

Сопровождение маневрирующих целей с использованием многомодельного алгоритма с переменной структурой

Ле Минь Хоанг^{1✉}, А. А. Коновалов², Дао Ван Лук¹

¹ Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам

² НИИ "Прогноз", Санкт-Петербург, Россия

✉ lehoang.navy@gmail.com

Аннотация

Введение. В последние годы большое внимание уделяется разработке методов траекторной фильтрации для сопровождения маневрирующих целей. Общеизвестными методами фильтрации параметров траекторий маневрирующих целей являются многомодельные (Multiply-Model – ММ) алгоритмы. Традиционные ММ-алгоритмы имеют фиксированную структуру. Однако для высокоманевренных целей приходится использовать достаточно большой набор моделей, перекрывающий весь диапазон возможных маневров, при том что увеличение числа моделей не гарантирует повышение точности сопровождения. Для преодоления указанных проблем были предложены ММ-алгоритмы с переменной структурой (Variable Structure ММ – VSMM). В настоящей статье для сопровождения надводных целей, совершающих поворот с постоянной скоростью, предлагаются два алгоритма VSMM. Это алгоритмы с переменным набором моделей, использующие методы адаптивной сетки и переключения сетки.

Цель работы. Разработка адаптивного алгоритма траекторного сопровождения, использующего модель постоянного поворота для сопровождения надводных маневрирующих объектов.

Материалы и методы. Полученный алгоритм основан на теории сеточной адаптации в ММ-методах оценивания и используется для оценки компонент векторов координат и скорости надводных маневрирующих целей. Эффективность алгоритма оценивалась с помощью компьютерного статистического моделирования в среде MATLAB.

Результаты. В статье построена структура адаптивного алгоритма VSMM. Проведено моделирование, демонстрирующее работоспособность алгоритма. В рассмотренных сценариях моделирования алгоритм дает эффективные оценки векторов координат и скорости надводных маневрирующих целей.

Заключение. Результаты моделирования показывают, что использование адаптивных алгоритмов существенно повышает эффективность сопровождения по сравнению с ММ-алгоритмом с фиксированной структурой и при этом экономит вычислительные ресурсы.

Ключевые слова: сопровождение цели, многомодельный алгоритм, IMM-алгоритм, VSMM-алгоритм, алгоритм адаптивной сетки, алгоритм переключения сетки, модель постоянного поворота

Для цитирования: Ле Минь Хоанг, Коновалов А. А., Дао Ван Лук. Сопровождение маневрирующих целей с использованием многомодельного алгоритма с переменной структурой // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 3. С. 77–89. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-77-89

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.04.2023; принята к публикации после рецензирования 10.05.2023; опубликована онлайн 29.06.2023

Tracking of Maneuvering Targets Using a Variable Structure Multiple Model Algorithm

Le Minh Hoang¹✉, Aleksandr A. Konovalov², Dao Van Luc¹

¹ Le Quy Don Technical University, Ha Noi, Viet Nam

² Research Institute "Prognoz", St Petersburg, Russia

✉ lehoang.navy@gmail.com

Abstract

Introduction. In recent years, much attention has been paid to the development of trajectory filtering methods for tracking maneuvering targets. Multi-model (MM) algorithms are widely used for filtering maneuvering targets. Conventional MM algorithms are characterized by a fixed structure. However, highly maneuvering targets require a sufficiently large set of models covering the entire range of possible maneuvers, although an increase in the number of models cannot ensure an increase in the accuracy of tracking. To overcome these problems, multiple model algorithms with a variable structure (VSMM) were proposed. This article proposes two VSMM algorithms for tracking maritime targets performing a coordinated turn at constant speed. These are algorithms with a variable set of models based on adaptive grid and switching grid methods.

Aim. To develop an adaptive trajectory tracking algorithm that uses a constant turn model to track maneuvering surface objects.

Materials and methods. The resulting algorithm is based on the theory of grid adaptation in multi-model estimation methods and is used to estimate the components of the coordinate and velocity vectors of surface maneuvering targets. The algorithm efficiency was evaluated using computer statistical modeling in the MATLAB environment.

Results. The structure of an adaptive VSMM algorithm was described. Simulations were carried out to confirm the algorithm efficiency. In the considered simulation scenarios, the algorithm produces effective estimates of the coordinate vectors and speed of surface maneuvering targets.

Conclusion. Adaptive algorithms improve the efficiency of target tracking in comparison with multi-model algorithms with a fixed structure, at the same time as saving computational resources.

Keywords: target tracking, multiply model algorithm, IMM algorithm, VSMM algorithm, adaptive grid algorithm, switching grid algorithm, coordinated turn model

For citation: Le Minh Hoang, Konovalov A. A., Dao Van Luc. Tracking of Maneuvering Targets Using a Variable Structure Multiple Model Algorithm. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 3, pp. 77–89. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-77-89

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 04.04.2023; accepted 10.05.2023; published online 29.06.2023

Введение. Объем грузовых и пассажирских перевозок морским и речным транспортом увеличивается с каждым годом. Как следствие, возрастают требования к системам безопасности на водном транспорте. Среди мер по повышению безопасности мореплавания важное место занимает совершенствование методов обработки данных в системах управления судами, в том числе радиолокационных данных, поступающих от береговых РЛС. Одним из этапов обработки радиолокационной информации является построение траекторий движения надводных объектов. Многие из наблюдаемых береговыми РЛС надводных целей относятся к

категории маневрирующих, что требует использования соответствующих алгоритмов траекторной фильтрации.

В настоящее время общепризнанными методами фильтрации параметров траекторий маневрирующих целей являются многомодельные (Multiply-Model – MM) алгоритмы [1–3]. Они характеризуются тем, что в каждый момент времени используют не одну, а сразу несколько моделей движения цели, каждая из которых отражает возможные режимы ее движения. Формируя оценки параметров траектории для каждой модели и оценивая их правдоподобие, фильтр вычис-

ляет результирующую оценку вектора состояния как взвешенную сумму этих локальных оценок.

Традиционные ММ-алгоритмы, среди которых наиболее популярным является интерактивный многомодельный алгоритм (Interactive Multiple Model – IMM) [4–6], относят к классу алгоритмов с фиксированной структурой (Fixed Structure MM – FSMM) – у них набор моделей и их параметров задан раз и навсегда еще до начала работы фильтра. Однако такой подход имеет определенные недостатки. Для целей, режим маневрирования которых неизвестен, приходится использовать достаточно большой набор моделей, перекрывающий весь диапазон возможных маневров, что существенно увеличивает объем вычислений. Кроме того, увеличение числа моделей не гарантирует повышение точности сопровождения, поскольку возникает конкуренция между моделями.

