анализе [8, 9]. При использовании этого фильтра считается, что:

- модель изменения КУ является детерминированной;
- построение траектории производится для временной выборки, содержащей K' последних измерений.

В этой постановке задачи предполагается, что КУ α^j и скорость изменения КУ V_{α^j} , входящие в выражение (1), являются неизвестными детерминированными величинами. Для нахождения их оценок используется небайесовский метод максимального правдоподобия [19].

Из выражения (1) видно, что при отсутствии порождающих шумов уравнение j -й траектории для КУ аппроксимируется полиномом первой степени. Если при этом полагается, что измерения производятся в равноотстоящие моменты времени, то частная оценка $\hat{\alpha}_k^{i,j}$ и скорость ее изменения на момент k -го цикла рассчитываются по формулам:

$$\hat{\alpha}_k^{i,j} = \frac{h^{i,j} \left(\frac{\tilde{\alpha}_k^i}{\hat{\sigma}_{\alpha_k}^i} + \sum_{n=k-K'}^{k-1} m_n^j \hat{\alpha}_n^j \right) - g^{i,j} \left(\frac{\tilde{\alpha}_k^i (K' - k)}{\hat{\sigma}_{\alpha_k}^i} + \sum_{n=k-K'}^{k-1} m_n^j (K' - n) \hat{\alpha}_n^j \right)}{f^{i,j} \cdot h^{i,j} - g^{i,j,2}}, \quad (10)$$

$$f^{i,j} = \frac{1}{\hat{\sigma}_{\alpha_k}^i} + \sum_{n=k-K'}^{k-1} m_n^j,$$

$$h^{i,j} = \frac{(K' - k)^2}{\hat{\sigma}_{\alpha_k}^i} + \sum_{n=k-K'}^{k-1} m_n^j (K' - n)^2,$$

$$g^{i,j} = \frac{K' - k}{\hat{\sigma}_{\alpha_k}^i} + \sum_{n=k-K'}^{k-1} m_n^j (K' - n), \quad (11)$$

$$m_n^j = \frac{1}{\hat{\sigma}_{\alpha_n}^j},$$

$$\hat{V}_{ak}^{i,j} = \frac{g^{i,j} \left(\frac{\tilde{\alpha}_k^i}{\tilde{\sigma}_{\alpha_k^i}} + \sum_{n=k-K'}^{k-1} m_n^i \hat{\alpha}_n^j \right) - f^{i,j} \left(\frac{\tilde{\alpha}_k^i (K' - k)}{\tilde{\sigma}_{\alpha_k^i}} + \sum_{n=k-K'}^{k-1} m_n^j (K' - n) \hat{\alpha}_n^j \right)}{dT [f^{i,j} \cdot h^{i,j} - g^{i,j,2}]} \quad (12)$$

где K' – максимальное число циклов, по которым используются измеренные значения; n – индекс цикла поступления данных.

Оценку СКО измерения КУ i -й отметки и скорости изменения КУ можно рассчитать по формулам:

$$\hat{\sigma}_{\alpha_k^{i,j}} = \sqrt{\frac{h^{i,j}}{f^{i,j} \cdot h^{i,j} - g^{i,j,2}}}, \quad (13)$$

$$\hat{\sigma}_{V_{ak}^{i,j}} = \sqrt{\frac{g^{i,j}}{dT [f^{i,j} \cdot h^{i,j} - g^{i,j,2}]}}, \quad (14)$$

Критерии принятия решения о сбросе с сопровождения

На завершающей стадии алгоритма сопровождения осуществляется принятие одного из возможных решений в отношении траектории, а именно: о продолжении сопровождения или о прекращении сопровождения и потере контакта.

