

УДК 629.7.052;623.746.3

СИНТЕЗ АЛГОРИТМА КОМПЛЕКСНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ-РАСПОЗНАВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ

© 2024 г. А. В. Аврамов^{а,*}, В. Ю. Шишкин^б

^аВоенно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина,
ул. Старых Большевиков, 54а, Воронеж, 394064 Российская Федерация

^бМосковский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет),
Институтский пер., 9, Долгопрудный Московской обл., 141701 Российская Федерация

*E-mail: andry_a@inbox.ru

Поступила в редакцию 04.06.2024 г.

После доработки 04.06.2024 г.

Принята к публикации 15.06.2024 г.

Показано, что решение задачи обеспечения устойчивого и высокоточного сопровождения аэродинамических целей различных классов может быть получено путем синтеза алгоритма комплексного их сопровождения и распознавания, учитывающего их характерные признаки по результатам наблюдения разнородными источниками информации. Разработана совокупность взаимосвязанных алгоритмов, включающих алгоритм комплексной адаптивной фильтрации фазовых координат наблюдаемой цели, условный относительно ее динамических и сигнальных признаков, полученных по результатам наблюдений совокупности источников; алгоритм распознавания класса наблюдаемой цели по результатам оценки значений ее динамических и сигнальных признаков, а также условий оценки фазовых координат.

Ключевые слова: сопровождение, распознавание, комплексная адаптивная фильтрация, динамические признаки, сигнальные признаки, комплекс бортового оборудования, многодатчиковая среда, аэродинамические цели

DOI: 10.31857/S0033849424080061, EDN: NOMIGI

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность применения воздушных судов (ВС) во многом определяется степенью информационной осведомленности экипажа, формируемой источниками информации из состава комплекса бортового оборудования (КБО) воздушного судна (ВС) об объектах окружающего пространства, их пространственном положении и характеристиках принадлежности к определенному классу (типу) [1]. В качестве таких объектов могут рассматриваться пилотируемые и беспилотные летательные аппараты (БПЛА), ракеты, аэростаты, метеозонды и многие другие аэродинамические объекты, обладающие различающимися динамическими и маневренными способностями. Многообразие классов (типов) аэродинамических целей приводит к возникновению проблемы устойчивого и точного их сопровождения, проявляющейся в срывах их сопровождения или больших ошибках фильтрации координат и параметров движения. Использование для сопровождения целей отдельных обособленных источников информации не обеспечивает достижение заданных требований.

Цель данной работы – описание синтеза алгоритма комплексного сопровождения и распознавания наблюдаемой цели на основе адаптивной фильтрации координат, а также параметров ее движения с учетом результатов распознавания ее класса по характерным признакам на основе наблюдений совокупности разнородных источников информации на борту воздушного судна, обеспечивающего ее устойчивое и высокоточное сопровождение.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИСХОДНЫЕ УСЛОВИЯ

Пусть в некоторой области пространства может находиться N целей, пространственное положение и перемещение которых в соответствующей системе координат в дискретный t_v -й момент времени определяются значениями некоторого набора параметров (фазовых координат), объединенных в вектор состояния вида $\mathbf{x}_{i,v} = \mathbf{x}_i(t_v)$, где i - индекс цели, $i = 1, N$.

Описание динамических свойств воздушных целей, как правило, осуществляется на основе кинематических моделей их пространственного

движения, представляемых марковскими процессами в дискретные моменты времени, в виде [2, 3]

$$\mathbf{x}_{i,v}(\boldsymbol{\alpha}) = \Phi(t_v, t_{v-1}, \boldsymbol{\alpha}) \mathbf{x}_{i,v-1}(\boldsymbol{\alpha}) + \mathbf{n}_{x,v}(\boldsymbol{\alpha}), \quad (1)$$

где $\mathbf{x}_{i,v}(\boldsymbol{\alpha})$ – вектор состояния, описывающий для i -й цели в дискретный момент времени t_v текущие значения ее координат пространственного положения, составляющих скорости и ускорения; $\boldsymbol{\alpha}$ – вектор параметров, описывающий интенсивность изменения фазовых координат i -й цели; $\Phi(t_v, t_{v-1}, \boldsymbol{\alpha})$ – фундаментальная матрица, описывающая динамические свойства i -й цели; $\mathbf{n}_{x,v}(\boldsymbol{\alpha})$ – вектор гауссовских случайных величин, описывающий флуктуации параметров вектора состояния во времени, с заданными статистическими характеристиками в виде математического ожидания и корреляционной матрицы шумов соответственно

$$M\{\mathbf{n}_{x,v}(\boldsymbol{\alpha})\} = 0,$$

$$M\{\mathbf{n}_{x,v}(\boldsymbol{\alpha}) \mathbf{n}_{x,v-1}(\boldsymbol{\alpha})^T\} = \Psi_v(\boldsymbol{\alpha}),$$

где символ « T » – операция транспонирования вектора.

Интенсивность изменения фазовых координат $\boldsymbol{\alpha}$ зависит от летно-технических характеристик и динамических свойств аэродинамических целей соответствующих классов [4], и, следовательно, выражение (1) описывает динамику изменения параметров вектора состояния $\mathbf{x}_{i,v}(\boldsymbol{\alpha}) = \mathbf{x}_i(t_v, \boldsymbol{\alpha})$ аэродинамической цели с учетом свойств ее класса.

Для оценки координат и характеристик пространственного перемещения целей на борту ВС может быть использована совокупность наблюдений разнородных источников информации, формирующая многодатчиковую информационную среду из K независимых источников [5]. В качестве таких источников в составе многодатчиковой среды могут рассматриваться бортовая радиолокационная система, оптико-электронная система, станция радиотехнической разведки и т.д. Результаты наблюдений таких систем в некоторый момент времени t_v представляют реализацию случайных величин в виде векторов

$$\xi_k(t_v) = \xi_{k,v}, \quad k = \overline{1, K}.$$

Совокупность наблюдений выбранных источников представляется в виде массива наблюдений

$$\{\xi_k(t_v), k = \overline{1, K}\} = \{\xi_{k,v}\}.$$

Способность разнородных источников определять амплитудные, поляризационные, спектральные характеристики отраженных сигналов обеспечивает выделение сигнальных признаков $\boldsymbol{\mu}(t_v) = \boldsymbol{\mu}_v$ наблюдаемой цели.