Для преодоления указанных проблем были предложены многомодельные алгоритмы с переменной структурой (Variable Structure MM – VSMM) [7, 8], суть которых заключается в адаптации параметров или структуры алгоритма в зависимости от характера движения цели [9]. Существуют различные направления адаптации, среди которых чаще всего рассматриваются два многомодельных метода сеточной адаптации [10]: алгоритм адаптивной сетки (Adaptive Grid – AGMM) [11] и переключаемой сетки (Switching Grid – SGMM) [12]. Сетка используется для описания множественных моделей. Это набор значений в непрерывном интервале параметра маневра цели (например, скорости поворота при использовании модели Constant Turn (CT)). Алгоритм адаптивной сетки определяет значения точек сетки, которые задаются набору фильтров на каждом шаге оценивания в качестве параметров настройки из непрерывного интервала параметра маневра, алгоритм переключаемой сетки осуществляет переключение среди заранее определенных наборов моделей внутри того же интервала.

В литературе описано применение алгоритмов AGMM и SGMM для сопровождения воздушных объектов, совершающих координированный поворот [13] и линейное ускорение [14]. Целью настоящей работы является исследование возможности применения сеточных

адаптивных многомодельных алгоритмов для сопровождения надводных целей при помощи береговой РЛС, а также сравнение их эффективности с алгоритмом IMM при разных параметрах настройки.

ММ с переменной структурой. Набор моделей алгоритма IMM фиксирован и обычно включает в себя большое количество моделей, перекрывающих весь диапазон возможных маневров. Например, для целей, совершающих интенсивные повороты с постоянной скоростью, это одна модель для прямолинейного движения (Constant Velocity – CV) и 4–8 моделей СТ, рассчитанных на разные скорости поворота. Соответственно, в IMM используется 5–9 работающих параллельно фильтров. На очередном шаге оценивания считается, что каждая из этих моделей может соответствовать истинному режиму движения цели. По отметке, присвоенной траектории, вычисляются оценки фильтров, оцениваются правдоподобия моделей, результирующая оценка находится как сумма локальных оценок, взвешенная с учетом этих правдоподобий и заданных вероятностей перехода.

Многомодельный алгоритм с переменной структурой VSMM имеет более компактный набор моделей, структура и параметры которых адаптивно подстраиваются под изменяющийся режим движения цели. На рис. 1 представлена обобщенная структурная схема VSMM. По сравнению с базовым алгоритмом IMM алгоритм VSMM имеет модуль адаптации набора моделей. Он используется для определения набора моделей, которые будут задействованы в данный момент времени. В зависимости от результатов работы фильтра каждой модели (т. е. их векторов состояния и правдоподобий) оцениваются значения параметра (скорости поворота) для всего набора моделей с тем, чтобы новый набор более точно соответствовал истинному режиму движения цели.

В данной статье исследуются два метода адаптации набора моделей. Каждый из них использует три модели, настроенные на свои скорости поворота. Основная идея метода адаптивной сетки заключается в том, что значение скорости поворота для каждой модели выбирается из непрерывного множества, тогда как в методе

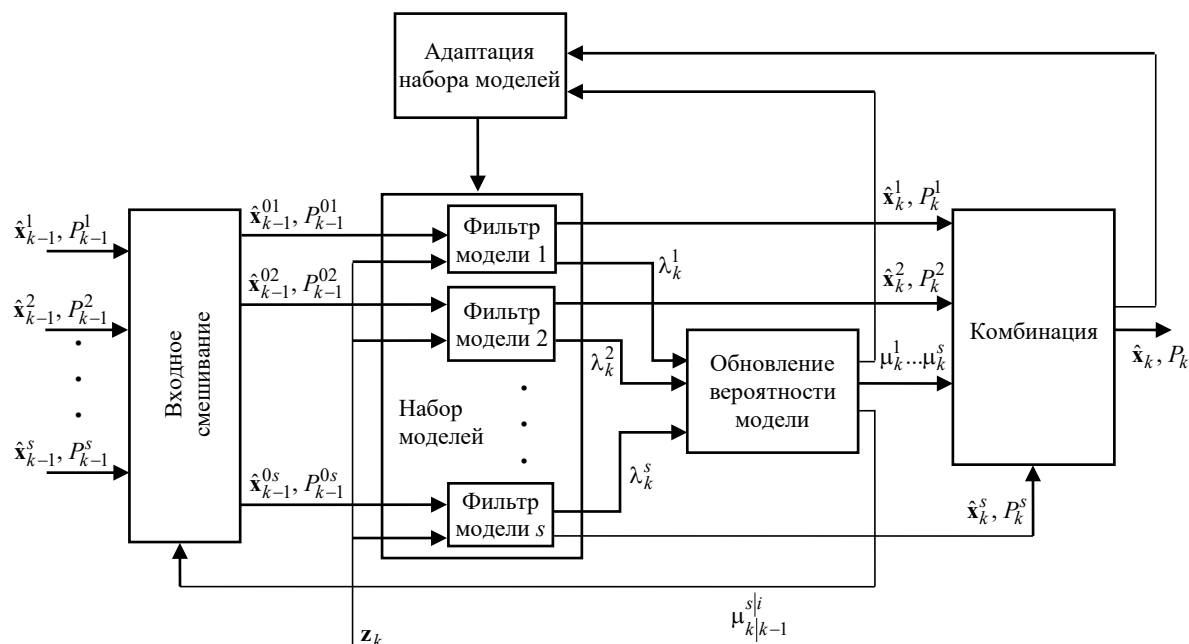


Рис. 1. Схема алгоритма ММ с переменной структурой
Fig. 1. Scheme of the MM algorithm with variable structure

переключаемой сетки используется один из предварительно заданных наборов значений.

Таким образом, в целом алгоритм VSMM подобен стандартному алгоритму IMM, однако имеет один дополнительный этап – адаптацию набора моделей, для чего в нашем исследовании применяются алгоритмы AG и SG.

Алгоритм VSMM состоит из следующих шести шагов.

1. Адаптация набора моделей.

1.1. Алгоритм адаптивной сетки. Предположим, что реальная скорость поворота маневрирующей цели в настоящий момент неизвестна, но находится в непрерывном интервале $[-\omega_{\max}, \omega_{\max}]$, где ω_{\max} – максимально возможное значение скорости поворота данной цели с учетом физических ограничений. Создадим

изменяющийся во времени набор из трех моделей, который в некоторый k -й момент времени имеет вид $M_k = [\omega_L^k \ \omega_C^k \ \omega_R^k]$, где значения скоростей поворота каждой модели (значений сетки) $(\omega_L^k, \omega_C^k, \omega_R^k) \in [-\omega_{\max}, \omega_{\max}]$, $k = 1, 2, \dots, N$. Буквы L, C, R обозначают, соответственно, левую, центральную и правую модели конфигурации MM.

