

УДК 629.7.058.53

МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ГРУППОВОЙ ВОЗДУШНОЙ ЦЕЛИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ СО СЛУЧАЙНОЙ СКАЧКООБРАЗНОЙ СТРУКТУРОЙ¹

Филонов А.А.* , Кучин А.А.* , Федотов А.Ю.* , Скрынников А.А.**

*Военная академия воздушно-космической обороны
имени Маршала Советского Союза Г.К. Жукова, г. Тверь

**Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем,
г. Москва

Поступила в редакцию 19.11.2018, после переработки 10.02.2019.

Актуальность темы исследования обусловлена наличием несоответствий прагматического и научного характеров. Несответствие в практике заключается между необходимостью и возможностью улучшения характеристик бортовой радиолокационной станции (БРЛС) истребителя по распознаванию состояний групповых воздушных целей (ГВЦ) и недостаточным уровнем ее алгоритмического обеспечения. Для улучшения информационных возможностей БРЛС истребителя в статье решается актуальная научная задача, заключающаяся в разработке метода распознавания состояний ГВЦ, учитывающего априорные сведения о их смене. В соответствии с теорией систем со случайной скачкообразной структурой получено новое решающее правило (алгоритм), которое составляет новизну разработанного метода. Результаты моделирования работы этого алгоритма свидетельствуют о повышении вероятности правильного распознавания на 15 %.

Ключевые слова: групповая воздушная цель, метод распознавания, система со случайной скачкообразной структурой.

Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2019. № 1. С. 62–82.
<https://doi.org/10.26456/vtpmk513>

Введение

В варианте концепции всестороннего распознавания состояний воздушных целей [1] отмечается, что для поддержки принятия решений летчиком и оптимизации наведения ракет существует острая необходимость в расширении информационных возможностей бортовой радиолокационной станции (БРЛС) истребителя.

В работах [1–4] предлагается расширение функциональных возможностей БРЛС и улучшение ее точностных характеристик за счет реализации на борту истребителя новых алгоритмов распознавания таких состояний групповых воздушных целей (ГВЦ), как ее численного и типового (классового) составов, функционального назначения самолетов в группе по принципу «ведущий – ведомый»,

¹Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №16-08-00464-а).

формы боевого порядка (пеленг, клин и т.д.), характера ее полета по принципу «стационарный полет – маневр группой – маневр в группе», видов оказываемого информационного противодействия (уводящие по скорости и/или по дальности помехи), а также фактов и количества пущенных ракет.

Важность и необходимость наличия этой информации на борту истребителя подтверждается результатами анкетирования летного состава [1].

Однако, информационные возможности БРЛС современных истребителей позволяют распознавать лишь тип летательного аппарата из класса «самолет с турбореактивным двигателем», численный состав группы до 10 целей, а также факты пуска ракет, что представляется недостаточным в сравнении с реальными вариантами воздушно целевой обстановки.

Таким образом, информационные возможности современных БРЛС не в полной мере соответствуют предъявляемым требованиям.

Результаты лётно-экспериментальных исследований и анализ информационных свойств радиолокационных сигналов, отраженных от реальных воздушных целей, позволили выявить устойчивые информационные признаки, подтверждающие принципиальную возможность распознавания требуемых состояний [5].

Основу перспективных алгоритмов [1–4] составляет многогипотезная многомерная линейная калмановская фильтрация [3], строящаяся на априорных сведениях в виде динамических моделей эволюции функционально-связанных координат (ФСК) по двухэтапной схеме «прогноз – коррекция». При этом, под ФСК понимаются дальности до элементов ГВЦ, радиальные скорости и ускорения взаимного сближения самолетов группы и истребителя-носителя БРЛС, а также дистанции между самолетами в боевом порядке.

Специфической особенностью решения задачи распознавания в вышеупомянутом смысле является необходимость на основе одних и тех же результатов наблюдений совместно вынести два решения – указать одно из возможных состояний ГВЦ и оценить ФСК. Эта особенность предопределила применение в «многогипотезном» подходе положений теории совместного оценивания и различения сигналов [6], позволившее учесть зависимость, как размерности вектора фазовых координат, подлежащих оцениванию, так и физического смысла отдельных его компонент от состояния ГВЦ.

Однако, следствием применения в «многогипотезном» подходе теорий линейной калмановской фильтрации и теории совместного оценивания и различения сигналов явились следующие ограничения и допущения:

- предполагается, что состояние ГВЦ не меняется на интервале времени наблюдения, но может изменяться при переходе от одного интервала к другому, если рассматривается их последовательность [6];
- для используемой вероятностной модели характерна статистическая независимость состояний на различных интервалах наблюдения [6];
- не учитываются априорные сведения о динамике распознаваемых состояний ГВЦ;
- не учитывается дополнительная статистическая взаимосвязь между ФСК и состоянием ГВЦ.

В свою очередь, на практике имеет место:

- смена состояний ГВЦ в случайные моменты времени;
- статистическая взаимосвязь между состояниями ГВЦ на различных интервалах наблюдения;
- возможность выявления и описания закономерностей смен различных состояний ГВЦ во времени;
- ограничение допустимых диапазонов скоростей и ускорений летательных аппаратов, образующих ГВЦ, летно-техническими характеристиками их типов или классов;
- ограничение возможных видов огневого и информационного противодействия, а также функционального назначения самолетов в группе их типами и классами.