Совместное применение сигнальных $\boldsymbol{\mu}_v$ и динамических $\boldsymbol{\alpha}_v$ признаков является перспективным направлением развития систем распознавания [4, 6], поскольку создает избыточность информации о цели, что позволяет наиболее полно описать его класс. Совокупность значений динамических $\boldsymbol{\alpha}_v$ и сигнальных $\{\boldsymbol{\mu}_{k,v}, k = \overline{1, K}\}$ признаков представляется в виде многомерного вектора

$$\boldsymbol{\beta}_v = [\boldsymbol{\alpha}_v \ \{\boldsymbol{\mu}_k\}_v]^T = [\boldsymbol{\alpha}_v \ \boldsymbol{\mu}_{1,v} \ \boldsymbol{\mu}_{2,v} \ \dots \ \boldsymbol{\mu}_{K,v}]^T,$$

с помощью которого описывается уникальный портрет цели. Несовместные комбинации значений признаков $\boldsymbol{\beta}_v$ позволяют разделить все признаковое пространство на q -е количество групп $\{\boldsymbol{\beta}_{q,v}, q = \overline{1, Q}\}$, описывающих определенные классы целей с похожими свойствами. Методика разбиения признаков на классы описана в [7]. Полученные классы целей можно условно обозначить дискретными признаками $\omega_q = 1, 0$, $q = \overline{1, Q}$. Совокупность всех классов ω_q целей формирует алфавит $\Omega = \{\omega_q\}$ объемом Q , $q = \overline{1, Q}$, для которых справедливо условие нормировки

$$\sum_{q=1}^Q P(\omega_q) = 1,$$

где $P(*)$ – вероятность появления q -го класса ω_q целей. Значение признака классов ω_q цели во времени не меняется и удовлетворяет условию

$$\omega_q = \omega_q(t_v) = \omega_q(t_{v-1}). \quad (2)$$

В обобщенном виде наблюдения источников информации с учетом координат целей и их признаков можно записать как

$$\xi_k(t_v) = \mathbf{S}_{q,k}(t_v, \mathbf{x}_{i,v}(\boldsymbol{\alpha}_v), \boldsymbol{\mu}_{k,v}) + \mathbf{n}_{\xi,k}(t_v). \quad (3)$$

Здесь $\mathbf{S}_{q,k}(t_v, \mathbf{x}_{i,v}(\boldsymbol{\alpha}_v), \boldsymbol{\mu}_{k,v})$ – в общем случае нелинейная вектор-функция истинных параметров сигнала от цели q -го класса, принимаемого k -м источником; $\mathbf{x}_{i,v}$ – вектор фазовых координат наблюдаемой i -й цели из совокупности целей N , $i = \overline{1, N}$, находящихся в некоторой области пространства; $\boldsymbol{\mu}_k(t_v) = \boldsymbol{\mu}_{k,v}$ – вектор значений сигнальных признаков цели в k -м источнике; $\mathbf{n}_{\xi,k}(t_v)$ – вектор гауссовских случайных величин, характеризующий ошибки k -го источника информации с известными статистическими характеристиками в виде математического описания и корреляционной матрицы ошибок измерений соответственно

$$M\{\mathbf{n}_{\xi,k}(t_v)\} = 0,$$

$$M\{\mathbf{n}_{\xi,k}(t_v) \mathbf{n}_{\xi,k}(t_{v-1})^T\} = \mathbf{D}_{\xi,k}(t_v).$$

Таким образом, задача синтеза алгоритма комплексного сопровождения и распознавания аэродинамических целей заключается в разработке процедур формирования наилучшей оценки $\hat{\mathbf{x}}_{i,v}$ параметров вектора фазовых координат наблюдаемой цели с учетом оценки признака $\hat{\omega}_{q,v}$ ее класса (распознавания) по совокупности наблюдений $\left\{ \xi_k(t_0^v), k = \overline{1, K} \right\}$ источников информации. При этом в процессе наблюдения за целью необходимо, чтобы оценка ее координат $\hat{\mathbf{x}}_{i,v}$ и признака $\hat{\omega}_{q,v}$ ее класса осуществлялась совместно с учетом динамики их изменения в масштабе времени, близком к реальному. По существу, это означает, что необходимо найти такие функции результатов наблюдений $f\left(\left\{ \xi_k(t_0^v) \right\}\right)$ на интервале времени $t_0^v = [t_0, t_v]$, значения которых можно принять за соответствующие оптимальные оценки

$$\hat{\mathbf{x}}_{i,v} = f_x\left(\left\{ \xi_k(t_0^v) \right\}_i\right)$$

и

$$\hat{\omega}_{q,v} = f_\omega\left(\left\{ \xi_k(t_0^v) \right\}_i, \hat{\mathbf{x}}_{i,v}, \alpha_q, \left\{ \mu_{q,k} \right\}\right).$$

2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА

Комплексное сопровождение и распознавание класса цели осуществляется на основе совместной фильтрации параметров вектора $\hat{\mathbf{x}}_{i,v}$ и дискретного признака $\omega_{q,v}$ по информации совокупности источников. Для оптимизации решения данной задачи применены подходы байесовской теории принятия решений, обеспечивающие минимизацию потерь от возможных ошибок принятия неправильных решений [2, 3]. Для этого введен

совместный функционал потерь $g_v(\mathbf{x}_v, \hat{\mathbf{x}}_v, \omega_v, \hat{\omega}_v)$ по совокупности формируемых решений о характеристиках движения объекта и признаке его класса в виде

$$\begin{aligned} g_v(\mathbf{x}_{j,v}, \hat{\mathbf{x}}_{i,v}, \omega_{q,v}, \hat{\omega}_{r,v}) &= \\ &= g_v(\mathbf{x}_{j,v}, \hat{\mathbf{x}}_{i,v}) + g_v(\omega_{q,v}, \hat{\omega}_{r,v}). \end{aligned} \quad (4)$$

Слагаемыми данного функционала являются:

$$\begin{aligned} g_v(\mathbf{x}_{j,v}, \hat{\mathbf{x}}_{i,v}) &= g_v\left(\mathbf{x}_{j,v}, f_x\left(\left\{ \xi_k(t_0^v) \right\}_i\right)\right) = \\ &= \left[\mathbf{x}_{j,v} - \hat{\mathbf{x}}_{i,v} \right]^T \mathbf{C}_x \left[\mathbf{x}_{j,v} - \hat{\mathbf{x}}_{i,v} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

– квадратичная функция потерь значений вектора фазовых координат, где \mathbf{C}_x – размерная матрица коэффициентов штрафов соответствующих показателей;

$$g_v(\omega_{q,v}, \hat{\omega}_{r,v}) = 1 - \delta(\omega_{q,v}, \hat{\omega}_{r,v}) = 1 - \delta(q, r) \quad (6)$$

– простая функция потерь значений признака класса цели, где $\delta(q, r)$ – символ Кронекера, принимающий значения

$$\delta(q, r) = \begin{cases} 1, & \text{при } q = r, \\ 0, & \text{при } q \neq r. \end{cases}$$