Схема сдвига моделей в алгоритме AG представлена на рис. 2. Верхняя линия показывает диапазон возможных скоростей поворота $[-\omega_{\max}, \omega_{\max}]$. В каждый момент времени набор моделей AG содержит три модели, т. е. правую, центральную и левую модели. Стрелка от одной модели к другой указывает на

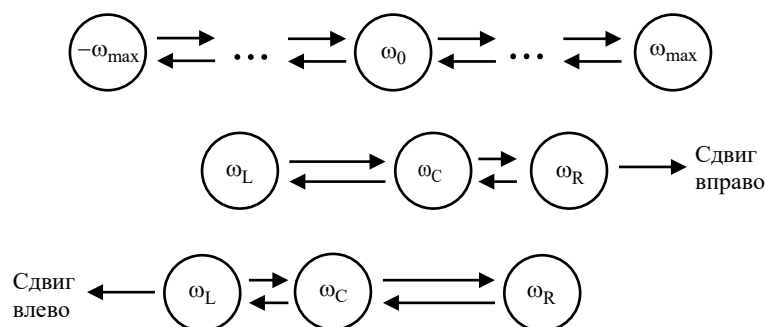


Рис. 2. Схема сдвига моделей алгоритма адаптивной сетки
Fig. 2. Scheme of model shift in adaptive grid algorithm

направление сдвига модели. Стрелки по обеим сторонам обозначают возможное смещение вправо или влево. Как центр набора моделей, так и расстояние между ними могут быть скорректированы в соответствии с заданным правилом принятия решения.

В алгоритме VSMM со схемой адаптивной сетки правило принятия решения состоит из двух основных элементов: во-первых, перенастройки центра сетки, во-вторых, перенастройки расстояния по сетке. Центр сетки – это параметр центральной модели (ω_C^k), а расстояние (шаг) сетки – это интервал между параметрами любых двух соседних моделей. Истинное значение параметра текущей скорости поворота находится в пределах области значений параметра всей совокупности набора моделей. Однако если истинное значение параметра находится за пределами этой области или вблизи ее границы, этот факт должен быть немедленно обнаружен и предприняты соответствующие действия по адаптации набора моделей, к которым относятся сдвиг моделей и расширение области значений параметра.

Алгоритм VSMM первоначально запускается с исходными значениями $M_0 = [\omega_L^0 \quad \omega_C^0 \quad \omega_R^0]$, выбор которых обусловлен теми же соображениями, что и для обычного IMM [15]. На каждом шаге оценивания при необходимости подстраиваются два параметра: центр сетки и шаг сетки.

Корректировка центра сетки. Положение центра сетки изменяется, если апостериорная вероятность модели центра μ_C^k падает ниже некоторого заранее заданного порогового значения t_1 , и определяется из выражения

$$\omega_C^{k+1} = \sum_{i=1}^N \mu_i^k \omega_i^k,$$

где μ_i^k – апостериорная вероятность i -й модели в момент времени k . В противном случае положение набора моделей не изменяется, т. е. $\omega_C^{k+1} = \omega_C^k$.

Корректировка шага сетки. Расстояние сетки настраивается согласно следующим правилам:

1. Если максимальную вероятность среди

всех моделей имеет центральная модель, т. е.

$\mu_C^k = \max \{\mu_i^k\}_{i=1, N}$, то сдвига моделей нет.

Если при этом левая и/или правая модель будут определены как маловероятные (т. е. апостериорная вероятность модели окажется меньше выбранного порогового значения t_2), соответствующее расстояние данной модели будет уменьшено наполовину:

$$\omega_L^{k+1} = \begin{cases} \omega_C^{k+1} - \delta_L^k / 2, & \text{если } \mu_L^k < t_2, \\ \omega_C^{k+1} - \delta_L^k, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$\omega_R^{k+1} = \begin{cases} \omega_C^{k+1} - \delta_R^k / 2, & \text{если } \mu_R^k < t_2, \\ \omega_C^{k+1} - \delta_R^k, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где $\delta_L^k = \max(\omega_C^k - \omega_L^k, r)$, $\delta_R^k = \max(\omega_R^k - \omega_C^k, r)$ и t_2 – порог для обнаружения маловероятной модели (например, 0.05); r – расстояние модели (параметр проектирования). Это действие поможет сократить диапазон значений скоростей и уменьшить ошибки оценивания.

2. Если максимальную вероятность среди всех моделей имеет левая модель, т. е.

$\mu_L^k = \max \{\mu_i^k\}_{i=1, N}$, производится сдвиг влево:

$$\omega_L^{k+1} = \begin{cases} \omega_C^{k+1} - 2\delta_L^k, & \text{если } \mu_L^k > t_3, \\ \omega_C^{k+1} - \delta_L^k, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$\omega_R^{k+1} = \omega_C^{k+1} + \delta_R^k,$$

где t_3 – порог обнаружения значимой модели (например, 0.95). При этом левая часть области значений параметра расширяется, расстояние между центром и левой моделью увеличивается в 2 раза.

3. Если максимальную вероятность среди всех моделей имеет правая модель, т. е.

$\mu_R^k = \max \{\mu_i^k\}_{i=1, N}$, производится сдвиг вправо:

$$\omega_L^{k+1} = \omega_C^{k+1} - \delta_L^k;$$

$$\omega_R^{k+1} = \begin{cases} \omega_C^{k+1} + 2\delta_R^k, & \text{если } \mu_R^k > t_3, \\ \omega_C^{k+1} + \delta_R^k, & \text{иначе,} \end{cases}$$

при этом правая часть области значений пара-

метра расширяется, расстояние между центром и правой моделью увеличивается в 2 раза.

1.2. Алгоритм переключения сетки. Как и в алгоритме адаптивной сетки, считается, что реальная скорость поворота маневрирующей цели в каждый конкретный момент неизвестна, но находится в непрерывном интервале $[-\omega_{\max}, \omega_{\max}]$. Этот интервал разбивается на большое число значений $M = \{\omega_i\}$:

$$\omega_i = i \frac{\omega_{\max}}{n}; i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm n,$$

каждое из которых становится параметром модели.

При разбиении интервала можно следовать тем же принципам, что и при формировании набора моделей для алгоритма IMM с фиксированной структурой. Далее из этого набора моделей формируется подмножество из трех моделей, которое и будет соответствовать режиму движения в каждый конкретный момент времени, т. е. набор моделей в любой k -й момент времени имеет вид $M_k = [\omega_{i-1}, \omega_i, \omega_{i+1}]$. Схема переключения сетки в алгоритме SG представлена на рис. 3.

Адаптация набора моделей заключается в выборе такого набора $M_k \subset M$, который в наибольшей степени соответствует текущему режиму движения цели.

Логика переключения набора моделей настраивается в соответствии со следующим правилом:

$$M_{k+1} = \begin{cases} M_{i-1}, & \text{если } \mu_{i-1}^k > t; \\ M_i, & \text{если } \mu_i^k > t; \\ M_{i+1}, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где t – порог выбора центрального режима (параметр разработки).

Логика переключения алгоритма можно описать следующим образом: изначально принимается решение о присвоении априорно наиболее вероятного подмножества моделей (логика аналогична выбору набора моделей в алгоритме с фиксированной структурой). Затем на каждом шаге оценивания проверяется апостериорная вероятность для каждой модели и принимается решение о необходимости переключения подмножества. Если такая необходимость установлена, осуществляется изменение подмножества; если нет – сохраняется текущее.