В работах [9, 20] предложен пороговый критерий принятия решения об истинности или ложности сопровождаемой траектории (соответствия ее существующему объекту). Для проверки необходимости сброса траектории с сопровождения предлагается проводить сравнение с пороговыми значениями величины, рассчитываемой как отношение ошибки текущего измерения к ошибке экстраполяции оцениваемой координаты по предыдущим измерениям [9, 20]. Проверку возможности сброса траектории с сопровождения следует выполнять на основании свойств величины:

$$\Lambda_k^j = \frac{\hat{\sigma}_{\alpha_k^j}}{\hat{\sigma}_{\alpha_{k|k-1}^j}}, \quad (15)$$

где $\hat{\sigma}_{\alpha_k^j}$ – оценка СКО оценки КУ для j -й траектории, которая рассчитывается по формуле (5).

Для принятия решения о статусе траектории необходимо сравнение этой величины с порогом. Параметр Λ_k^j сравнивается со значением параметра $P_{сброс}$ при превышении которого сопровождение продолжается, а в противном случае принимается решение о сбросе сопровождения. Метод расчета параметра $P_{сброс}$ описан в работе [9].

3. Результаты моделирования

Для определения качества работы алгоритма проведено имитационное моделирование на примере задачи сопровождения траектории в режиме шумопеленгования на линейную антенну. Для этого разработан комплекс программ, который состоял из имитатора входных данных первичной обработки информации пассивных гидроакустических систем [21], программы, решающей задачу первичной обработки, формирующей поток обнаруженных отметок с необходимыми параметрами, программы траекторной обработки, реализующей рассматриваемые в статье алгоритмы, и программы отображения полученных результатов.

При формировании входных данных для имитатора был разработан тактический эпизод, определяющий координаты и взаимное перемещение наблюдателя и объектов. В эпизоде были заданы два объекта, траектории которых в координатах КУ–время пересекались. Параметры движения объектов формировались таким образом, чтобы обеспечить проверку качества работы алгоритма траекторного анализа по следующим критериям:

- разрешение объектов, наблюдаемых под КУ с близкими значениями (разница КУ менее ширины лепестка характеристики направленности);
- устойчивость сопровождения объектов при пересечении их траекторий и при угловом расстоянии между ними порядка трех и более величин ширины лепестка характеристики направленности.

Длительность эпизода составляла 1850 с. Модели траекторий всех объектов представляли собой уравнения прямых линий в декартовой системе координат.

Для исключения влияния нелинейных эффектов, вызванных сферическим фронтом акустических волн, движение объектов наблюдения рассматривались в дальней зоне работы антенны (зоне Фраунгофера). Для объектов, движущихся по прямой на больших дистанциях, уравнение траектории можно считать соответствующим выражению (1). Учет неравномерности изменения КУ производился за счет величин ε_α и ε_{V_α} в уравнении (1). Начальные параметры движения объектов представлены в табл. 1.

Начальное взаимное расположение объектов представлено на рис. 1.

Процесс моделирования включает в себя четыре блока.

Блок 1 – имитатор входных данных первичной обработки информации. В этом блоке на основе описанных параметров движения (α , V_α) объектов с

Таблица 1. Параметры моделируемых объектов в тактическом эпизоде

Номер объекта	Нач. КУ, град	Курс об., град	Скор., уз	Нач. дист., км
Наблюдатель		0	5	
1	117	0	10	5,0
2	109	0	10	6,0

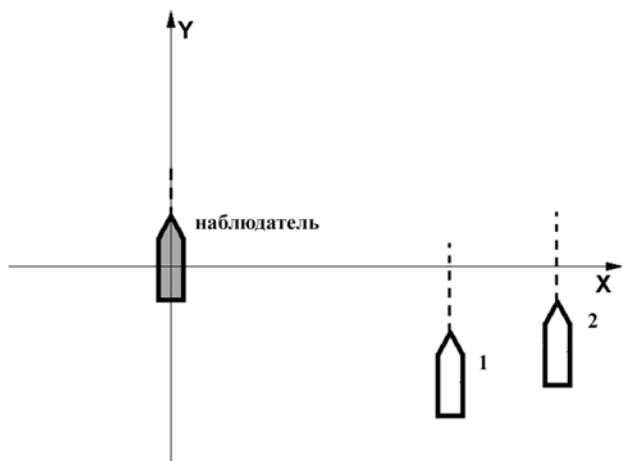


Рис. 1. Начальное расположение наблюдателя и двух объектов (№ 1 и № 2)

помощью методов, изложенных в работе [21], вырабатываются временные последовательности сигналов, соответствующие направлениям веера энергетических пространственных каналов, которые поступают на вход программы первичной обработки информации.