В результате оптимальные байесовские оценки параметров вектора фазовых координат $\hat{\mathbf{x}}_{i,v}$ и дискретного параметра $\hat{\omega}_{r,v}$ по совокупности наблюдений формируются на основе минимизации апостериорного риска как

$$\hat{\mathbf{x}}_{i,v}^\omega = \arg \min \left(\gamma\left(t_v, \hat{\mathbf{x}}_{i,v}, \hat{\omega}_{r,v} \mid \left\{ \xi_k(t_0^v) \right\}\right) \right), \quad (7)$$

где

$$\gamma\left(t_v, \hat{\mathbf{x}}_{i,v}, \hat{\omega}_{r,v} \mid \left\{ \xi_k(t_0^v) \right\}\right) = \sum_{j=1}^N \sum_{q=1}^Q g_v(\mathbf{x}_{j,v}, \hat{\mathbf{x}}_{i,v}, \omega_{q,v}, \hat{\omega}_{r,v}) P(\mathbf{x}_{j,v}, \omega_{q,v} \mid \left\{ \xi_k(t_0^v) \right\}), \quad (8)$$

– минимизируемый функционал апостериорного риска, $P(\mathbf{x}_{j,v}, \omega_{q,v} \mid \left\{ \xi_k(t_0^v) \right\})$ – совместная апостериорная вероятность вектора $\hat{\mathbf{x}}_{i,v}$ фазовых координат i -го объекта и дискретного параметра $\omega_{q,v}$ признака его класса по совокупности наблюдений на интервале времени $t_0^v = [t_0, t_v]$.

В совместной апостериорной вероятности $P(\mathbf{x}_{j,v}, \omega_{q,v} \mid \left\{ \xi_k(t_0^v) \right\})$ сосредоточена вся информация об оцениваемых параметрах. При этом определить вид такой совместной вероятности достаточно проблематично, поэтому на основании свойств согласованности вероятностей ее можно представить в виде произведения условных вероятностей как [3, 5]

$$\begin{aligned} P(\mathbf{x}_{j,v}, \omega_{q,v} \mid \left\{ \xi_k(t_0^v) \right\}) &= \\ &= P(\omega_{q,v} \mid \left\{ \xi_k(t_0^v) \right\}) P(\mathbf{x}_{j,v} \mid \left\{ \xi_k(t_0^v) \right\}, \omega_{q,v}). \end{aligned} \quad (9)$$

В результате минимизируемый функционал апостериорного риска (8) принимает вид

$$\begin{aligned} \gamma\left(t_v, \hat{\mathbf{x}}_{i,v}, \hat{\omega}_{r,v} \mid \left\{ \xi_k(t_0^v) \right\}\right) &= \\ &= \gamma\left(t_v, \hat{\omega}_{r,v} \mid \left\{ \xi_k(t_0^v) \right\}\right) + \\ &+ \sum_{q=1}^Q P(\omega_{q,v} \mid \left\{ \xi_k(t_0^v) \right\}) \gamma\left(t_v, \hat{\mathbf{x}}_{i,v} \mid \left\{ \xi_k(t_0^v) \right\}, \omega_{q,v}\right). \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь имеются следующие функции, обеспечивающие формирование оптимальных байесовских решений:

1) $\gamma(t_v, \hat{\omega}_{r,v} | \{\xi_k(t_0^v)\})$ – функция апостериорного риска формирования решения о признаке $\hat{\omega}_{r,v}$ класса наблюдаемой цели, вычисляемая как

$$\begin{aligned} \gamma(t_v, \hat{\omega}_{r,v} | \{\xi_k(t_0^v)\}) &= \\ &= \sum_{q=1}^Q [1 - \delta(q, r)] P(\omega_{q,v} | \{\xi_k(t_0^v)\}), \end{aligned} \quad (11)$$

в соответствии с которой по максимуму апостериорной вероятности производится оценка признака $\omega_{q,v}$ по выражению

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_{r,v} &= \arg \min \left\{ \gamma(t_v, \hat{\omega}_{r,v} | \{\xi_k(t_0^v)\}) \right\} = \\ &= \arg \max \left\{ P(\omega_{q,v} | \{\xi_k(t_0^v)\}) \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

2) $\gamma(t_v, \hat{\mathbf{x}}_{i,v} | \{\xi_k(t_0^v)\}, \omega_{q,v})$ – функция условного апостериорного риска оценки фазовых координат наблюдаемой цели, вычисляемая как

$$\gamma(t_v, \hat{\mathbf{x}}_{i,v} | \{\xi_k(t_0^v)\}, \omega_{q,v}) = \sum_{j=1}^N \int [\mathbf{x}_v - \hat{\mathbf{x}}_{i,v}]^T \mathbf{C}_x [\mathbf{x}_v - \hat{\mathbf{x}}_{i,v}] p(\mathbf{x}_v | \{\xi_k(t_0^v)\}, \omega_{q,v}) d\mathbf{x}_v, \quad (13)$$

в соответствии с которой осуществляется условная комплексная фильтрация фазовых координат цели $\mathbf{x}_{j,v}$ как

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{i,v}(\omega_{q,v}) &= \arg \min \left\{ \gamma(t_v, \hat{\mathbf{x}}_{i,v} | \{\xi_k(t_0^v)\}, \omega_{q,v}) \right\} = \\ &= \arg \min \left\{ \sum_{j=1}^N [\mathbf{x}_v - \hat{\mathbf{x}}_{i,v}]^T \mathbf{C}_x [\mathbf{x}_v - \hat{\mathbf{x}}_{i,v}] P(x_{j,v} | \{\xi_k(t_0^v)\}, \omega_{q,v}) d\mathbf{x}_v \right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

При этом апостериорная вероятность $P(\mathbf{x}_{j,v} | \{\xi_k(t_0^v)\}, \omega_{q,v})$ координат $\mathbf{x}_{j,v}$ j -й цели представляет собой интеграл плотности вероятностей $p(\mathbf{x}_v | \{\xi_k(t_0^v)\}, \omega_{q,v})$ непрерывных координат \mathbf{x}_v по области их определения для j -й цели как

$$P(\mathbf{x}_{j,v} | \{\xi_k(t_0^v)\}, \omega_{q,v}) = \int_{\mathbf{x}_j} p(\mathbf{x}_v | \{\xi_k(t_0^v)\}, \omega_{q,v}) d\mathbf{x}_v.$$

Учет значений апостериорной вероятности признака $\omega_{q,v}$ позволяет сформировать комплексную средневзвешенную оценку фазовых координат $\mathbf{x}_{j,v}$ цели как

$$\hat{\mathbf{x}}_{i,v}^{\omega} = \sum_{q=1}^Q P(\omega_{q,v} | \{\xi_k(t_0^v)\}) \hat{\mathbf{x}}_{i,v}(\omega_{q,v}). \quad (15a)$$