Поскольку рассматриваемые здесь алгоритмы VSMM используют только три фильтра, они имеют существенный выигрыш в вычислительной эффективности по сравнению с IMM с фиксированной структурой.

Далее кратко рассмотрим остальные шаги алгоритма VSMM [16].

2. Вычисление априорных вероятностей перехода:

$$\mu_{k|k-1}^{s|i} = \frac{\pi_{is} \mu_{k-1}^i}{\sum_{m_s \in M_{k-1}} \pi_{is} \mu_{k-1}^i},$$

где π_{is} – вероятность перехода от i -й к s -й модели; μ_{k-1}^i – вероятность i -й модели на $(k-1)$ -м шаге оценивания. Здесь и далее индекс i отно-

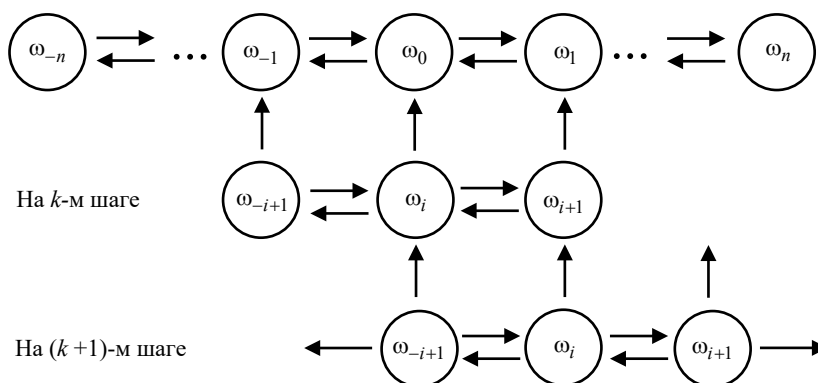


Рис. 3. Схема переключения сетки

Fig. 3. Switching grid scheme

сится к моделям на $(k-1)$ -м шаге, индекс s – к моделям на k -м шаге.

3. Определение начальных условий каждого фильтра s -й модели:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{0s} = \sum_{m_s \in M_{k-1}} \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^i \mu_{k|k-1}^{s|i};$$

$$\hat{P}_{k-1}^{0s} = \sum_{m_s \in M_{k-1}} \mu_{k|k-1}^{s|i} \left[P_{k-1}^i + \left(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^i - \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{0s} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^i - \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{0s} \right)^T \right],$$

где $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^i$ и P_{k-1}^i – вектор состояния и ковариация i -й модели на $(k-1)$ -м шаге.

4. Фильтрация:

– экстраполированная оценка вектора состояния и его ковариация:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^s = F \left(M_{k-1}^s \right) \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{0s};$$

$$P_{k|k-1}^s = F \left(M_{k-1}^s \right) P_{k-1}^{0s} F \left(M_{k-1}^s \right)^T + Q_{k-1}^s,$$

где F – матрица экстраполяции, зависящая от модели M_{k-1}^s ; Q_{k-1}^s – ковариация шума процесса;

– экстраполированная оценка вектора измерения:

$$\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}^s = H \left(M_{k-1}^s \right) \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^s,$$

где H – матрица наблюдения;

– вектор невязки и его ковариационная матрица:

$$\mathbf{y}_k^s = \mathbf{z}_k - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}^s;$$

$$S_k^s = H \left(M_k^s \right) P_{k|k-1}^s H \left(M_k^s \right)^T + R_k,$$

где \mathbf{z}_k и R_k – текущее измерение и его ковариация;

– матричный коэффициент Калмана:

$$K_k^s = P_{k|k-1}^s H \left(M_k^s \right)^T \left(S_k^s \right)^{-1};$$

– вектор состояния и его ковариационная матрица:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^s = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^s + K_k^s \mathbf{y}_{k-1}^s;$$

$$P_k^s = P_{k|k-1}^s - K_k^s S_k^s \left(K_k^s \right)^T.$$

5. Вычисление апостериорных вероятностей истинности моделей:

$$\mu_k^s = \frac{\Lambda_k^s \sum_{m_s \in M_k} \pi_{is} \mu_{k-1}^i}{\sum_{m_s \in M_k} \pi_{is} \mu_{k-1}^i \Lambda_k^s},$$

где

$$\Lambda_k^s = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^m |S_k^s|}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\mathbf{y}_k^s \right)^T \left(S_k^s \right)^{-1} \left(\mathbf{y}_k^s \right) \right]$$

– функция правдоподобия (m – размер векторов \mathbf{z} и \mathbf{y}).

6. Результат оценки вектора состояния и его ковариационной матрицы:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \sum_{m_s \in M_k} \hat{\mathbf{x}}_k^s \mu_k^s;$$

$$P_k = \sum_{m_s \in M_k} \mu_k^s \left\{ P_k^s + \left[\hat{\mathbf{x}}_k^s - \hat{\mathbf{x}}_k \right] \left[\hat{\mathbf{x}}_k^s - \hat{\mathbf{x}}_k \right]^T \right\}.$$

Моделирование. С целью анализа и оценки эффективности предложенных адаптивных алгоритмов рассматриваются сценарии сопровождения двух маневрирующих целей, истинные траектории движения для которых приведены на рис. 4 и 11 соответственно. На рис. 5 и 12

