

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ СОПРОВОЖДЕНИЯ
ВЫСОКОДИНАМИЧЕСКИХ АЭРОБАЛЛИСТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
НА ОСНОВЕ ОЦЕНОК ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ**

Н. А. ХОДАТАЕВ, А. В. ТИМОШЕНКО, А. М. КАЗАНЦЕВ, А. Е. СКОСАРЕНКО*

*Радиотехнический институт им. акад. А. Л. Минца,
Москва, Россия
a.e.skosarenko@mail.ru

Аннотация. Рассматривается задача обеспечения своевременного и эффективного обнаружения и сопровождения высокодинамических аэробаллистических объектов (ВАО). Для повышения точности сопровождения объектов наземными сенсорами предложен новый метод агрегирования прогностических оценок траектории движения ВАО и шумов измерений с использованием ансамблевого фильтра Калмана, который реализует метод аппроксимации с помощью кубической сплайн-интерполяции в совокупности с прогнозированием временных последовательностей. Этот подход позволяет более точно предсказывать траекторию ВАО на нелинейных участках движения и значительно улучшает сопровождение цели наземными сенсорами. Для подтверждения эффективности предлагаемого подхода разработана математическая модель системы наблюдения и проведена оценка эффективности применения ансамблевого фильтра Калмана для сопровождения ВАО по сравнению с обычным фильтром Калмана.

Ключевые слова: наземный сенсор, сопровождение, высокодинамический аэробаллистический объект, аналитическая модель, траектория движения, ансамблевый фильтр Калмана

Ссылка для цитирования: Ходатаев Н. А., Тимошенко А. В., Казанцев А. М., Скосаренко А. Е. Интеллектуальный алгоритм сопровождения высокодинамических аэробаллистических объектов на основе оценок траектории движения // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 1. С. 20—32. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-1-20-32.

**INTELLIGENT ALGORITHM FOR TRACKING
HIGHLY DYNAMIC AEROBALLISTIC OBJECTS
BASED ON MOTION TRAJECTORY ESTIMATES**

N. A. Khodataev, A. V. Timoshenko, A. M. Kazantsev, A. E. Skosarenko*

*Academician A. L. Mints Radiotechnical Institute,
Moscow, Russia
a.e.skosarenko@mail.ru

Abstract. The problem of ensuring timely and effective detection and tracking of highly dynamic aeroballistic objects (HDAO) is considered. To improve the accuracy of object tracking by ground-based sensors, a new method is proposed for aggregating predictive estimates of the HDAO trajectory and measurement noise using an ensemble Kalman filter, which implements an approximation using cubic spline interpolation in conjunction with forecasting time sequences. This approach makes it possible to more accurately predict the trajectory of HDAO in nonlinear sections of motion and significantly improves target tracking by ground-based sensors. To confirm the effectiveness of the proposed approach, a mathematical model of the observation system is developed, and the effectiveness of using an ensemble Kalman filter for tracking HDAO is assessed in comparison with a conventional Kalman filter.

Keywords: ground sensor, tracking, highly dynamic aeroballistic object, analytical model, motion trajectory, ensemble Kalman filter

For citation: Khodataev N. A., Timoshenko A. V., Kazantsev A. M., Skosarenko A. E. Intelligent algorithm for tracking highly dynamic aeroballistic objects based on motion trajectory estimates. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 1. P. 20—32 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-1-20-32.

Введение. В настоящее время в США реализуется ряд проектов по разработке и проведению обширных экспериментальных исследований высокодинамических аэробаллистических объектов (ВАО), а также разрабатываются принципы их применения [1—5].

ВАО обладают высокой скоростью и маневренностью, могут иметь как аэродинамические, так и баллистические участки с выходом в космическое пространство. Кроме того, влияние плазмы, образующейся во время полета ВАО, вносит дополнительные трудности при их обнаружении и сопровождении, а также при обработке траекторных данных наземными сенсорами. Эти особенности определяют необходимость разработки эффективных методов прогнозирования траектории ВАО.

Высота полета ВАО составляет десятки километров и существенно различается на разных этапах (фазах) полета. На рис. 1 приведена модель траектории полета ВАО с борта самолета, где выделены шесть фаз полета: 1 — разгон с использованием ракетного усилителя, 2 — полет по баллистической траектории, 3 — вход в атмосферу, 4 — кабрирование, 5 — равновесное планирование, 6 — поражение цели. На первом этапе с помощью ракетного усилителя осуществляется разгон ВАО до гиперзвуковой скорости с набором высоты до $h = 90 \dots 120$ км. После этого происходит отделение полезной нагрузки от ракеты, начинается пикирование до интервала высот 30—50 км, далее полет продолжается с планированием на этих высотах и на конечном этапе с высоты 20—30 км почти вертикально ВАО поражает цель. Благодаря специальной аэродинамической форме корпуса ВАО летит на примерно постоянной высоте, совершая маневры в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