Точность такой оценки характеризуется значениями результирующей корреляционной матрицы ошибок оценивания, имеющей вид

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{i,v}^{\omega} &= \sum_{q=1}^Q P(\omega_{q,v} | \{\xi_k(t_0^v)\}) \left(\mathbf{R}_{i,v}(\omega_{q,v}) + \right. \\ &\left. + [\hat{\mathbf{x}}_{i,v}^{\omega} - \hat{\mathbf{x}}_{i,v}(\omega_{q,v})][\hat{\mathbf{x}}_{i,v}^{\omega} - \hat{\mathbf{x}}_{i,v}(\omega_{q,v})]^T \right). \end{aligned} \quad (15b)$$

Из выражений (12)–(15) видно, что решение оптимизационной задачи (7), (8), приводящее к сопровождению и распознаванию класса цели, осуществляется при многоканальной совместной оптимизации решений двух частных задач: 1) условной фильтрации фазовых координат $\hat{\mathbf{x}}_{i,v}(\omega_{q,v})$ наблюдаемой цели, обладающей характерными признаками $\omega_{q,v}$ класса; 2) оценки признака $\hat{\omega}_{r,v}$ распознавания класса.

3. АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ КООРДИНАТ ЦЕЛИ

Оптимальная комплексная фильтрация фазовых координат наблюдаемой цели осуществляется при условии заданного значения признака $\omega_{q,v}$ ее класса на основе минимизации значения условного апостериорного риска $\gamma(t_v, \hat{\mathbf{x}}_{i,v} | \{\xi_k(t_0^v)\}, \omega_{q,v})$ по вектору \mathbf{x}_v . Его минимальное значение определяется согласно выражению

$$\frac{d}{dx^T} \gamma(t_v, \hat{x}_{i,v} | \{\xi_k(t_0^v)\}, \omega_{q,v}) = \frac{d}{dx^T} \left(\sum_{j=1}^N \int [x_v - \hat{x}_{i,v}]^T C_x [x_v - \hat{x}_{i,v}] p(x_v | \{\xi_k(t_0^v)\}, \omega_{q,v}) dx_v \right) = 0. \quad (16)$$

Решение данного уравнения при единичной матрице $C_x = I$ позволяет получить уравнение для оценки пространственных координат наблюдаемой цели при условии известного значения признака $\omega_{q,v}$ ее класса в виде

$$\hat{x}_{i,v}(\omega_{q,v}) = \sum_{j=1}^N \int x_v p(x_v | \{\xi_k(t_0^v)\}, \omega_{q,v}) dx_v \quad (17)$$

и уравнение для корреляционной матрицы апостериорных дисперсий оценки пространственных координат цели в виде

$$R_{i,v}(\omega_{q,v}) = \sum_{j=1}^N \int [x_v - \hat{x}_{i,v}(\omega_{q,v})][x_v - \hat{x}_{i,v}(\omega_{q,v})]^T p(x_v | \{\xi_k(t_0^v)\}, \omega_{q,v}) dx_v. \quad (18)$$

Определение вида условной апостериорной плотности вероятности $p(x_v | \{\xi_k(t_0^v)\}, \omega_{q,v})$ координат наблюдаемой цели соответствующего класса осуществляется на основе априорной модели поведения объекта (1) и уравнений наблюдений (3). Анализ данных уравнений показывает, что между вектором фазовых координат $x_{i,v}$ цели и признаком $\omega_{q,v}$ ее класса не существует прямой зависимости. При этом существует зависимость модели поведения объекта (1) и уравнений наблюдений (3) от значений признаков α_v и $\{\mu_k\}_v$, а также определенная статистическая зависимость между признаками $\beta_v = [\alpha_v \ \{\mu_k\}_v]^T$ описания целей и признаками $\{\omega_{q,v}\}$ их классов [7].

В процессе наблюдения за целью априорные значения признаков вектора α_v и $\{\mu_k\}_v$ не всегда известны. Отсутствие знаний о значениях данных признаков в моделях (1) и (3) приводит к некорректному описанию динамики движения аэродинамических целей, обладающих различными маневренными способностями, и условий их наблюдения. Как следствие, это приводит к ухудшению характеристик точности сопровождения наблюдаемых целей [8]. Поэтому для оценки координат наблюдаемой цели необходимо учитывать условия изменения параметров вектора признаков $\beta_v = [\alpha_v \ \{\mu_k\}_v]^T$ цели, характеризующих ее класс.

Одним из направлений реализации данных условий является использование адаптивных алгоритмов [5, 8]. Статистический синтез алгоритма фильтрации пространственных координат наблюдаемой цели на основании характеристик апостериорной плотности вероятности $p(x_v | \{\xi_k(t_0^v)\}, \omega_{q,v})$, используемой в уравнениях (17) и (18), с учетом значений признаков α_v и $\{\mu_k\}_v$ позволил получить следующие его выражения:

1) уравнение адаптивной комплексной фильтрации параметров вектора $x_{j,v}(\omega_{q,v})$ цели в виде

$$\hat{x}_{j,v}(\alpha_{q,v}) = \tilde{x}_{j,v}(\alpha_{q,v}) + \sum_{k=1}^K K_{k,v} [\xi_k(t_v) - S_{q,k}(t_v, \tilde{x}_{j,v}(\alpha_{q,v}), \mu_{q,k,v})]; \quad (19)$$

2) уравнение для матрицы апостериорных дисперсий ошибок адаптивной фильтрации фазовых координат цели с учетом ошибок оценки признаков $\hat{\alpha}_{q,v}$ и $\{\hat{\mu}_k\}_v$ в виде

$$R_{j,x,v}(\omega_{q,v}) = \left[\tilde{R}_{j,x,v}(\alpha_{q,v})^{-1} + \sum_{k=1}^K H_{\xi,k}^T (V_{\xi,k}(t_v) + (H_{\xi,k} H_{\alpha}) \tilde{R}_{\alpha,v} (H_{\xi,k} H_{\alpha})^T)^{-1} H_{\xi,k} \right]^{-1}. \quad (20)$$

В уравнениях (19) и (20) приведено: $\tilde{x}_{j,v}(\alpha_{q,v})$ – экстраполированная условная оценка пространственных координат цели, вычисляемая согласно выражению

$$\tilde{x}_{j,v}(\alpha_{q,v}) = \Phi(\alpha_{q,v-1}) \hat{x}_{j,v-1}(\alpha_{q,v-1}); \quad (21)$$