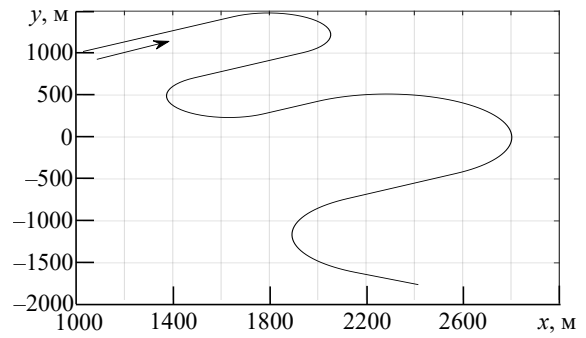


Рис. 4. Истинная траектория цели 1

Fig. 4. Target 1 true trajectory

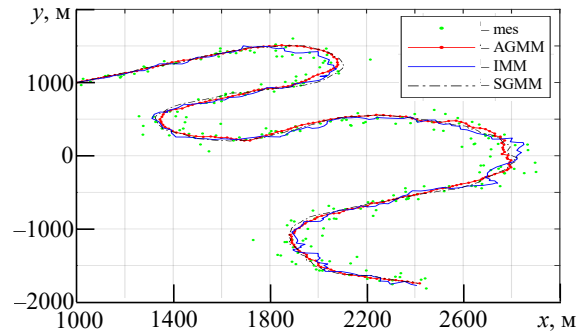


Рис. 5. Траектория цели 1 после фильтрации

Fig. 5. Target 1 trajectory after filtering

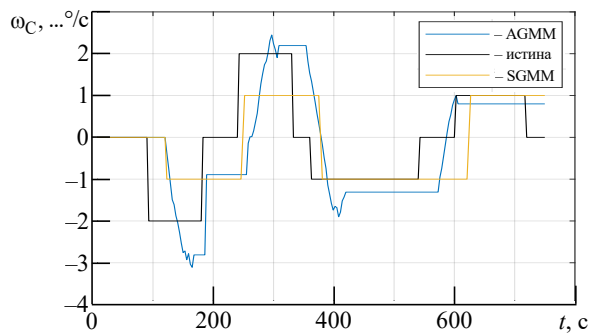


Рис. 6. Изменения скорости поворота цели 1

Fig. 6. Target 1 turn rate changes

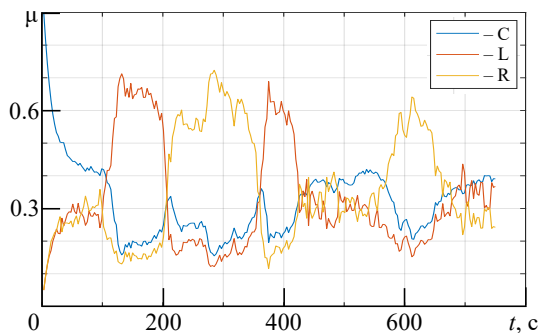


Рис. 7. Вероятности моделей в SGMM

Fig. 7. Model probabilities in SGMM

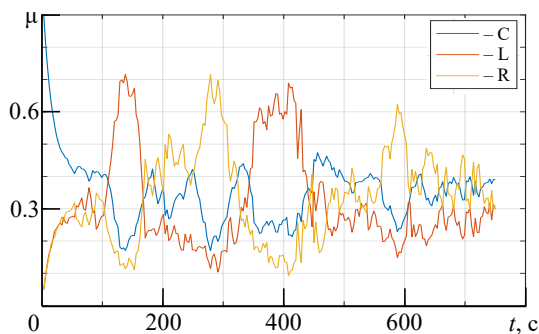


Рис. 8. Вероятности моделей в AGMM

Fig. 8. Model probabilities in AGMM

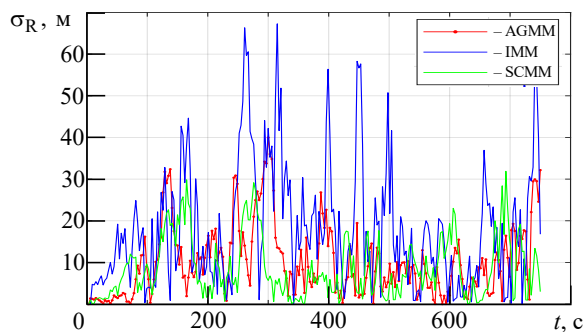


Рис. 9. СКО по координатам

Fig. 9. Position RMSE

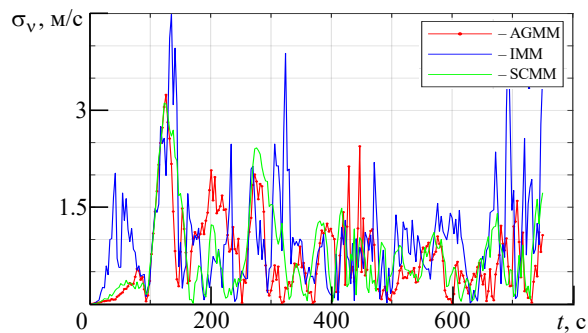


Рис. 10. СКО по скорости

Fig. 10. Velocity RMSE

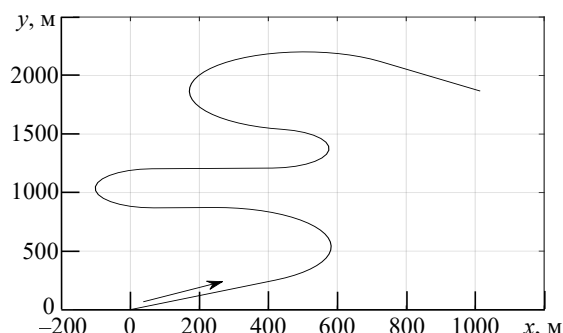


Рис. 11. Истинная траектория цели 2

Fig. 11. Target 2 true trajectory

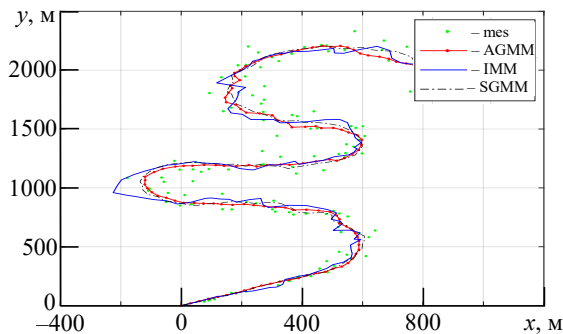


Рис. 12. Траектория цели 2 после фильтрации

Fig. 12. Target 2 trajectory after filtering

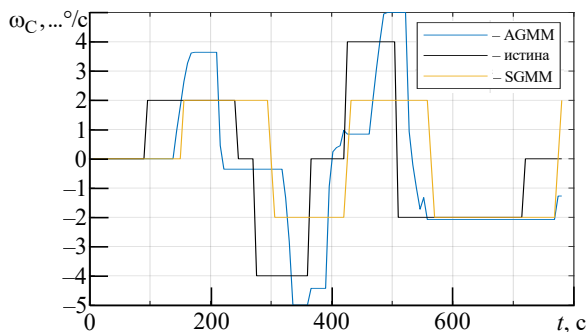


Рис. 13. Изменения скорости поворота цели 2

Fig. 13. Target 2 turn rate changes

представлены траектории целей после фильтрации: зелеными точками показаны зашумленные измерения (СКО по дальности $\sigma_p = 60$ м, по азимуту $\sigma_\alpha = 0.5^\circ$, период обзора

3 с), линиями – результаты работы разных фильтров (IMM, AGMM, SGMM). На рис. 6 и 13 представлены изменения скорости поворота центральной модели, на рис. 7, 8, 14, 15 – веро-