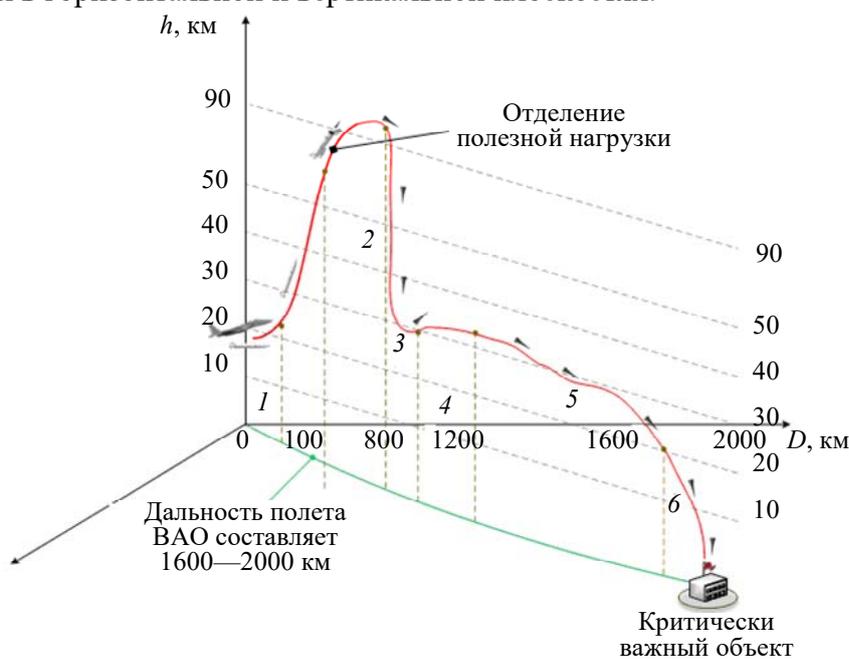


Рис. 1

ВАО являются маневрирующими целями и траектории их полета существенно отличаются от баллистических. Дополнительно для обнаружения ВАО необходимо учитывать атмосферную селекцию, что затрудняет обнаружение и сопровождение объектов, а также обработку траекторных данных наземными сенсорами (здесь под наземными сенсорами понимаются радиолокационные станции дальнего обнаружения). При этом в работе современных наземных сенсоров используются две группы признаков атмосферной селекции:

— признаки, связанные с изменением характера движения тел при входе в атмосферу и закономерностями их движения в атмосфере;

— признаки, связанные с изменением радиофизических характеристик среды вокруг движущегося в атмосфере тела и использующие радиотехнические характеристики сигнала,

отраженного от вызванных этими изменениями плазменных образований (плазменной оболочки спутного следа) [6].

При построении траектории полета ВАО имеет место априорная неопределенность относительно как типа траектории, так и ее параметров. Априорная неопределенность относительно траектории полета ВАО обусловлена многообразием вариантов его траекторий, каждый из которых существенно отличается от баллистических траекторий и траекторий прямолинейного движения. На рис. 2 продемонстрирован набор из восьми возможных вариантов траекторий ВАО в одном пуске с различными по сложности маневрами [7].

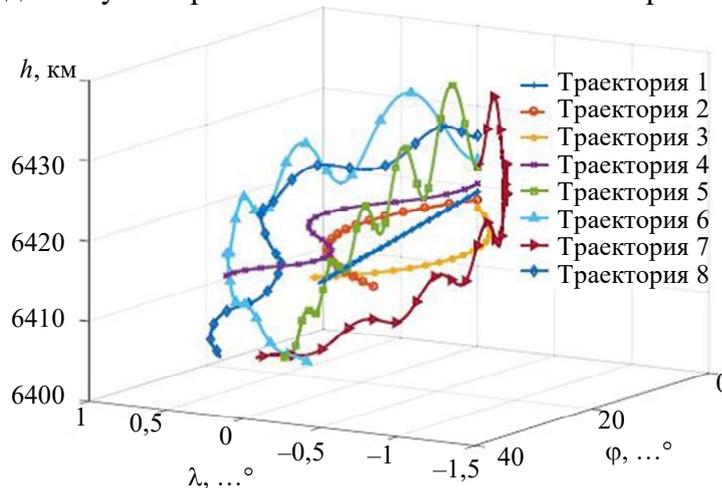


Рис. 2

Таким образом, появление таких новых типов целей, как ВАО, требует совершенствования существующих комплексных алгоритмов системы наблюдения наземных сенсоров — создания и внедрения новых методов и алгоритмов обработки результатов радиолокационных измерений, учитывающих особенности траекторий и динамики движения ВАО. В рамках статьи под системой наблюдения понимается функциональный блок траекторной обработки наземного сенсора.

Анализ возможностей наземных сенсоров по сопровождению ВАО. Для разработки алгоритмов сопровождения ВАО наземными сенсорами и последующего прогнозирования траектории необходимо создание динамической модели полета. Траектория, построенная при сопровождении цели, представляет собой множество прогнозируемых точек пространственного положения цели, разнесенных по времени. При этом прогностическая траектория соответствует некоторой модели движения цели, построенной по результатам ее сопровождения (опорной траектории), и адекватной ей библиотеке траекторий.

Основным классическим алгоритмом обнаружения и сопровождения радиолокационных целей, реализуемым в современных наземных сенсорах, является фильтр Калмана (ФК) [8—10]. ФК основан на теории оптимального оценивания и статистической фильтрации и предполагает обнаружение цели при ее прохождении через барьерную зону с подтверждением обнаружения цели по критерию „ m из n “ и передачу ее на сопровождение. При каждом облучении цели выполняется прогноз ее положения к моменту следующего облучения и т.д. — до получения необходимого числа опорных точек для построения траектории либо до выхода траектории из сектора обзора. При этом классический алгоритм адаптирован для обработки результатов измерений сенсором и рассчитан на работу с радиолокационными движущимися по баллистическим траекториям целями, параметры которых уточняются в процессе их сопровождения. Для небаллистических траекторий алгоритм ФК требует дополнительных корректировок и исследований, в том числе с учетом признаков атмосферной селекции. В частности, необходимо рассматривать системные ошибки (медианное значение медленно меняю-

щейся ошибки по дальности, азимуту и углу места, период медленно меняющейся ошибки, средний уровень мощности шума в условиях неопределенности при срыве сопровождения).

На рис. 3 [11] представлен принцип функционирования стандартного ФК.



Рис. 3

В качестве начальных параметров приняты: \hat{x}_{k-1} — состояния системы в предыдущий момент времени; P_k^- — предсказание ошибки измерений.