$\tilde{R}_{j,x,v}(\alpha_{q,v})$ – матрица экстраполированных дисперсий ошибок оценки фазовых координат цели, вычисляемая как

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{j,x,v}(\alpha_{q,v-1}) &= \\ &= \Phi(\alpha_{q,v-1}) R_{j,x,v-1}(\alpha_{q,v-1}) \Phi(\alpha_{q,v-1})^T + \\ &+ \Psi(\hat{\alpha}_{q,v-1}); \end{aligned} \quad (22)$$

$\hat{\alpha}_{q,v}$ – вектор оценок динамических признаков q -го класса цели; $\mu_{q,k,v}$ – вектор оценок сигнальных признаков q -го класса цели в k -м источнике информации; $\Psi(\alpha_{q,v-1})$ – корреляционная матрица шумов модели (1) с учетом оценки динамических признаков q -го класса цели; $K_{k,v}$ – коэффициент усиления невязки измерений k -го источника информации, вычисляемый согласно выражению

$$K_{k,v} = \tilde{R}_{j,x,v}(\alpha_{q,v}) H_{\xi,k}^T \times \\ \times \left(V_{\xi,k}(t_v) + (H_{\xi,k} H_{\alpha}) \tilde{R}_{\alpha,v} (H_{\xi,k} H_{\alpha})^T + \right. \\ \left. + H_{\xi,k} \tilde{R}_{j,x,v}(\hat{\alpha}_{q,v}) H_{\xi,k}^T \right)^{-1}; \quad (23)$$

$V_{\xi,k}(t_v)$ – корреляционная матрица ошибок измерений, вычисляемая согласно выражению

$$V_{\xi,k}(t_v) = H_{\mu,k} \tilde{R}_{\mu,k}(t_v) H_{\mu,k}^T + D_{\xi,k}(t_v), \quad (24)$$

учитывающая ошибки измерений $D_{\xi,k}(t_v)$ k -го источника и ошибки экстраполяции оценок сигнальных признаков $\tilde{R}_{\mu,k}(t_v)$ в k -м источнике информации; $\tilde{R}_{\alpha}(t_v)$ – экстраполированная матрица дисперсий ошибок оценивания вектора $\alpha_{q,v-1}$; $H_{\mu,k}$, H_{α} и $H_{\xi,k}$ – матрицы линеаризации наблюдений, определяемые по выражениям

$$H_{\mu,k} = \frac{\partial S_{q,k}(t_v, \mathbf{x}_v(\alpha_v), \tilde{\mu}_{q,k,v})}{\partial \mu^T}, \quad (25)$$

$$H_{\alpha} = \left. \frac{\partial \hat{x}_{j,v}(\alpha_{q,v})}{\partial \alpha^T} \right|_{\alpha^* = \hat{\alpha}_q} = \\ = \left. \frac{\hat{x}_{j,v}(\alpha_v^* + \varepsilon_{\alpha}) - \hat{x}_{j,v}(\alpha_v^* - \varepsilon_{\alpha})}{2\varepsilon_{\alpha}} \right|_{\alpha^* = \hat{\alpha}_q}, \quad (26)$$

$$H_{\xi,k} = \frac{\partial S_{q,k}(t_v, \hat{\mathbf{x}}_v(\alpha_v), \tilde{\mu}_{q,k,v})}{\partial \mathbf{x}^T}. \quad (27)$$

Таким образом, выражения (21)–(27) описывают алгоритм адаптивной комплексной фильтрации параметров вектора \mathbf{x}_v наблюдаемой цели по совокупности наблюдений источников информации с учетом результатов оценки значений характерных динамических α_v и сигнальных $\{\mu_k\}_v$ признаков $\omega_{q,v}$ ее класса. Реализация данного алгоритма опирается на результаты оценки сигнальных $\{\mu_k\}_v$ и динамических α_v признаков класса наблюдаемой цели.

Информация о сигнальных признаках, используемых в уравнении (19), скрывается в тонкой структуре сигнала $S_{q,k}(t_v, \mathbf{x}_{j,v}(\alpha_v), \mu_{k,v})$ [4],

принимаемом источниками информации КБО. Она может быть задана априорно либо получена в результате оценки значений признаков при длительном накоплении принимаемых сигналов.

В общем случае алгоритм оценки значений сигнальных признаков $\mu_{q,k,v}$ класса цели реализуется в каждом k -м источнике информации в результате фильтрации по выражению

$$\mu_{q,k,v} = \tilde{\mu}_{q,k,v} + \\ + R_{\mu,k}(t_v) \frac{\partial \ln p(\xi_k(t_v) | \omega_{q,v}, \alpha_v, \mathbf{x}_v, \tilde{\mu}_{q,k,v})}{\partial \mu^T}, \quad (28)$$

где $R_{\mu,k}(t_v)$ – апостериорная корреляционная матрица ошибок оценки сигнальных признаков $\mu_{q,k,v}$, определяемая согласно уравнению

$$R_{\mu,k}(t_v) = \left(\tilde{R}_{\mu,k}(t_v)^{-1} - \right. \\ \left. - \frac{\partial}{\partial \mu^T} \left(\frac{\partial \ln p(\xi_k(t_v) | \omega_{q,v}, \alpha_v, \mathbf{x}_v, \tilde{\mu}_{q,k,v})}{\partial \mu^T} \right) \right)^{-1}, \quad (29)$$

$\tilde{R}_{\mu,k}(t_v) = R_{\mu,k}(t_{v-1}) + B_{\mu}(\omega_{q,v})$ – экстраполированная матрица ошибок оценки значений признаков $\mu_{q,k,v}$; $B_{\mu}(\omega_{q,v})$ – матрица априорных дисперсий рассеяния признаков $\mu_{q,k,v}$ внутри q -го класса в k -м источнике, формируемая на основе априорного разделения признаков по классам; $\mu_{q,k,v} = \mu_{q,k,v-1}$ – вектор экстраполированной оценки значений признаков на основе оценок предыдущего такта оценивания; $\ln p(\xi_k(t_v) | \omega_{q,v}, \alpha_v, \mathbf{x}_v, \mu_{q,k,v})$ – логарифм функционала правдоподобия источника информации, определяемого на основании уравнения наблюдения (3) для каждого источника с учетом наличия экстраполированной оценки значений признаков $\mu_{q,k,v}$.