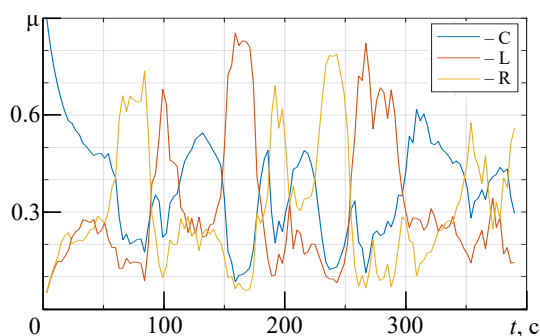


Рис. 14. Вероятности моделей в AGMM

Fig. 14. Model probabilities in AGMM

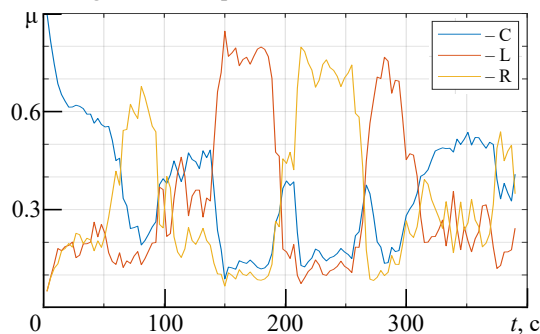


Рис. 15. Вероятности моделей в SGMM

Fig. 15. Model probabilities in SGMM

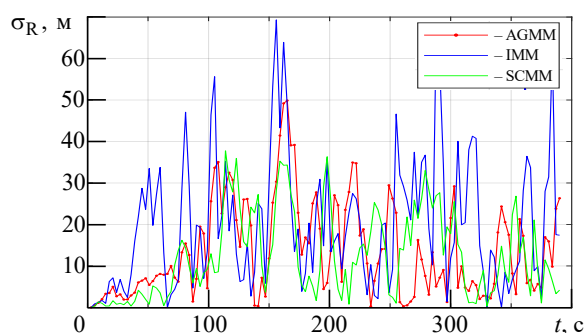


Рис. 16. СКО по координатам

Fig. 16. Position RMSE

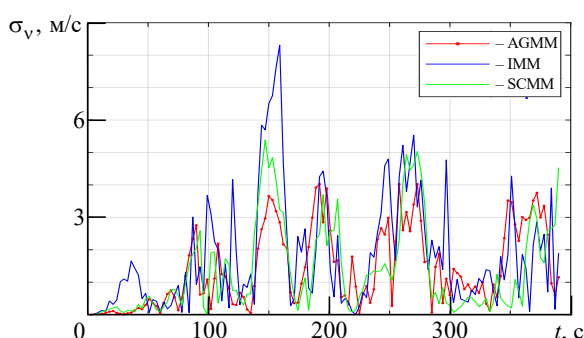


Рис. 17. СКО по скорости

Fig. 17. Velocity RMSE

ятности моделей, на рис. 9 и 16 – зависимости СКО оценки координат цели от времени, на рис. 10 и 17 – зависимости СКО скорости от времени. Результаты усреднены по 500 реализациям.

Табл. 1. Параметры движения цели

Tab. 1. Target movement parameters

Время, с	Скорость поворота, ...°/с
0...90	0
90...180	–2
180...240	0
240...330	2
330...360	0
360...540	–1
540...600	0
600...750	1

Пример 1. Цель движется сначала с постоянной скоростью, затем совершает несколько поворотов (табл. 1). Начальное состояние цели $x_0 = y_0 = 1000$ м; $v_{0x} = 15$ уз; $v_{0y} = 10$ уз; общее время движения 750 с.

Для сравнения используется алгоритм IMM с пятью фиксированными моделями со скоростями поворота $M = [-2, -1, 0, 1, 2]$. Подмножество набора моделей для SGMM: $M_1 = [-2, -1, 0]$; $M_2 = [-1, 0, 1]$; $M_3 = [0, 1, 2]$. Начальные вероятности моделей IMM $\mu_0 = [0.9 \ 0.025 \ 0.025 \ 0.025 \ 0.025]$. Порог для SGMM $t = 0.7$; для AGMM $t_1 = 0.3$; $t_2 = 0.25$; $t_3 = 0.75$; $\omega_{\max} = 3^\circ/\text{с}$; матрица переходных вероятностей:

$$\pi_{is} = \begin{cases} 0.9, & \text{если } i = s; \\ \frac{0.1}{N-1}, & \text{если } i \neq s, \end{cases}$$

где N – количество моделей.

Пример 2. Начальное состояние цели $x_0 = y_0 = 0$ м; $v_{0x} = 20$ уз; $v_{0y} = 12$ уз; $\sigma_p = 60$ м; $\sigma_\alpha = 0.5^\circ$. Общее время движения 390 с, скорости поворота указаны в табл. 2. Истинная траектория движения цели показана на рис. 11.

Табл. 2. Параметры движения цели

Tab. 2. Target movement parameters

Время, с	Скорость поворота, ...°/с
0...45	0
45...120	2
120...135	0
135...180	–4
180...210	0
210...255	4
255...360	–2
360...390	0

Табл. 3. Сравнение эффективности алгоритмов
Tab. 3. Comparison of the efficiency of algorithms

Алгоритм	Пример 1				Пример 2			
	Пиковое СКО		Среднее СКО		Пиковое СКО		Среднее СКО	
	по координатам, м	по скорости, м/с	по координатам, м	по скорости, м/с	по координатам, м	по скорости, м/с	по координатам, м	по скорости, м/с
IMM	69.52	4.74	17.62	0.91	80.66	7.83	23.15	2.08
AGMM	39.92	3.26	10.21	0.75	51.83	6.68	11.37	1.36
SGMM	43.12	3.31	13.25	0.74	49.59	5.99	11.55	1.40

Набор моделей для IMM: $M = [-4, -2, 0, 2, 4]$.
Подмножества наборов моделей для SGMM:
 $M_1 = [-4, -2, 0]$; $M_2 = [-2, 0, 2]$; $M_3 = [0, 2, 4]$.
Порог для SGMM $t = 0.7$, для AGMM $t_1 = 0.3$;
 $t_2 = 0.2$; $t_3 = 0.8$; $\omega_{\max} = 5^\circ/\text{с}$.

Как следует из результатов моделирования, при прямолинейном движении ошибки положения и скорости двух алгоритмов относительно схожи. Когда цель совершает маневры, разница в ошибках положения и скорости трех алгоритмов более заметна, особенно когда цель совершает интенсивные маневры. В целом алгоритмы VSMM обладают большей стабильностью и адаптивностью, чем алгоритм IMM. Однако для алгоритма SGMM важное значение имеет адекватный выбор подмножества набора моделей движения цели, тогда как для алгоритма AGMM набор моделей автоматически адаптируется в пределах $[-\omega_{\max}, \omega_{\max}]$. В табл. 3 приведено сравнение значения СКО по позиции и скорости трех алгоритмов.

Из табл. 3 видно, что результаты фильтрации двух предложенных алгоритмов (AGMM и SGMM) в обоих примерах относительно близки друг другу и явно лучше, чем у алгоритма IMM.

На рис. 18 представлен результат исследова-

ния влияния выбора значения параметра t на изменение значения скорости поворота центральной модели в алгоритме SGMM для примера 2, при двух значениях параметра $t = 0.3$ и $t = 0.7$. Чем больше значение t , тем реже изменяется значение центральной модели, и, наоборот, чем меньше t , тем чаще оно изменяется. При этом при большом t имеется задержка переключения относительно истинного значения, а при малом t имеют место ложные переключения. При очень большом значении t (для данного примера при $t > 0.87$) вероятность любой модели никогда не превосходит t , поэтому значение центральной модели либо не изменяется, что приводит к тому, что алгоритм SGMM действует как алгоритм IMM с 3 фиксированными моделями, либо изменяется в одном направлении, пока не будет достигнуто предельное значение.