Блок 2 – программа первичной обработки информации. В этом блоке по алгоритмам, представленным в работе [22], формируются входные данные для задачи траекторного анализа в виде массивов, содержащих измеренные значения КУ ($\tilde{\alpha}_k = \{\tilde{\alpha}_k^1, \dots, \tilde{\alpha}_k^{l_k}\}$), СКО измерения КУ ($\tilde{\sigma}_{\alpha_k} = \{\tilde{\sigma}_{\alpha_k^1}, \dots, \tilde{\sigma}_{\alpha_k^{l_k}}\}$) и время обнаружения сигналов τ_k , т.е. обнаруженных отметок.

Блок 3 – программа траекторной обработки. В этом блоке последовательно реализуются этапы траекторной обработки: завязка, обнаружение и сопровождение траектории. В результате работы алгоритма сопровождения вырабатываются данные для построения траектории объектов наблюдения, т.е. сглаженные значения КУ ($\hat{\alpha}_k^j$) объекта наблюдения в зависимости от времени.

Блок 4 – программа отображения информации. С помощью этой программы производится построение траектории объектов в координатах КУ – время

($\hat{\alpha}_k^j$ от t_k) и значения СКО оценки КУ для каждого цикла поступления данных от задачи первичной обработки информации ($\tilde{\sigma}_{\alpha_k}$ от t_k).

Моделирование проводилось для синтезированного последовательного алгоритма с двумя вариантами входящего в него фильтра. В первом случае оценка положения объектов осуществлялась с помощью фильтра Калмана по формулам (6)–(9), во втором – с помощью нерекуррентного фильтра с конечной памятью (10)–(14).

Одним из основных критериев качества алгоритмов траекторного анализа при наблюдении за группой объектов является устойчивое сопровождение объектов при минимальных углах сближения. Вследствие ограниченной разрешающей способности по КУ и его единственности как пространственной координаты, при сближении траекторий объектов в некоторый момент времени в задаче первичной обработки информации происходит слияние двух отметок от разных объектов в одну отметку с искаженными параметрами [23]. На рис. 2 эта ситуация показана с использованием данных, получаемых на входе алгоритма траекторного анализа при рассматриваемом тактическом эпизоде. На рис. 2, а представлен весь диапазон времени тактического эпизода. На рис. 2, б для наглядности представлен увеличенный элемент траектории, выделенный на рис. 2, а рамкой. Сплошными линиями обозначены истинные траектории (1 и 2), а точками – отметки, которые вырабатывались программой обнаружения отметок на основе имитационных данных. Видно, что во временном диапазоне, соответствующем пересечению траекторий объектов, отметки от двух объектов складываются, образуя одну отметку. При этом ошибка оценки координат объекта достигает величины градуса. При обработке данных это приводит к срыву сопровождения одной из траекторий.

Результаты математического моделирования показали устойчивое сопровождение объектов при использовании обоих алгоритмов при угловом расстоянии между траекториями более двух градусов. На интервалах пересечения траекторий наблюдается срыв сопровождения объекта с меньшим отношением сигнал/помеха для обоих алгоритмов. Объект с большим значением отношения сигнал/помеха сопровождается устойчиво. Ложные траектории не наблюдались.