Стандартный ФК в каждый момент времени:

- 1) вычисляет предсказания системы наблюдения, которые основываются на следующем: — предсказании состояния системы наблюдения:

$$\hat{x}_k = F\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1},$$

где F — матрица перехода между состояниями (динамическая модель системы), B — матрица применения управляющего воздействия, u_{k-1} — управляющее воздействие в предыдущий момент времени;

- предсказании ошибки ковариации:

$$P_k^- = FP_{k-1}F^T + Q,$$

где P_{k-1} — ошибка в предыдущий момент времени, Q — матрица ковариации шума системы;

- 2) осуществляет корректировку (обновление) состояния системы наблюдения за счет следующих действий:

- вычисления калмановского коэффициента усиления:

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1},$$

где H — матрица измерений, отражающая соотношение результатов измерений и показателей состояний системы, R — матрица ковариации шума измерений;

- обновления оценки с учетом измерений в текущий момент времени z_k :

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-);$$

- обновления ошибки ковариации:

$$P_k = (I - K_k H)P_k^- ,$$

где I — матрица единичной размерности.

Одним из существенных упрощений в современных наземных сенсорах, закладываемых в ФК, является предположение о линейном характере уравнений движения и наблюдения: при использовании линейных преобразований нормально распределенной случайной величины

результатирующее распределение представляет собой нормальное распределение или пропорционально ему. На практике часто возможны ситуации, когда эти уравнения нелинейны: например, нелинейны модели движения целей или нелинейностью характеризуется процесс преобразования координат при больших погрешностях измерений угловых параметров. Кроме того, неправильно выбранные начальные значения, характеризующие состояние системы наблюдения, и ковариации ошибки измерений могут привести к долговременным искажениям оценки и прогноза положения цели.

Проблема прогнозирования нелинейных участков траекторий целей заключается в том, что в определенные моменты времени траектория, соответствующая модели движения, построенной при предшествующем сопровождении цели, изменяется вследствие проведения целью маневра [12]. Это приводит к необходимости построения при последующем сопровождении цели новой модели ее движения и ее прогностической траектории. При этом существенно расширяется набор модельных (опорных) траекторий, который должен быть представлен в используемой библиотеке траекторий. На рис. 4 показаны примеры прогнозирования траекторий ВАО по высоте полета и геодезическим координатам трассы за время наблюдения 0,5 с при соответствующем количестве измерений (N) [6]. Возможны траектории полета, для которых имеет место существенное ухудшение точности прогноза по высоте (а), по координатам (б), а также и по высоте, и по координатам (в).

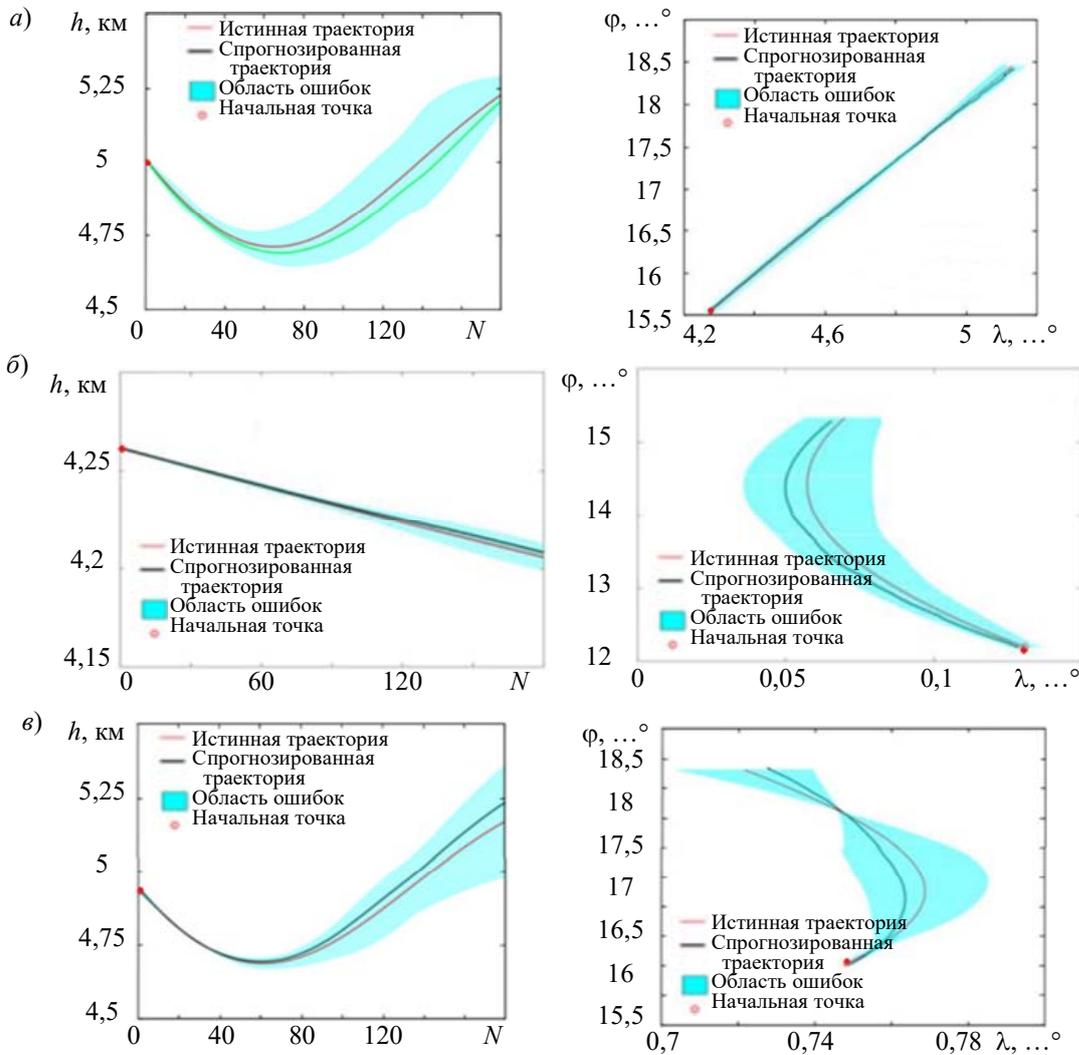


Рис. 4

В результате при наличии нелинейных зависимостей в уравнениях состояния целей, таких как ВАО, явным образом ФК использовать нельзя. Данное обстоятельство обуславливает необходимость совершенствования алгоритмов фильтрации в отношении точности сопровождения объектов в условиях их сложной динамики и ограниченной доступности информации.