Значение частной производной

$$\frac{\partial \ln p(\xi_k(t_v) | \omega_{q,v}, \alpha_v, \mathbf{x}_v, \tilde{\mu}_{q,k,v})}{\partial \mu^T}$$

вычисляется на основании уравнения наблюдения (3) как

$$\frac{\partial \ln p(\xi_k(t_v) | \omega_{q,v}, \alpha_v, \mathbf{x}_v, \tilde{\mu}_{q,k,v})}{\partial \mu^T} \approx$$

$$\approx -H_{\mu,k}^T V_{\xi,k}^{-1}(t_v) \left[\xi_k(t_v) - S_{q,k}(t_v, \mathbf{x}_v(\alpha_v), \tilde{\mu}_{q,k,v}) \right]. \quad (30)$$

Вторая частная производная

$$\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\mu}^T} \left(\frac{\partial \ln p(\xi_k(t_v) | \omega_{q,v}, \boldsymbol{\alpha}_v, \mathbf{x}_v, \tilde{\boldsymbol{\mu}}_{q,k,v})}{\partial \boldsymbol{\mu}^T} \right)$$

вычисляется согласно выражению вида

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\mu}^T} \left(\frac{\partial \ln p(\xi_k(t_v) | \omega_{q,v}, \boldsymbol{\alpha}_v, \mathbf{x}_v, \tilde{\boldsymbol{\mu}}_{q,k,v})}{\partial \boldsymbol{\mu}^T} \right) = \\ = \mathbf{H}_{\mu,k}^T \mathbf{V}_{\xi,k}^{-1}(t_v) \mathbf{H}_{\mu,k}, \end{aligned} \quad (31)$$

где матрица линеаризации $\mathbf{H}_{\mu,k}$ рассчитывается согласно выражению (25); корреляционная матрица ошибок измерений $\mathbf{V}_{\xi,k}(t_v)$ вычисляется согласно (24).

Таким образом, выражения (28)–(31) описывают алгоритм оценки значений сигнальных признаков наблюдаемой цели в k -м источнике информации. Полученные оценки обеспечивают адаптацию фильтра сопровождения (29)–(30) по параметрам сигнальных признаков цели в текущих условиях наблюдения для каждого из используемых источников информации, а также применяются для распознавания класса наблюдаемой цели.

Оценка значений динамических признаков $\boldsymbol{\alpha}_{q,v}$ осуществляется на основании централизованной обработки результатов наблюдений совокупности источников по моделям вида (1). Алгоритм оценки признаков $\boldsymbol{\alpha}_{q,v}$ класса наблюдаемой цели определяется выражениями

$$\boldsymbol{\alpha}_{q,v} = \boldsymbol{\alpha}_{q,v-1} + \mathbf{R}_{\alpha,v} \frac{\partial F(\boldsymbol{\alpha}_{q,v-1}, \omega_{q,v})}{\partial \boldsymbol{\alpha}^T}, \quad (32)$$

$$\mathbf{R}_{\alpha,v} = \left(\left(\hat{\mathbf{R}}_{\alpha,v-1} \right)^{-1} - \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\alpha}^T} \left(\frac{\partial F(\boldsymbol{\alpha}_{q,v-1}, \omega_{q,v})}{\partial \boldsymbol{\alpha}^T} \right) \right)^{-1}. \quad (33)$$

где $F(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{q,v-1}, \omega_{q,v}) = \ln p(\{\xi_k(t_v)\} | \omega_{q,v}, \hat{\boldsymbol{\alpha}}_{q,v-1})$ – логарифм функционала правдоподобия, определяемый согласно уравнению

$$\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\alpha}^T} \left(\frac{\partial F(\boldsymbol{\alpha}_{q,v-1}, \omega_{q,v})}{\partial \boldsymbol{\alpha}^T} \right) = \frac{1}{\varepsilon_\alpha^2} \ln \left\{ \frac{p(\{\xi_k(t_v)\} | \omega_{q,v}, \boldsymbol{\alpha}_{q,v-1} + \varepsilon_\alpha) p(\{\xi_k(t_v)\} | \omega_{q,v}, \boldsymbol{\alpha}_{q,v-1} - \varepsilon_\alpha)}{p(\{\xi_k(t_v)\} | \omega_{q,v}, \boldsymbol{\alpha}_{q,v-1})^2} \right\}. \quad (38)$$

Таким образом, выражения (32)–(38) представляют собой алгоритм комплексной оценки динамических признаков класса цели, наблюдаемой K -м количеством каналов. Наличие данных оценок позволяет обеспечить настройку многоканального дискриминатора и экстраполятора фильтра

$$F(\hat{\boldsymbol{\alpha}}_{q,v-1}, \omega_{q,v}) =$$

$$\begin{aligned} = c_1 - \frac{1}{2} \mathbf{x}_{j,v}^T(\boldsymbol{\alpha}_{q,v-1}) \mathbf{D}_{\alpha,v}^{-1}(\boldsymbol{\alpha}_{q,v-1}) \tilde{\mathbf{x}}_{j,v}(\boldsymbol{\alpha}_{q,v-1}) + \\ + \left[\mathbf{D}_{\Sigma,v} \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{\xi,k}^T \mathbf{V}_{\xi,k}^{-1}(t_v) [\xi_k(t_v) - \right. \\ \left. - \mathbf{S}_{q,k}(t_v, \tilde{\mathbf{x}}_{j,v}(\boldsymbol{\alpha}_{q,v-1}), \tilde{\boldsymbol{\mu}}_{q,k,v})] \right]^T \times \\ \times \mathbf{D}_{\alpha,v}^{-1}(\boldsymbol{\alpha}_{q,v-1}) \tilde{\mathbf{x}}_{j,v}(\boldsymbol{\alpha}_{q,v-1}). \end{aligned} \quad (34)$$

Здесь $\mathbf{D}_{\Sigma,v}$ – матрица дисперсий совокупности наблюдений, вычисляемая как

$$\mathbf{D}_{\Sigma,v} = \left(\sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{\xi,k}^T \mathbf{V}_{\xi,k}^{-1}(t_v) \mathbf{H}_{\xi,k} \right)^{-1}; \quad (35)$$

$\mathbf{D}_{\alpha,v}(\boldsymbol{\alpha}_v)$ – корреляционная матрица ошибок наблюдений, рассчитываемая согласно выражению

$$\mathbf{D}_{\alpha,v}(\boldsymbol{\alpha}_{q,v-1}) = \mathbf{D}_{\Sigma,v} + \tilde{\mathbf{R}}_{j,x,v}(\boldsymbol{\alpha}_{q,v-1}), \quad (36)$$

в котором $\tilde{\mathbf{R}}_{j,x,v}(\boldsymbol{\alpha}_{q,v-1})$ – матрица экстраполированных дисперсий ошибок оценки фазовых координат цели вычисляется согласно (22). В результате значения корреляционной матрицы $\mathbf{D}_{\alpha,v}(\boldsymbol{\alpha}_{q,v-1})$ учитывают ошибки используемых измерителей $\{\xi_k(t_v)\}$, $k = 1, K$, а также ошибки $\tilde{\mathbf{R}}_{j,x,v}(\boldsymbol{\alpha}_{q,v-1})$ экстраполяции оценок фазовых координат цели.