Для оценки качества разрешения траекторий проводился расчет СКО оценок координат КУ при применении алгоритмов траекторного анализа с использованием фильтра Калмана и нерекуррентного

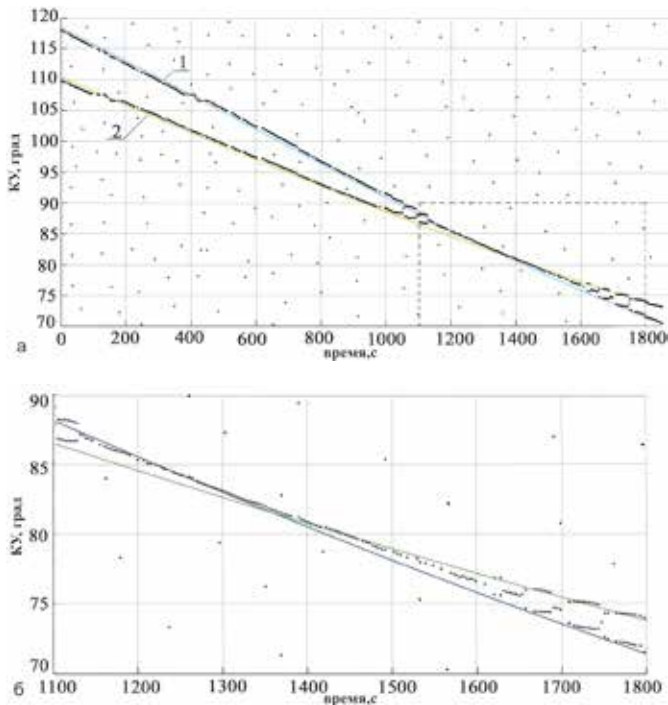


Рис. 2. Истинные траектории и обнаруженные отметки: а – диапазон времени тактического эпизода точки – отметки; б – увеличенный элемент траектории, выделенный а; голубая линия – истинная траектория объекта № 1 (см. рис. 1); зеленая линия – истинная траектория объекта № 2 (см. рис. 1)

фильтра с конечной памятью по формуле (5) с использованием выражений (8) и (13). Временные зависимости СКО оценок координат КУ, усредненные по 20 реализациям тактического эпизода для траектории (№ 1 на рис. 2), представлены на рис. 3.

Как показывают результаты расчетов, СКО определения координат объекта при применении алгоритма с использованием фильтра Калмана в два раза меньше, чем при использовании нерекуррентной фильтрации. Таким образом, при одинаковых условиях предложенный алгоритм с использованием фильтра Калмана позволяет лучше разрешать траектории объектов при малом угловом расстоянии между ними.

Для оценки качества работы алгоритма было выбрано относительное время сопровождения истинного объекта, которое характеризует устойчивость сопровождения. Относительное время сопровождения объектов в период уверенного их разрешения между собой рассчитывалось по формуле, аналогичной выражению, предложенному для определения качества обнаружения траекторий в работе [24]:

$$\tau^m = \frac{1}{T \cdot N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{L_n^m} \sum_{l=1}^{L_n^m} dt_{\text{comp},l,n}^m \quad (16)$$

где τ^m – относительное время сопровождения объекта m ($m = 1 \dots M$); N – число реализаций тактического

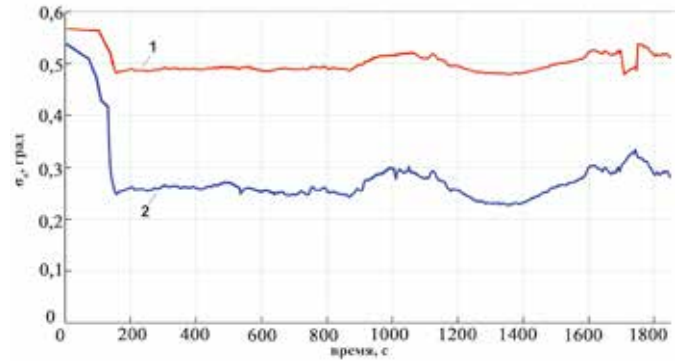


Рис. 3. СКО оценок координат КУ: 1 – с использованием рекуррентного фильтра Калмана; 2 – с использованием нерекуррентного фильтра с конечной памятью

эпизода ($N = 20$); L_n^m – число периодов сопровождения объекта m на n -й реализации тактического эпизода, (здесь под периодом сопровождения понимается интервал времени от обнаружения траектории до срыва сопровождения); $dt_{\text{comp},l,n}^m$ – величина l -го периода времени сопровождения объекта m , ограниченного моментом обнаружения траектории и моментом принятия решения о сбросе траектории на n -й реализации тактического эпизода; T – общее время присутствия объекта в тактическом эпизоде.