Для алгоритма AGMM, когда вероятность центральной модели падает ниже заданного порога t_1 , значение центральной модели будет пересчитано, а если выше – сохранено текущее значение. Поэтому, когда значение t_1 велико, значение центральной модели будет пересчитываться чаще, повышая тем самым скорость реакции на изменение параметра маневра, однако это также приводит к появлению переход-

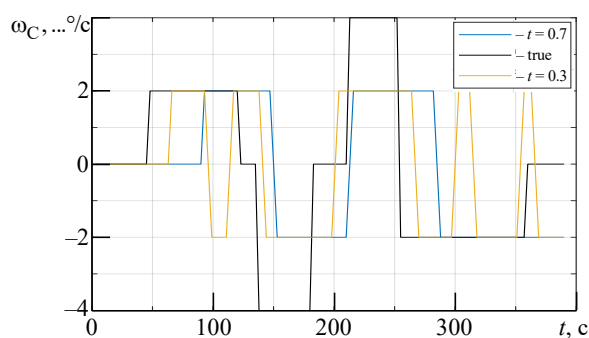


Рис. 18. Влияние выбора значений параметров t на изменения значения центральной модели алгоритма SGMM

Fig. 18. Influence of the selected parameters t on changes in the central model of the SGMM algorithm

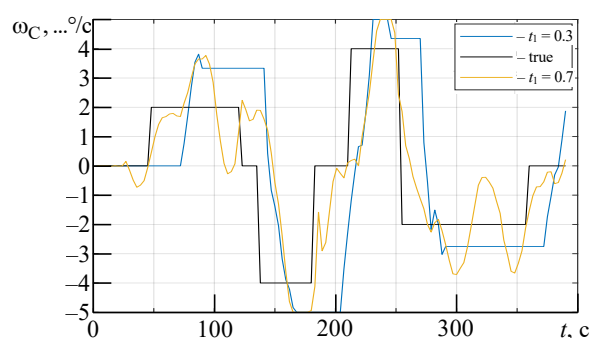


Рис. 19. Влияние выбора значений параметра t_1 на изменение значения центральной модели алгоритма AGMM

Fig. 19. Influence of the selected parameters t_1 on changes in the central model of the AGMM algorithm

ных процессов. При малом значении t_1 алгоритм реагирует позже, подобранное значение параметра центральной модели несколько превосходит истинное значение параметра маневра. На рис. 19 представлено влияние выбора значения параметра t_1 на изменения скорости поворота центральной модели в примере 2 при $t_1 = 0.3$ и $t_1 = 0.7$.

Сравнивая поведение алгоритмов SGMM и AGMM при разных значениях параметров t и t_1 , можно сделать вывод о целесообразности использования значений, принятых в первой части моделирования: $t = 0.7$ и $t_1 = 0.3$.

Заключение. Рассмотрены алгоритмы многомодельной траекторной фильтрации с переменной структурой для сопровождения маневрирующих надводных целей. Эти алгоритмы

используют усеченный по сравнению с алгоритмом IMM с фиксированной структурой набор моделей движения совместно с соответствующим правилом принятия решения об изменении параметров моделей, разработанным на основе схем адаптивной сетки и переключения сетки. Результаты моделирования показывают, что предложенный метод позволяет более точно сопровождать маневрирующие цели, чем традиционный IMM. Кроме того, поскольку здесь меньше фильтров, алгоритмы требуют меньших вычислительных затрат. Предлагаемые адаптивные методы имеют близкие характеристики траекторного сопровождения, в том числе высокую точность и хорошую адаптируемость к различным маневрам цели. При этом алгоритм AGMM обладает несколько большей адаптивностью, чем алгоритм SGMM.

Список литературы

1. Bar-Shalom Y., Li X. R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation. New York: Wiley & Sons, 2001. 558 p.
2. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Part V: Multiple-Model Methods // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2005. Vol. 41, № 4. P. 1255–1321. doi: 10.1109/TAES.2005.1561886
3. Рязанцев Л. Б. Многомодельное байесовское оценивание вектора состояния маневренной воздушной цели в дискретном времени // Вестн. ТГТУ. 2009. № 4. С. 729–739.
4. Blom H. A. P., Bar-Shalom Y. The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients // IEEE Transactions on Automatic Control. 1988. Vol. 33, № 8. P. 780–783. doi: 10.1109/9.1299
5. Li X. R., Bar-Shalom Y. Design of an interacting multiple model algorithm for air traffic control tracking // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 1993. Vol. 1, № 3. P. 186–194. doi: 10.1109/87.251886
6. Бакулев П. А., Сычев М. И., Лыу Н. Ч. Сопровождение маневрирующей цели с помощью интерактивного многомодельного алгоритма // Тр. МАИ. Электронный журн. 2002. № 9. С. 1–8. URL: <https://mai.ru/publications/index.php?ID=34587> (дата обращения 11.05.23)
7. Li X. R., Bar-Shalom Y. Mode-Set Adaptation in Multiple-Model Estimators for Hybrid Systems // 1992 American Control Conf. Chicago, USA, 24–26 June 1992. IEEE, 1992. P. 1794–1799. doi: 10.23919/ACC.1992.4792420
8. Munir A., Atherton D. P. Adaptive interacting multiple model algorithm for tracking a manoeuvring target // IEE Proc. on Radar, Sonar and Navigation. 1995. Vol. 142, № 1. P. 11–17. doi: 10.1049/ip-rsn:19951528
9. Li X. R. Engineer's guide to variable-structure multiple-model estimation for tracking / Multitarget-multisensor tracking: applications and advances. Vol. III. Boston: Artech House, 2000. P. 499–567.
10. Jilkov V. P., Angelova D. S., Semerdjiev T. A. Design and comparison of mode-set adaptive IMM algorithms for maneuvering target tracking // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1999. Vol. 35, № 1. P. 343–350. doi: 10.1109/7.745704
11. Zhu Zw. Shipborne radar maneuvering target tracking based on the variable structure adaptive grid interacting multiple model // J. Zhejiang Univ. Sci. C. 2013. № 14. P. 733–742. doi: 10.1631/jzus.C1200335
12. Li X. R., Zhang Y. M., Zhi X. R. Multiple-model estimation with variable structure. Pt. IV: Design and evaluation of model-group switching algorithm // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1999. Vol. 35, № 1. P. 242–254. doi: 10.1109/7.745695
13. Jilkov V. P., Angelova D. S., Semerdjiev Tz. A. Design and comparison of mode-set adaptive IMM algorithms for maneuvering target tracking // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1999. Vol. 35, № 1. P. 343–350. doi: 10.1109/7.745704
14. Sun H.-M. Adaptive Filtering Techniques in Radar Tracking System with Variable-Structured Multiple-Model Estimator // J. of C.C.I.T. 2005. № 2. P. 27–45.
15. Li X. R., Zhao, Li X.-B. General Model-Set Design Methods for Multiple-Model Approach // IEEE Trans. on Automatic Control. 2005. Vol. 50, № 9. P. 1260–1276. doi: 10.1109/TAC.2005.854581
16. Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Ч. 2. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. 180 с.