Частная производная

$$\frac{\partial F(\boldsymbol{\alpha}_{q,v-1}, \omega_{q,v})}{\partial \boldsymbol{\alpha}^T}$$

может быть рассчитана с учетом (34) методом конечных разностей:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(\boldsymbol{\alpha}_{q,v-1}, \omega_{q,v})}{\partial \boldsymbol{\alpha}^T} = \\ = \frac{F(\boldsymbol{\alpha}_{q,v-1} + \varepsilon_\alpha, \omega_{q,v}) - F(\boldsymbol{\alpha}_{q,v-1} - \varepsilon_\alpha, \omega_{q,v})}{2\varepsilon_\alpha}. \end{aligned} \quad (37)$$

Аналогично может быть получена вторая частная производная:

сопровождения (19)–(27) на обработку сигнала от аэродинамической цели соответствующего класса.

В результате реализация алгоритмов комплексной оценки сигнальных и динамических признаков цели позволяет адаптировать фильтр (19)–(27) на сопровождение цели соответствующего класса

с учетом ее летно-технических характеристик. При этом создаются условия для достоверного распознавания класса цели на основе полученных оценок сигнальных и динамических признаков с учетом характера движения цели, определяемого оценками параметров сопровождения.

4. АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ КЛАССА ЦЕЛИ

Принятие решения о классе аэродинамической цели осуществляется на основе оптимальной оценки значений признака $\hat{\omega}_{q,v}$ согласно выражению (12)

$$\hat{\omega}_{q,v} = \arg \max \left\{ P\left(\omega_{q,v} \mid \left\{ \xi_k(t_0^v) \right\} \right) \right\}.$$

Апостериорная вероятность $P\left(\omega_{q,v} \mid \left\{ \xi_k(t_0^v) \right\} \right)$, используемая для оценки значения признака $\omega_{q,v}$ класса цели и вычисления оценки параметров вектора $\hat{\mathbf{x}}_{j,v}^{\omega}$ согласно (15), определяется с помощью уравнения Байеса [2, 3, 5]

$$\begin{aligned} P\left(\omega_{q,v} \mid \left\{ \xi_k(t_0^v) \right\} \right) &= \\ &= c_2 P\left(\omega_{q,v} \mid \left\{ \xi_k(t_0^{v-1}) \right\} \right) P\left(\left\{ \xi_k(t_v) \right\} \mid \left\{ \xi_k(t_0^{v-1}) \right\}, \omega_{q,v}\right), \end{aligned} \quad (39)$$

где c_2 – нормировочный коэффициент.

Учитывая неизменность во времени значения признака $\omega_{q,v}$ класса для наблюдаемой цели согласно (2), апостериорная вероятность представляется в виде

$$\begin{aligned} P\left(\omega_{q,v} \mid \left\{ \xi_k(t_0^v) \right\} \right) &= \\ &= c_2 P\left(\omega_{q,0}\right) \prod_{l=1}^v P\left(\left\{ \xi_k(t_l) \right\} \mid \left\{ \xi_k(t_0^{l-1}) \right\}, \omega_{q,l}\right). \end{aligned} \quad (40)$$

Здесь вероятность $P\left(\omega_{q,0}\right)$ задается исходя из априорных условий распределения признаков $\omega_{q,v}$ классов целей.

Функционал правдоподобия определяется на основе результатов оценки фазовых координат цели и ее признаков в предыдущий момент времени t_{v-1} :

$$\begin{aligned} P\left(\left\{ \xi_k(t_l) \right\} \mid \left\{ \xi_k(t_0^{l-1}) \right\}, \omega_{q,l}\right) &= \\ &= c_3 \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\zeta_v\left(\alpha_{q,v-1}\right) - \tilde{\mathbf{x}}_{j,v}\left(\alpha_{q,v-1}\right)\right]^T \times \right. \\ &\times \mathbf{D}_{\omega,v}^{-1}\left(\alpha_{q,v-1}\right)\left[\zeta_v\left(\alpha_{q,v-1}\right) - \tilde{\mathbf{x}}_{j,v}\left(\alpha_{q,v-1}\right)\right]\left.\right\}. \end{aligned} \quad (41)$$

Здесь $\tilde{\mathbf{x}}_{j,v}\left(\alpha_{q,v-1}\right)$ – вектор экстраполированных оценок, формируемый согласно выражению (21); $\mathbf{D}_{\omega,v}\left(\alpha_{q,v-1}\right)$ – корреляционная матрица

ошибок наблюдений, рассчитываемая согласно выражению

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_{\omega,v}\left(\alpha_{q,v-1}\right) &= \\ &= \mathbf{D}_{\Sigma,v} + \tilde{\mathbf{R}}_{j,x,v}\left(\alpha_{q,v-1}\right) + \mathbf{H}_{\alpha} \mathbf{R}_{\alpha,v} \mathbf{H}_{\alpha}^T, \end{aligned} \quad (42)$$

где \mathbf{H}_{α} – матрица линеаризации вида (26), $\tilde{\mathbf{R}}_{j,x,v}\left(\alpha_{q,v-1}\right)$ – матрица экстраполированных дисперсий ошибок оценки вектора фазовых координат, рассчитываемая согласно (22); $\mathbf{D}_{\Sigma,v}$ – корреляционная матрица ошибок наблюдений информационных каналов, определяемая согласно (35); $\zeta_v\left(\alpha_{q,v-1}\right)$ – среднее значение наблюдений каналов, определяемое по выражению

$$\begin{aligned} \zeta_v\left(\alpha_{q,v-1}\right) &= \\ &= \mathbf{D}_{\Sigma,v} \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{\xi,k}^T \mathbf{V}_{\xi,k}^{-1}\left(t_v\right)\left[\xi_k\left(t_v\right) - \right. \\ &\left. - \mathbf{S}_{k,0}\left(\tilde{\mathbf{x}}_{j,v}\left(\alpha_{q,v-1}\right)\right)\right], \end{aligned} \quad (43)$$

$\mathbf{S}_{k,0}\left(\tilde{\mathbf{x}}_{j,v}\left(\alpha_{q,v-1}\right)\right)$ – корректирующая функция, определяемая значением сигнала

$\mathbf{S}_{q,k}\left(t_v, \tilde{\mathbf{x}}_{j,v}\left(\alpha_{q,v-1}\right), \tilde{\boldsymbol{\mu}}_{q,k,v}\right)$ в точке его линеаризации как

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{k,0}\left(\tilde{\mathbf{x}}_{j,v}\left(\alpha_{q,v-1}\right)\right) &= \\ &= \mathbf{S}_{q,k}\left(t_v, \tilde{\mathbf{x}}_{j,v}\left(\alpha_{q,v-1}\right), \tilde{\boldsymbol{\mu}}_{q,k,v}\right) - \mathbf{H}_{\xi,k} \tilde{\mathbf{x}}_{j,v}\left(\alpha_{q,v-1}\right). \end{aligned} \quad (44)$$

В результате, выражения (12), (39)–(44) описывают алгоритм принятия решения $\hat{\omega}_{q,v}$ о значении признака класса цели. При равенстве априорных вероятностей классов целей $P\left(\omega_{q,0}\right) = 1/Q$ решение будет формироваться по максимуму функционала правдоподобия (41), учитывающего как координатные, так и некоординатные (динамические и сигнальные) признаки наблюдаемой цели.