Как показали результаты расчетов для рассматриваемого тактического эпизода, относительное время сопровождения траектории при использовании алгоритма с фильтром Калмана для первого объекта соизмеримо с относительным временем для алгоритма с нерекуррентным фильтром (табл. 2). Для второго объекта фильтр Калмана имеет лучшие характеристики и позволяет вдвое увеличить время сопровождения траектории. Однако для подтверждения полученных результатов по устойчивости сопровождения алгоритма было проведено дополнительное исследование при различных возможных вариантах входных данных.

В ходе исследования было проанализировано влияние СКО оценки КУ отметки на качество сопровождения объекта. Как показывает практика, значения СКО оценок КУ отметок, вырабатываемые программой первичной обработки информации по эмпирическим алгоритмам [22], завышены по сравнению с теоретическим расчетом, представленным в литературе [23]. При реализации фильтра Калмана производится корректировка значения СКО оценки КУ траектории на каждом цикле наблюдения посредством использования коэффициентов усиления фильтра, а данная величина, приходящая из задачи первичной обработки информации, используется только как начальное значение для каждой

новой траектории. При реализации нерекуррентного фильтра с конечной памятью значение СКО оценки КУ траектории определяется только параметрами, поступающими от программы первичной обработки информации, и зависит от них на каждом цикле реализации программы. Согласно выражению (3) значение СКО оценки КУ отметки определяет величину строга захвата, а значит, неоднозначно определяет устойчивость сопровождения траектории. Увеличение этого значения, с одной стороны, повышает возможность идентификации траектории с истинной отметкой, а с другой – повышает возможность срыва траектории, если приводит к ложной идентификации. В связи с этим представляет интерес исследовать зависимость этих параметров от значения СКО оценки КУ отметки.

Для определения зависимости устойчивости сопровождения объекта от величины СКО оценки КУ для двух вариантов фильтров при проведении расчетов искусственно устанавливались значения СКО измерения КУ отметки, определяемого задачей первичной обработки информации, в диапазоне от $0,5$ до $0,01^\circ$ (среднее СКО отметки при этом составляет $0,05^\circ$). Рассматривался период наблюдения за объектами при угловом расстоянии не менее двух градусов, что соответствует первым 1000 с тактического эпизода. На рис. 4 представлены результаты расчета координатных параметров траекторий. На рис. 4, а показаны зависимости КУ отметок и траекторий от времени за первые 1000 с тактического эпизода при СКО измерения КУ, полученной в задаче первичной обработки информации. Для наглядности на рис. 4, б и 4, в представлены элементы траекторий в меньшем диапазоне времени наблюдения (от 150 до 350 с), соответствующем выделенному на рис. 4, а рамкой. На рис. 4, б показаны результаты расчетов при искусственно установленном значении СКО измерения КУ, равном $0,01$ градуса, а на рис. 4, в – равном $0,5$ градуса. При уменьшении значения СКО оценки КУ для каждого объекта наблюдалось увеличение числа сбросов сопровождения соответствующих ему траекторий с последующим обнаружением. Если при $\sigma_{\alpha_k} \approx 0,5^\circ$ полученные траектории сопровождалась стабильно и непрерывно в течение всего периода анализа, то при $\sigma_{\alpha_k} \approx 0,01^\circ$ число разрывов траектории, а следовательно, и периодов сопровождения объекта достигало нескольких десятков. При этом использование фильтра Калмана при всех значениях СКО оценки КУ показывало лучшее качество сопровождения по сравнению с нерекуррентным фильтром.