Ансамблевый фильтр Калмана. Одним из направлений совершенствования алгоритмов фильтрации является использование ансамблевого фильтра Калмана (АФК) и подход к управлению его параметрами. АФК представляет собой адаптивный метод оценивания состояния объекта, который основывается на измерительной информации и модели объекта [13—16]. В отличие от классического ФК, который оперирует одним набором параметров, АФК использует множество ансамблей (подмножеств) параметров, что позволяет более гибко учитывать различные варианты динамики объекта. Основными операциями алгоритма АФК являются:

- 1) прогнозирование положения цели к моменту следующего облучения:
 - каждый элемент ансамбля предсказывается независимо с помощью модели системы наблюдения и шума измерений;
 - модель системы описывается нелинейными функциями перехода состояний;
 - на каждом временном шаге ансамбль состояний предсказывается с учетом случайного шума;
- 2) уточнение параметров системы наблюдения и признаков атмосферной селекции и эффективной площади рассеяния ВАО:
 - выполняются новые измерения системы наблюдения;
 - каждый элемент ансамбля корректируется на основе нового измерения;
 - калмановский коэффициент вычисляется для каждого элемента ансамбля с учетом соответствия между прогнозом и измерениями;
 - оценка состояния системы корректируется на основе нового измерения и калмановского коэффициента;
- 3) обновление ансамбля параметров системы наблюдения;
- 4) применение методов интерполяции и экстраполяции, таких как кубические сплайны, для получения оценок состояния системы наблюдения в промежуточные моменты времени.

Перечисленные операции повторяются для каждого временного шага, обновляя состояние системы с учетом новых измерений и прогнозов. При этом управление параметрами ансамблевого фильтра позволяет:

- максимизировать точность оценок состояния объекта в реальном времени, используя оригинальные методы управления;
- обеспечить устойчивость работы фильтра в условиях внешних возмущений и ограниченной информации о состоянии цели, а также в случае выбросов в измерениях;
- обеспечить эффективную работу в условиях быстрой и нелинейной динамики объекта.

С учетом вышесказанного в данной статье рассматривается следующая **гипотеза**: путем динамической настройки параметров ФК с использованием прогноза траекторных характеристик объекта наблюдения можно существенно повысить точность сопровождения ВАО и уменьшить затраты ресурсов наземного сенсора на их сопровождение.

Для подтверждения этой гипотезы предложена аналитическая модель системы наблюдения за ВАО, основанная на АФК. Схема модели показана на рис. 5.



Рис. 5

Аналитическая модель состояния системы сопровождения на основе АФК с использованием априорной информации в заданный момент времени описывается следующим образом.

1. Инициализация начального состояния системы x_0 , ковариационной матрицы ошибки P_0 (ковариация ошибки состояния), ансамбля состояний системы X_0 и ансамбля шумов измерений ε_0 :

$$X_{00}^{(i)}, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad P_{00}^{(i)}, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

где $P_{00}^{(i)}$ — матрица ковариации, характеризующая неопределенность начального состояния системы; $X_{00}^{(i)}$ — набор случайных „пробных“ значений, представляющих неопределенность начального состояния системы (в ансамбль могут входить случайно сгенерированные значения, распределенные вокруг начальных состояний); N — размер ансамбля состояний; x_0 — вектор, содержащий предполагаемые или известные начальные значения координат, скорости и ускорения ВАО; ε_0 — набор случайных значений, характеризующих шум и представляющих неопределенность измерений, возникающий, например, из-за неточности датчиков; ансамбль шумов ε_0 формируется с учетом этой неопределенности в измерениях.

2. Предсказания системы.

а) Вычисление предсказания состояния для каждого ансамбля:

$$X_{k|k-1}^{(i)} = F \cdot X_{k-1|k-1}^{(i)} + B \cdot u_k + \eta_k^{(i)},$$

где F — матрица предсказания системы (матрица перехода между состояниями); B — матрица управляющего воздействия; u_k — вектор управляющего воздействия; $\eta_k^{(i)}$ — случайный шум, моделирующий ошибку предсказания для i -го ансамбля состояний.

б) Вычисление предсказания ковариации ошибки состояния:

$$P_{k|k-1}^{(i)} = F \cdot P_{k-1|k-1}^{(i)} \cdot F^T + Q^i,$$

где Q^i — матрица ковариации шума системы для i -го ансамбля состояний.

3. Корректировка (обновление) состояния системы наблюдения.

а) Вычисление калмановского коэффициента усиления для каждого элемента ансамбля:

$$\mathbf{K}_{k|k}^{(i)} = \mathbf{P}_{k|k-1}^{(i)} \cdot \mathbf{H}^T \cdot \left(\mathbf{H} \cdot \mathbf{P}_{k-1|k-1}^{(i)} \cdot \mathbf{H}^T + \mathbf{R} \right)^{-1},$$

где \mathbf{H} — матрица измерений, \mathbf{R} — матрица ковариации шума измерений.

б) Обновление оценки состояния:

$$\mathbf{X}_{k|k}^{(i)} = \mathbf{X}_{k|k-1}^{(i)} + \mathbf{K}_{k|k}^{(i)} \cdot \left(\mathbf{Z}_k - \mathbf{H} \cdot \mathbf{X}_{k|k-1}^{(i)} \right),$$

где \mathbf{Z}_k — вектор измерений.

в) Обновление ковариации ошибки состояния:

$$\mathbf{P}_{k|k}^{(i)} = \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k|k}^{(i)} \cdot \mathbf{H} \right) \cdot \mathbf{P}_{k|k-1}^{(i)},$$

где \mathbf{I} — единичная матрица.