Таким образом, выражения (12), (19)–(27), (28)–(29), (32), (33), (40)–(42) описывают многоуровневый централизованный алгоритм комплексного сопровождения–распознавания аэродинамических целей на основе объединения результатов наблюдений совокупности источников информации в КБО ВС, который обеспечивает минимизацию апостериорного риска ошибки сопровождения наблюдаемой цели с учетом результатов распознавания ее класса.

Функциональная схема данного комплексного алгоритма приведена на рис. 1.

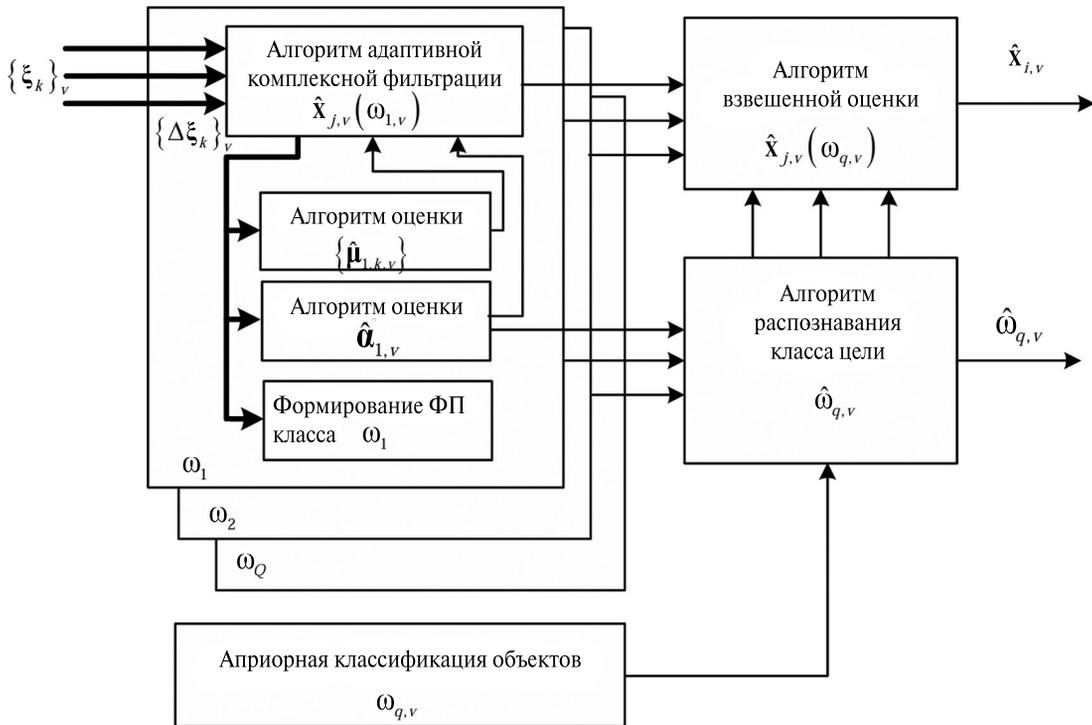


Рис. 1. Функциональная схема алгоритма комплексного сопровождения-распознавания целей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный алгоритм комплексного сопровождения-распознавания реализован на основе централизованной комплексной оптимизации процессов адаптивной комплексной фильтрации фазовых координат наблюдаемой аэродинамической цели с учетом ее динамических и сигнальных признаков, а также распознавания класса аэродинамической цели путем совместной обработки наблюдений совокупности источников информации в КБО ВС. При этом обеспечивается устойчивость и точность сопровождения цели в текущих условиях наблюдения, а также достоверность распознавания класса цели.

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меркулов В.И., Михеев В.А., Липатов А.А., Чернов В.С. // Успехи совр. радиоэлектроники. 2016. № 6. С. 3.
2. Ярлыков М.С., Богачев А.С., Меркулов В.И., Дрогалин В.В. Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов. Т.1. Теоретические основы. М.: Радиотехника, 2012.
3. Тихонов, В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 1991.
4. Аврамов А.В., Зияев А.Р. // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2021. № 20. С. 226.
5. Аврамов А.В. // Успехи совр. радиоэлектроники. 2021. № 1. С. 84.
6. Ширман, Я.Д., Горшков С.А., Лещенко С.П. и др. // Радиолокационное распознавание и методы математического моделирования. М.: Радиотехника, 2000. С. 5.
7. Аврамов А.В., Надточий В.Н. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2020. № 5. С. 52.
8. Меркулов В.И., Перов А.И., Дрогалин В.В. и др. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах. М.: Радиотехника, 2007. Ч. 2.

SYNTHESIS OF AN ALGORITHM FOR COMPLEX TRACKING- RECOGNITION OF AERODYNAMIC TARGETS

A. V. Avramov^{a,*}, V. Y. Shishkin^b

^a*Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin,
54a Sary Bolshevikov str., Voronezh, 394064 Russia*

^b*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Institutsky Lane, 9, Dolgoprudny, Moscow region, 141701 Russia*

**E-mail: andry_a@inbox.ru*

Received June 04, 2024, revised June 04, 2024, accepted June 15, 2024

It is shown that the solution to the problem of ensuring stable and high-precision tracking of aero-dynamic targets of various classes can be obtained by synthesizing an algorithm for their complex tracking and recognition, taking into account their characteristic features based on the results of observation by heterogeneous information sources. A set of interrelated algorithms has been developed, including an algorithm for complex adaptive filtering of the phase coordinates of the observed target, conditional on its dynamic and signal signs obtained from observations of a set of sources; an algorithm for recognizing the class of the observed target based on the results of evaluating the values of its dynamic and signal signs, as well as the conditions for evaluating phase coordinates.

Keywords: tracking, recognition, complex adaptive filtering, dynamic signs, signal signs, on-board equipment complex, multi-sensor environment, aerodynamic targets