Таблица 2. Относительное время сопровождения объектов в тактическом эпизоде

Номер объекта	При использовании алгоритма с фильтром Калмана	При использовании алгоритма с нерекуррентным фильтром с конечной памятью
1	0,98	0,93
2	0,97	0,42

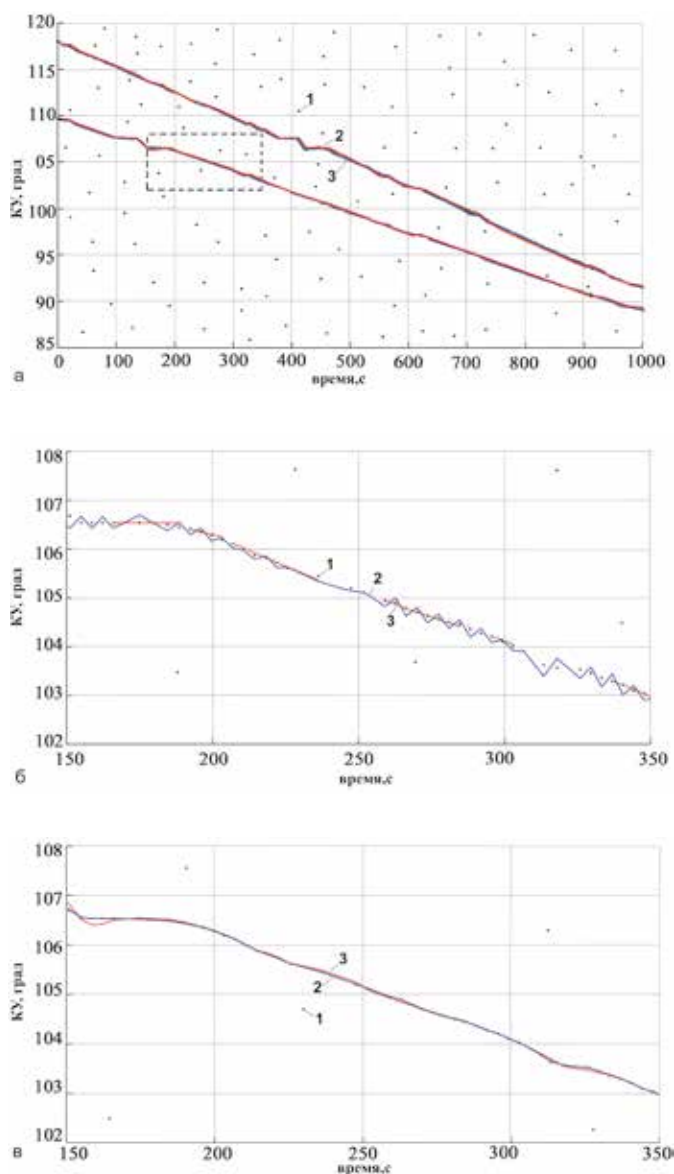


Рис. 4. Рассчитанные траектории и обнаруженные отметки: а – при СКО измерения КУ, полученной в задаче первичной обработки информации, б – при искусственно установленном значении СКО измерения КУ, в – при искусственно установленном значении СКО измерения КУ $\sigma_{\alpha_k} \approx 0,5^\circ$, $\sigma_{\alpha_k} \approx 0,01^\circ$; 1 – отметки; 2 – с использованием рекуррентного фильтра Калмана; 3 – с использованием нерекуррентного фильтра с конечной памятью

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчетов в виде графиков зависимости среднего времени сопровождения от значения СКО определения КУ сигнала для двух объектов и алгоритмов с двумя методами фильтрации представлены на рис. 5.