Информация об авторах

Ле Минь Хоанг – специалист по направлению "Радиоэлектронные системы и комплексы", аспирант Вьетнамского государственного технического университета им. Ле Куй Дона (Ханой, Вьетнам). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокация; вторичная и третичная обработка радиолокационной информации.

Адрес: Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, ул. Хоанг Куок Вьет, д. 236, район Бак Ты Лиём, Ханой, Вьетнам
E-mail: lehoang.navy@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8913-3296>

Коновалов Александр Анатольевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ "Прогноз". Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – траекторное сопровождение в радиолокационных системах; объединение данных; пассивная бистатическая радиолокация; многопозиционная радиолокация.

Адрес: НИИ "Прогноз", ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197002, Россия
E-mail: al_an_kon@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0004-1943-5394>

Дао Ван Лук – специалист по направлению "Радиоэлектронные системы и комплексы", аспирант Вьетнамского государственного технического университета им. Ле Куй Дона (Ханой, Вьетнам). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокация; вторичная и третичная обработка радиолокационной информации.

Адрес: Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, ул. Хоанг Куок Вьет, д. 236, район Бак Ты Лиём, Ханой, Вьетнам
E-mail: daolucvtl01@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8006-3076>

References

1. Bar-Shalom Y., Li X. R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation. New York, Wiley & Sons, 2001, 558 p.
2. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Part V: Multiple-Model Methods. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2005, vol. 41, no. 4, pp. 1255–1321. doi: 10.1109/TAES.2005.1561886
3. Ryazantsev L. B. Multiple-Model Bayesian Estimation of the Maneuvering Aerial Target State Vector in Discrete Time. Transactions TSTU. 2009, no. 4, pp. 729–739. (In Russ.)
4. Blom H. A. P., Bar-Shalom Y. The Interacting Multiple Model Algorithm for Systems with Markovian Switching Coefficients. IEEE Transactions on Automatic Control. 1988, vol. 33, no. 8, pp. 780–783. doi: 10.1109/9.1299
5. Li X. R., Bar-Shalom Y. Design of an Interacting Multiple Model Algorithm for Air Traffic Control Tracking. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 1993, vol. 1, no. 3, pp. 186–194. doi: 10.1109/87.251886
6. Bakulev P. A., Sychev M. I., Lyu N. Ch. Maneuvering Target Tracking Using an Interactive Multiple Model Algorithm. *Trudy MAI*. Electronic J. 2002, no. 9, pp. 1–8. (In Russ.)
7. Li X. R., Bar-Shalom Y. Mode-Set Adaptation in Multiple-Model Estimators for Hybrid Systems. Proc. of the 32nd Conf. on Decision and Control. San Antonio, Texas, Dec. 1992, pp. 1794–1799. doi: 10.23919/ACC.1992.4792420
8. Munir A., Atherton D. P. Adaptive Interacting Multiple Model Algorithm for Tracking a Manoeuvring Target. IEE Proc. on Radar, Sonar and Navigation. 1995, vol. 142, no. 1, pp. 11–17. doi: 10.1049/ip-rsn:19951528
9. Li X. R. Engineer's Guide to Variable-Structure Multiple-Model Estimation for Tracking. Multitarget-Multisensor Tracking: Applications and Advances. Vol. III. Boston, Artech House, 2000, pp. 499–567.
10. Jilkov V. P., Angelova D. S., Semerdjiev T. A. Design and Comparison Of Mode-Set Adaptive IMM Algorithms for Maneuvering Target Tracking. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1999, vol. 35, no. 1, pp. 343–350. doi: 10.1109/7.745704
11. Zhu Zw. Shipborne Radar Maneuvering Target Tracking Based on the Variable Structure Adaptive Grid Interacting Multiple Model. J. Zhejiang Univ. Sci. C. 2013, no. 14, pp. 733–742. doi: 10.1631/jzus.C1200335
12. Li X. R., Zhang Y. M., Zhi X. R. Multiple-Model Estimation with Variable Structure. Part IV: Design and Evaluation of Model-Group Switching Algorithm. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1999, vol. 35, no. 1, pp. 242–254. doi: 10.1109/7.745695
13. Jilkov V. P., Angelova D. S., Semerdjiev Tz. A. Design and Comparison of Mode-Set Adaptive IMM Algorithms for Maneuvering Target Tracking. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1999, vol. 35, no. 1, pp. 343–350. doi: 10.1109/7.745704
14. Sun H.-M. Adaptive Filtering Techniques in Radar Tracking System with Variable-Structured Multiple-Model Estimator. J. of C.C.I.T. 2005, no. 2, pp. 27–45.
15. Li X. R., Zhao, Li X.-B. General Model-Set Design Methods for Multiple-Model Approach. IEEE

Сопровождение маневрирующих целей с использованием
многомодельного алгоритма с переменной структурой
Tracking of Maneuvering Targets Using a Variable Structure Multiple Model Algorithm

Trans. on Automatic Control. 2005, vol. 50, no. 9, pp. 1260–1276. doi: 10.1109/TAC.2005.854581

get Tracking]. Part II. SPb, LETI Publishers, 2014, 180 p. (In Russ.)

16. Konovalov A. A. *Osnovy traektornoy obrabotki radiolokatsyonnoy informatsii* [Basic of the Radar Tar-

Information about the authors

Le Minh Hoang, Specialist in "Radioelectronic Systems and Complexes", Postgraduate student of Le Quy Don Technical University (Hanoi, Vietnam). The author of 2 scientific publications. Area of expertise: radiolocation; secondary and tertiary processing of radar information.

Address: Le Quy Don Technical University, 236, Hoang Quoc Viet St., Bac Tu Liem, Ha Noi, Viet Nam

E-mail: lehoang.navy@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8913-3296>

Aleksandr A. Konovalov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of Research Institute "Prognoz" of Saint Petersburg State Electrotechnical University. The author more than 60 scientific publications. Area of expertise: target tracking; data fusion; passive bistatic radars; multi-position radars.

Address: Research Institute "Prognoz", 5 F Professor Popov St., St Petersburg 197002, Russia

E-mail: al an kon@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0004-1943-5394>

Dao Van Luc, Specialist in "Radioelectronic systems and complexes", Postgraduate student of Le Quy Don Technical University (Hanoi, Vietnam). The author of 2 scientific publications. Area of expertise: radiolocation; secondary and tertiary processing of radar information.

Address: Le Quy Don Technical University, 236, Hoang Quoc Viet St., Bac Tu Liem, Ha Noi, Viet Nam

E-mail: daolucvtl01@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8006-3076>