4. Формирование нового ансамбля состояний и ковариации ошибки состояния:

$$\mathbf{X}_{k|k}^{(i)} \sim N \left(\mathbf{X}_{k|k}^{(i)}, \mathbf{P}_{k|k}^{(i)} \right) \mathbf{X}_{k|k}^{(i)}, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

$$\mathbf{P}_{k|k}^{(i)} = \mathbf{P}_{k|k}^{(i)} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{P}_{k|k}^{(i)}.$$

5. Возврат к шагу 2 или вывод результатов:

— если имеются дополнительные измерения, возврат к шагу 2 и продолжение обновления и предсказания состояния системы;

— если достигнуто предельное время сопровождения ВАО, вывод оценки состояния системы \mathbf{X} и соответствующей ковариации ошибки \mathbf{P} .

В результате предложенная аналитическая модель за счет анализа ансамблевых прогнозов состояния и измерений системы позволяет оптимальным образом оценивать траекторные характеристики ВАО, учитывать различные формы шума, неопределенность и стохастичность процессов сопровождения объекта, что, в свою очередь, повышает надежность прогнозирования и устойчивость системы к помехам.

Результаты моделирования. При реализации АФК в аналитической модели системы наблюдения сенсора используются следующие допущения:

— для имитации траектории ВАО предполагается частичная нелинейность системы, при этом шум измерений и процесса сопровождения цели предполагается гауссовым;

— ковариации шумов измерений и процесса сопровождения задаются вручную;

— учитываются данные результатов моделирования эффективной площади рассеяния плазменной оболочки ВАО [6];

— для обновления состояния системы (коррекция) и прогноза следующего ее состояния используются линейные уравнения;

— данные моделирования не содержат значительных выбросов;

— задаются начальные условия:

- временной шаг между измерениями задается равным 0,01 с;

- используется стандартное отклонение шума измерения;

- задается количество измерений (длина массивов измерений) — 640;

- нулевое начальное состояние ковариационной матрицы шума процесса сопровождения задается с единичной матрицей;

- нулевое начальное состояние ковариационной матрицы шума измерений задается с единичной матрицей;

- матрица управления задается единичной (в рамках настоящей статьи данный параметр не рассматривается);

- параметры амплитуды, частоты, фазы для каждой из характеристик (азимут, угол места и высота) инициализируются постоянными значениями.

Оценка эффективности применения АФК (на рисунках — EnKF) для сопровождения ВАО по сравнению с обычным ФК (на рисунках — RKF) по результатам моделирования системы наблюдения представлена рис. 6—8: на рис. 6 — сравнение оценок эффективности фильтров RKF и EnKF для параметров сенсора: азимут (α), высота (h), угол места (β), а также среднеквадратическая ошибка (СКО) данных фильтров на нелинейных участках траектории ВАО; на рис. 7 — отклонение траектории движения ВАО от истинных значений при оценке фильтрами RKF и EnKF для параметров α , h , β ; на рис. 8 — отклонения оценок от истинных значений траектории для параметров α , h , β .