На рис. 6 представлены графики зависимости числа разрывов траектории объекта от величины СКО определения КУ отметки. Как показывают результаты расчетов, при прямолинейном движении объекта и малом разбросе данных, поступающих от задачи первичной обработки информации, исследованный алгоритм траекторного анализа обеспечивает устойчивое сопровождение траекторий как при использовании фильтра Калмана, так и при применении нерекуррентного фильтра с конечной памятью. Однако при увеличении шума состояния объекта наблюдения фильтр Калмана более предпочтителен и имеет лучшие характеристики по времени сопровождения траекторий и меньшее число срывов сопровождения (см. рис. 5, 6). Это является следствием учета отличия траектории в процессе сопровождения от прямолинейной при реализации фильтра Калмана и корректировки результирующих данных в соответствии с величиной невязки расчетных и измеренных данных. При использовании нерекуррентного фильтра с конечной памятью этот факт не учитывается, поскольку траектория объекта представляется прямой линией.

В работе синтезирован последовательный алгоритм автоматического сопровождения объектов на основе угломерной информации и путем моделирования проведен анализ его применимости. Для решения задачи фильтрации параметров траектории в этом алгоритме использовались два фильтра: рекуррентный фильтр Калмана и нерекуррентный фильтр с конечной выборкой на основе метода функции максимального правдоподобия. Как показали результаты исследования, рассмотренный алгоритм позволяет проводить качественную траекторную обработку в условиях сопровождения нескольких объектов с близкими угловыми координатами. При этом сравнение работы алгоритма с двумя фильтрами показало, что фильтр Калмана демонстрирует большую устойчивость, поскольку позволяет учитывать факт непрямолинейности траектории.

В дальнейшем предполагается провести исследование, направленные на выявление возможности повышения качества работы рассматриваемого алгоритма за счет комбинирования рекуррентного и нерекуррентного фильтров.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке перспективных гидроакустических станций с линейными приемными антеннами.

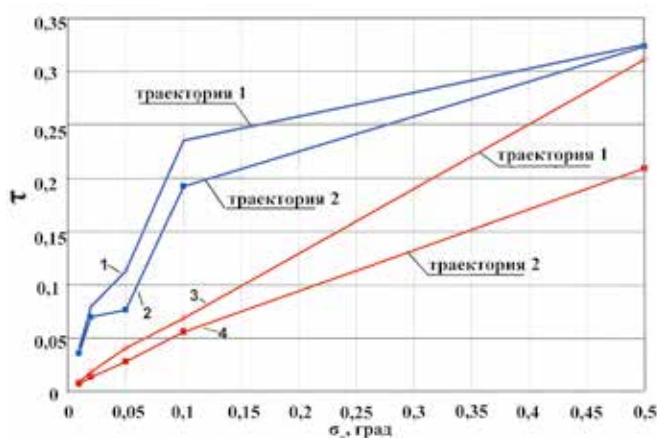


Рис. 5. Относительное время сопровождения объекта

1 – для объекта № 1 (см. рис. 1) с использованием рекуррентного фильтра Калмана; 2 – для объекта № 2 с использованием рекуррентного фильтра Калмана; 3 – для объекта № 1 с использованием нерекуррентного фильтра с конечной памятью; 4 – для объекта № 2 с использованием нерекуррентного фильтра с конечной памятью

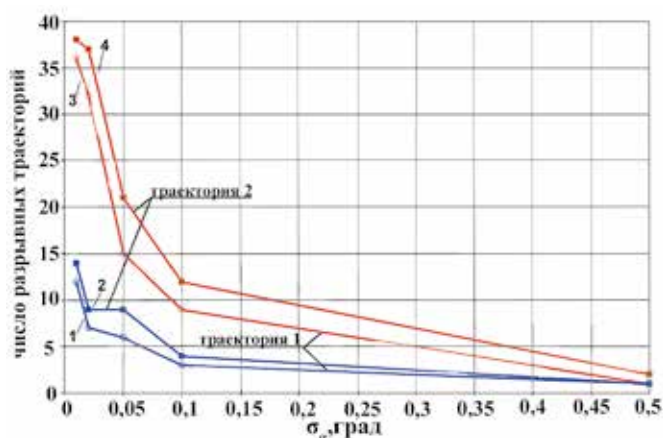


Рис. 6. Число разрывов траектории объекта

1 – для объекта № 1 (см. рис. 1) с использованием рекуррентного фильтра Калмана; 2 – для объекта № 2 с использованием рекуррентного фильтра Калмана; 3 – для объекта № 1 с использованием нерекуррентного фильтра с конечной памятью; 4 – для объекта № 2 с использованием нерекуррентного фильтра с конечной памятью