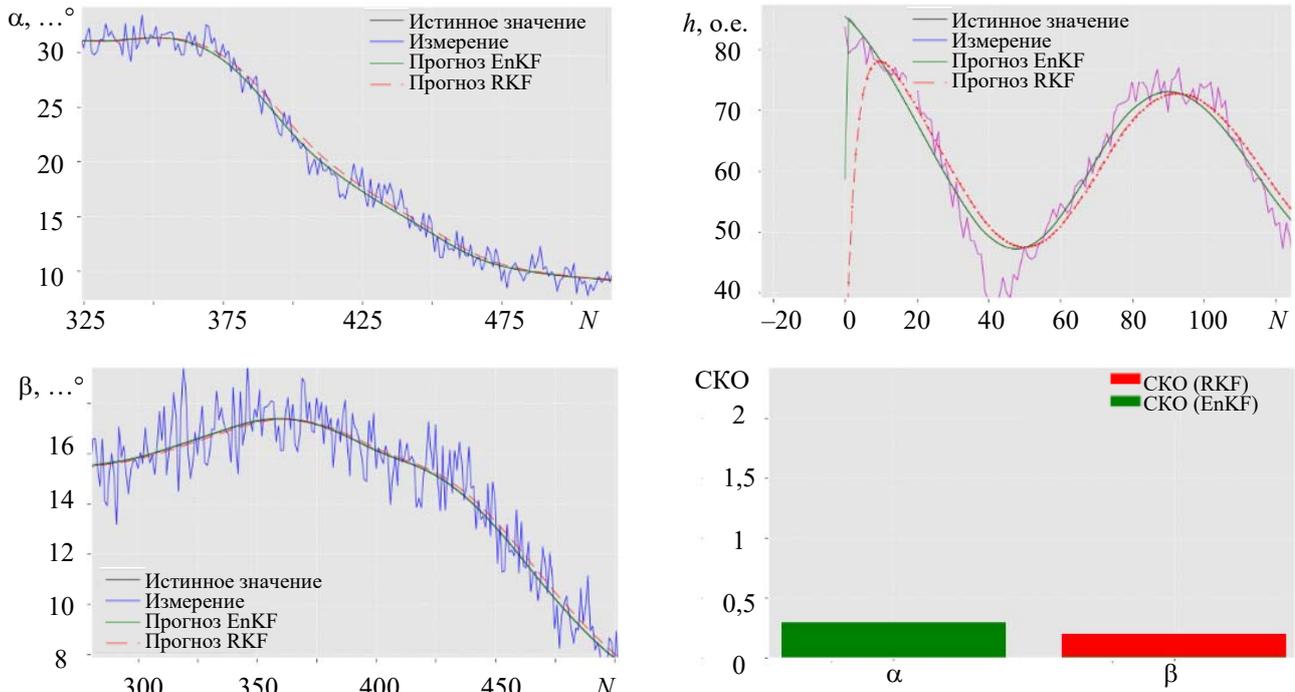


Рис. 6

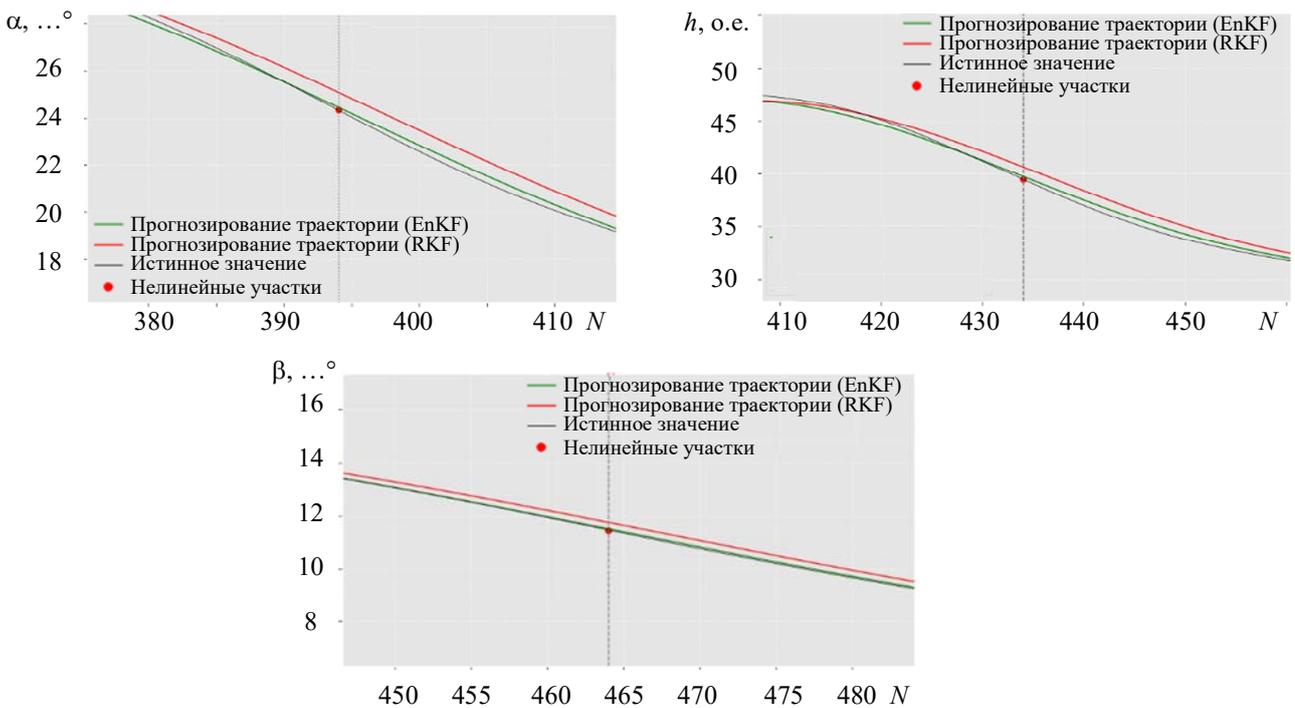


Рис. 7

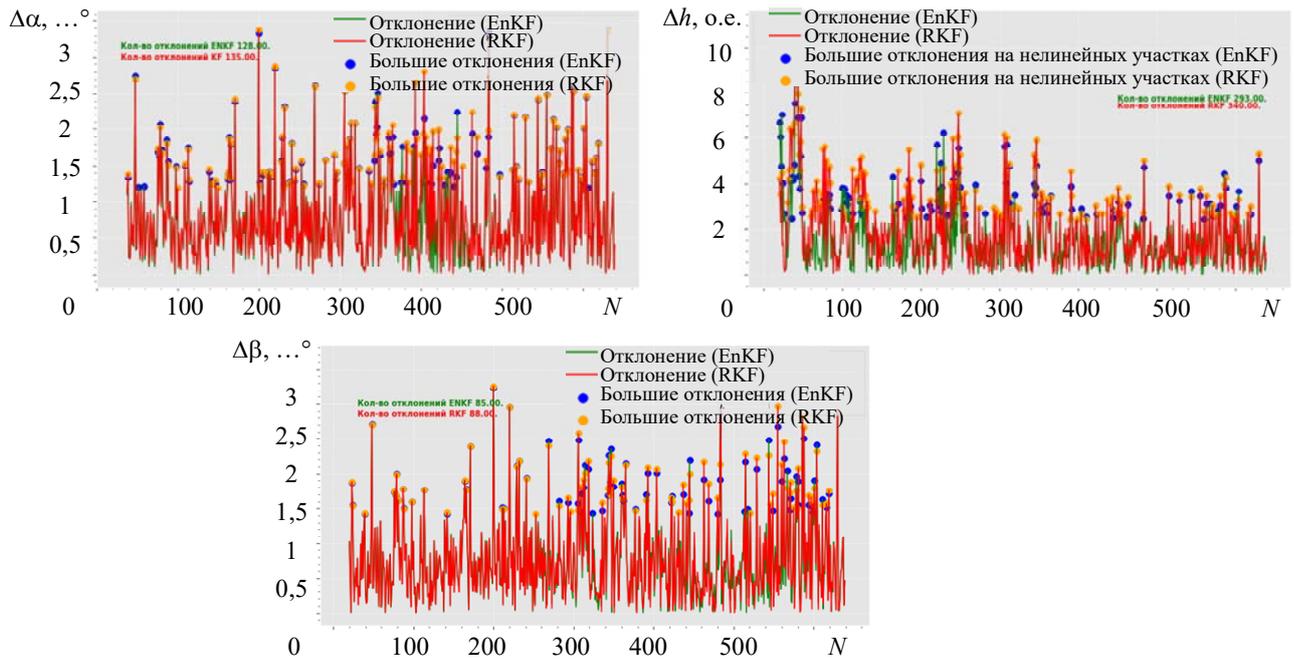


Рис. 8

Анализ устойчивости фильтра к выбросам позволяет определить его способность обрабатывать некорректные измерения, а также оценить, какую степень выбросов он способен обнаруживать и корректировать без существенного искажения результатов. Для проверки устойчивости фильтров к выбросам (аномалии шума) проведено их моделирование. На рис. 9 представлен обобщенный график сравнения калмановских фильтров при выбросах (аномалии, с увеличенной амплитудой шума в 2,5 раза) по всем трем параметрам измерений; по ординате — количество отклонений на нелинейных участках (M).

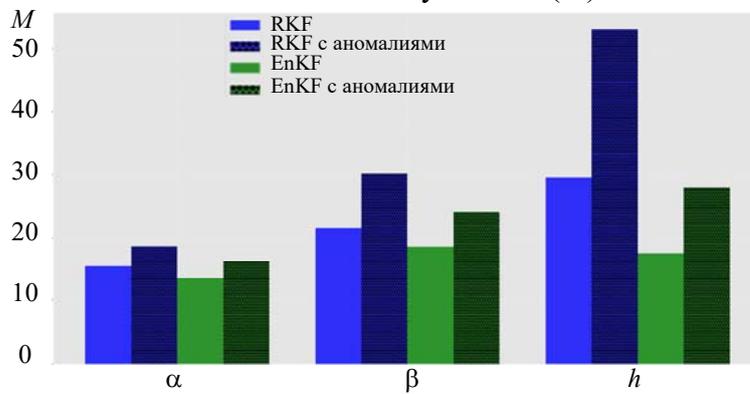


Рис. 9

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. Оба фильтра, как ФК, так и АФК, успешно сглаживают измерения, приближая оценки к истинному значению траектории ВАО. Однако АФК предоставляет более гладкие оценки, особенно на нелинейных участках траектории, так как данный фильтр использует множество возможных состояний системы, что позволяет лучше улавливать динамику изменения траектории ВАО и уменьшать влияние случайных шумов или ошибок измерения на итоговые оценки.

2. На нелинейных участках траекторий (например, на участке с большой амплитудой синусоидальной составляющей) АФК показывает более точные оценки и менее подвержен влиянию нелинейности, чем ФК. Это связано с использованием данным фильтром ансамбля состояний, что позволяет лучше определять нелинейные зависимости и учитывать неопределенность в системе.

3. АФК проявляет лучшие предсказательные характеристики на участках траектории ВАО при ограниченном количестве данных или при работе с неполными наборами измерений. Это обстоятельство связано с тем, что ансамблевый фильтр учитывает распределение состояний системы на каждом временном шаге и может компенсировать отсутствие измерений, используя информацию из ансамбля состояний системы.

4. АФК обладает определенной степенью устойчивости к выбросам (в том числе, и в условиях оболочки плазмы) в измерениях благодаря использованию ансамбля состояний. Причина этой устойчивости связана с тем, что АФК учитывает разнообразие возможных состояний системы, и выбросы в одном измерении не влияют на ансамбль состояний. Это свойство делает АФК более устойчивым к шумам и выбросам, что способствует более надежной фильтрации в реальных условиях. Однако в зависимости от уровня шума и даже при некоторых выбросах ФК также может работать достаточно хорошо, особенно если шум незначительный или имеется механизм коррекции, который способен скомпенсировать выбросы.

Таким образом, АФК обладает рядом преимуществ по сравнению с обычным ФК. Эти преимущества обуславливают предпочтительность выбора АФК при работе с реальными системами, где необходимо учитывать шумы, неопределенность и нелинейности для получения более точных и надежных оценок состояния.

Заключение. При работе с высокодинамичными аэробаллистическими объектами используемые в существующих наземных сенсорах алгоритмы обнаружения и сопровождения воздушно-космических целей могут оказаться неэффективными. Это связано с ограничениями при обработке принимаемых сигналов (радиолокационной информации): существующие алгоритмы рассчитаны на работу с целями, движущимися с меньшими, чем ВАО, скоростями и по баллистическим траекториям. Кроме того, низкая высота и нелинейность траектории полета ВАО существенно уменьшают время радиолокационного контакта, необходимого для его обнаружения и сопровождения.

Для повышения точности сопровождения ВАО наземными сенсорами предложен новый метод агрегирования прогностических оценок траектории его движения и шумов измерений с использованием АФК.

Выдвинута гипотеза, что путем динамической настройки параметров АФК можно повысить точность сопровождения ВАО и уменьшить затраты ресурсов сенсора на его сопровождение. Для подтверждения гипотезы разработана аналитическая модель системы наблюдения и проведена оценка эффективности применения АФК для сопровождения ВАО по сравнению с обычным ФК.

Полученные результаты, продемонстрировавшие преимущество АФК при работе по ВАО на нелинейных участках его траектории, позволяют сформулировать направления дальнейших исследований — разработка алгоритмов управления параметрами АФК в реальном времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сарычев М., Баширов Н., Новикова Д. Основные программы разработки гиперзвукового оружия в вооруженных силах США // Зарубежное военное обозрение. 2021. № 9. С. 28—34.
2. Тимошенко А. В., Клименко В. М., Балдычев М. Т., Ромахин В. А., Омельшин А. А. Основные результаты реализации программ по разработке гиперзвукового оружия в США // Вестн. воздушно-космической обороны. 2022. № 2(34). С. 118—131.
3. Ermakov A. Military hypersonic technology in the US // New Defense Order. Strategy. 2020. N 5. P. 70—77.
4. Mizokami K. Say Hello to „Dark Eagle“ the Army’s New Hypersonic Weapon // Popular Mechanics. [Электронный ресурс]: <<https://www.popularmechanics.com/military/weapons/a37284902/army-hypersonic-missile-dark-eagle>>.