ЛИТЕРАТУРА

1. Селезнев И.А., Глебова Г.М., Жбанков Г.А., Харахашьян А.М. Характеристики векторно-скалярной приемной бортовой системы // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 2 (24). С. 52–59.
2. Scherbatyuk A.F., Dubrovin F.S., Rodionov A.Yu., Unru P.P. Group Navigation and Control for Marine Autonomous Robotic Complex Based on Hydroacoustic Communication // Proc. of the IROS 2016 IEEE/RSJ Conference (October 9–14). Daejeon, Korea, 2016.
3. Чупин В.А., Долгих Г.И., Щербатюк А.Ф. Исследование пространственно-временного распределения акустического поля в прибрежной области моря // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 2 (26). С. 44–48.
4. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. / под общ. ред. акад. М.Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 398 с.
5. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко А.Ф., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2018. 368 с.
6. Машошин А.И., Кебкэл К.Г. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24, № 3 (94). С. 115–130.
7. Коновалов А.А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Ч. 1. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 164 с.
8. Коновалов А.А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Ч. 2. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 180 с.
9. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев: КВиЦ, 2000. 428 с.
10. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
11. Bar-Shalom Y., Li X.R. Multitarget-multisensor tracking: principles and techniques. Storrs: YBS Publishing, 1995. 615 p.
12. Blackman S., Popoli R. Design and analysis of modern tracking systems. Boston. Artech House, 1999. 1230 p.
13. Панасюк Ю.Н., Пудовкин А.П. Обработка информации в радиотехнических системах. Тамбов: ФГБОУ ВО ТГТУ, 2016. 84 с.
14. Ristic B. Beyond the Kalman Filter. Particle Filters for Tracking Applications. Boston: Artech House, 2004. 299 p.
15. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 2. Введение в теорию фильтрации. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2017. 428 с.
16. Солонар А.С., Хмарский П.А. Особенности применения некоторых методов дискретной фильтрации для задач сопровождения баллистических объектов, совершающих спиральный маневр // Докл. БГУИР. 2015. № 1 (87). С. 71–77.
17. Мосави М.Р., Табатабаи А., Занди М.Дж. Повышение точности позиционирования при совместной обработке измерений GPS и ГЛОНАСС с помощью фильтра Калмана в условиях спуфинга // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24, № 3 (94). С. 14–25.
18. Daum F. Nonlinear filters: Beyond the Kalman filter // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2005. Vol. 20, No. 8. P. 57–67.
19. Степанов О.А. Методы обработки навигационной измерительной информации. СПб.: Ун-т ИТМО, 2017. 196 с.
20. Брага Ю.А., Гриненков А.В. Использование параметров сигналов в алгоритмах траекторного анализа гидроакустических средств наблюдения // Сб. тр. XI Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» ГА-2012. С. 391–393.
21. Прокопович В.В., Шафранюк А.В. Разработка имитаторов входных данных первичной обработки информации в гидроакустических комплексах // Тр. XVI Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: ЛЕМА, 2018. С. 585–588.
22. Лоскутова Г.В., Полканов К.И. Пространственно-частотные и частотно-волновые методы описания и обработки гидроакустических полей. СПб.: Наука, 2007. 239 с.
23. Малышкин Г.С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. Т.1. Оптимальные методы. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2009. 400 с.
24. Киселев В.Ю., Монаков А.А. Оценка качества алгоритмов траекторной обработки в радиолокационных системах управления воздушным движением: обнаружение треков // Радиотехника. 2016. № 3. С. 28–36.