5. Saylor K. M. Hypersonic Weapons: Background and Issues for Congress // Congressional Research Service [Электронный ресурс]: <<https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R45811>>, 10.11.21.
6. Маркова М. В., Сергунов К. Ю. Решение задачи селекции путем оценки эффективной площади рассеяния плазменной оболочки // Вестн. Концерна ВКО „Алмаз — Антей“. 2017. № 2. С. 10—15.
7. Zhang J., Xiong J., Li L., Xi Q., Chen X., Li F. Motion State Recognition and Trajectory Prediction of Hypersonic Glide Vehicle Based on Deep Learning // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 21095—21108.
8. Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems // J. of Basic Engineering. 1960. Vol. 82. P. 35—45.
9. Kalman R. E., Bucy R. S. New results in linear filtering and prediction theory // J. of Basic Engineering. 1961. Vol. 83. P. 95—108.
10. Каплин А. Ю., Степанов М. Г., Ярмолич А. Г. Свойства фильтра Калмана в переходном режиме // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 4. С. 311—317.
11. Фильтр Калмана. Введение [Электронный ресурс]: <<https://habr.com/ru/articles/140274/>>.
12. Фисенко В. Т., Вилесов Л. Д., Можейко В. И., Фисенко Т. Ю. Обнаружение маневра объекта и прогнозирование его траектории в телевизионной следящей системе // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 8. С. 12—19.
13. Evensen G. The Ensemble Kalman Filter: theoretical formulation and practical implementation // Ocean Dynamics. 2003. Vol. 53. P. 343—367.
14. Katzfuss M., Stroudb J. R., Wiklec C. K. Understanding the Ensemble Kalman Filter // The American Statistician. 2016. Vol. 70, N 4. P. 350—357.
15. Mandel J., Cobb L., Beezley J. D. On the Convergence of the Ensemble Kalman Filter // Appl. Math. (Prague). 2011. Vol. 56(6). P. 533—541.
16. Климова Е. Г. Стохастический ансамблевый фильтр Калмана с трансформацией ансамбля возмущений // Сиб. журн. вычисл. математики / РАН. 2019. Т. 22, № 1. С. 27—40.

Сведения об авторах

- Николай Андреевич Ходатаев** — Радиотехнический институт им. акад. А. Л. Минца, научно-технический центр программно-алгоритмического обеспечения; директор Центра
- Александр Васильевич Тимошенко** — д-р техн. наук, профессор; Радиотехнический институт им. акад. А. Л. Минца, комплексный отдел управления разработками; начальник отдела
- Андрей Михайлович Казанцев** — канд. техн. наук; Радиотехнический институт им. акад. А. Л. Минца, сектор перспективных разработок; ведущий инженер; E-mail: kazantsev.andrei@gmail.com
- Антон Евгеньевич Скосаренко** — Радиотехнический институт им. акад. А. Л. Минца, отдел руководителей программных продуктов; руководитель разработки программного обеспечения; E-mail: a.e.skosarenko@mail.ru

Поступила в редакцию 04.09.2023; одобрена после рецензирования 13.09.2023; принята к публикации 14.11.2023.

REFERENCES

1. Sarychev M., Bashirov N., Novikova D. *Zarubezhnoye voyennoye obozreniye*, 2021, no. 9, pp. 28—34. (in Russ.)
2. Timoshenko A.V., Klimenko V.M., Baldychev M.T., Romakhin V.A., Omel'shin A.A. *Vestnik vozdušno-kosmicheskoy oborony*, 2022, no. 2(34), pp. 118—131. (in Russ.)
3. Ermakov A. *New Defense order. Strategy*, 2020, no. 5, pp. 70—77.
4. Mizokami K. Say Hello to "Dark Eagle" the Army's New Hypersonic Weapon, <https://www.popularmechanics.com/military/weapons/a37284902/army-hypersonic-missile-dark-eagle>.
5. Saylor K.M. *Hypersonic Weapons: Background and Issues for Congress*, <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R45811>.
6. Markova M.V., Sergunov K.Yu. *Vestnik Kontserna VKO "Almaz—Antey"*, 2017, no. 2, pp. 10—15. (in Russ.)
7. Zhang J., Xiong J., Li L., Xi Q., Chen X., Li F. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 21095—21108.
8. Kalman R.E. *J. of Basic Engineering*, 1960, vol. 82, pp. 35—45.
9. Kalman R.E., Bucy R.S. *J. of Basic Engineering*, 1961, vol. 83, pp. 95—108.

10. Kaplin A.Yu., Stepanov M.G., Yarmolich A.G. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, no. 4(60), pp. 311–317. (in Russ.)
11. <https://habr.com/ru/articles/140274/>. (in Russ.)
12. Fissenko V.T., Vilesov L.D., Mozheiko V.I., Fissenko T.Yu. *Journal of Instrument Engineering*, 2009, no. 8(52), pp. 12–19. (in Russ.)
13. Evensen G. *Ocean Dynamics*, 2003, vol. 53, pp. 343–367.
14. Katzfuss M., Stroudb J.R., Wiklec C.K. *The American Statistician*, 2016, no. 4(70), pp. 350–357.
15. Mandel J., Cobb L., Beezley J.D. *Appl. Math. (Prague)*, 2011, no. 6(56), pp. 533–541.
16. Klimova E.G. *Numerical Analysis and Applications*, 2019, no. 1(22), pp. 26–36. (in Russ.)

Data on authors

- | | |
|--------------------------------|--|
| Nikolay A. Khodataev | — Academician A. L. Mints Radiotechnical Institute, Scientific and Technical Center for Software and Algorithmic Support; Director of the Center |
| Alexander V. Timoshenko | — Dr. Sci., Professor; Academician A. L. Mints Radiotechnical Institute, Comprehensive Development Management Department; Head of the Department |
| Andrey M. Kazantsev | — PhD; Academician A. L. Mints Radiotechnical Institute, Advanced Development Sector; Leading Engineer; E-mail: kazantsev.andrei@gmail.com |
| Anton E. Skosarenko | — Academician A. L. Mints Radiotechnical Institute, Software Product Managers Department; Software Development Manager; E-mail: a.e.skosarenko@mail.ru |

Received 04.09.2023; approved after reviewing 13.09.2023; accepted for publication 14.11.2023.