Однако, существуют подходы, лишенные отмеченных ограничений и способные более адекватно отражать существенные стороны реального полета ГВЦ. Так, изменение численного состава, смену форм боевых порядков, видов информационного противодействия, изменение количества пущенных ракет и направления их полета возможно описать случайным скачкообразным процессом, однозначно определяемым начальными условиями и вероятностями перехода ГВЦ из одного состояния в другое.

Тогда, как следует из формулы Байеса, учет дополнительных априорных данных о динамике состояний ГВЦ, представленной этим случайным процессом, способен улучшить вероятностные и точностные характеристики перспективных алгоритмов.

Таким образом, перспективные методы и алгоритмы [1–4] распознавания не в полной мере способны реализовать потенциальные возможности БРЛС по достоверности и количеству получаемой в результате распознавания информации.

Возможным путем устранения отмеченных ограничений является моделирование полета ГВЦ и смены ее состояний, как системы со случайной скачкообразной структурой (ССС), и применение рекуррентных алгоритмов [7].

Цель статьи – разработать метод распознавания состояния групповой воздушной цели на основе модели со случайной скачкообразной структурой в интересах расширения информационных возможностей и улучшения точностных характеристик бортовой радиолокационной станции истребителя.

Как правило, метод распознавания включает алфавит классов, словарь признаков и решающее правило. При этом новым является метод отличающийся от известных хотя бы одним элементом из этой совокупности.

В дальнейшем предполагается, что алфавит классов и словарь признаков заимствованы из метода распознавания основанного на многогипотезном калмановском подходе [1–4], а новизну разрабатываемого метода составляет новое решающее правило, основанное на модели со СССР, реализуемое в алгоритме.

В формализованном виде научная задача представляется следующим образом:

$$M \rightarrow A \rightarrow r_3 = \arg \max_{r \in R} P_{\text{пр}}(r|\varphi, \psi, q, \pi, \Phi),$$

при ограничениях $t_{\text{расп}}(r_{\text{э}}) \leq t_{\text{расп огр}}$, $B(r_{\text{э}}) \leq B_{\text{огр}}$, $P_{\text{пр}}(r_{\text{э}}) \geq P_{\text{пр тр}}$, где M — метод распознавания состояния ГВЦ; A — алгоритм распознавания; r — решающее правило; $r_{\text{э}}$ — наилучшее решающее правило; φ — модель динамики функционально-связанных координат ГВЦ; ψ — модель измерений функционально-связанных координат ГВЦ в БРЛС истребителя; q — модель смены состояний ГВЦ; π — модель индикатора состояния ГВЦ; Φ — модель неуправляемых воздействий на ГВЦ (возмущений) и систему наблюдения истребителя (помех); $t_{\text{расп}}$ — время распознавания; B — вычислительные ресурсы бортовых вычислителей; $P_{\text{пр}}$ — вероятность правильного распознавания состояния ГВЦ ($t_{\text{расп огр}} = 5$ с, $B_{\text{огр}} = 10$ Мфлопс, $P_{\text{пр тр}} = 0,6$).

При решении научной задачи варьируемым параметром при заданных моделях является решающее правило $r \in R$, где R — дискретное множество решающих правил.

С учетом этого для достижения цели исследования необходимо решить следующие частные задачи:

- разработать линейную модель системы «групповая воздушная цель – бортовая радиолокационная станция – индикатор – истребитель» с марковской структурой;
- разработать алгоритм совместного сопровождения и распознавания состояния ГВЦ, на основе линейной модели с марковской структурой и метода двухмоментной параметрической аппроксимации.

1. Линейная модель системы «групповая воздушная цель – бортовая радиолокационная станция – индикатор – истребитель» с марковской структурой

Под системой со ССС понимаются стохастические динамические системы, структура которых (т.е. состав элементов и связи между ними) имеют конечное число возможных состояний, сменяющих друг друга в случайные моменты времени [7].

Так, группу воздушных целей при решении задачи их совместного сопровождения и распознавания в БРЛС истребителя, можно представить системой со ССС, в которой ФСК соответствуют фазовым координатам, а состояния ГВЦ – состояниям структуры системы.

Тогда, под случайной скачкообразной сменой структуры понимается изменение численного состава ГВЦ в результате отделения от нее самолетов или их поражения, смена форм боевого порядка, переход от стационарного полета к выполнению маневра в группе или составе группы, начало постановки помех, а также смена их вида (по скорости, по дальности), изменение количества пущенных ракет, а также смена направления их полета по принципу «на меня» – «не на меня», происходящие в случайные, заранее неизвестные, моменты времени.

Пусть обобщенная система «ГВЦ – БРЛС – индикатор – истребитель» [8] описывается линейной моделью с марковской структурой [7]. В таком случае, математическая модель этой системы примет вид для линейной динамики ФСК

$$x_{k+1} = \varphi_k(s_{k+1}, x_k, s_k, \xi_k) = A_k(s_k)x_k + F_k(s_k)\xi_k, \quad (1)$$

для их измерений в БРЛС

$$z_k = \psi_k(x_{k+1}, s_{k+1}, r_{k+1}, x_k, s_k, z_k, \zeta_k) = C_k(s_k)x_k + E_k(s_k)\zeta_k, \quad (2)$$

для марковской динамики состояния ГВЦ

$$q_k(s_{k+1}|x_k, s_k) = q_k(s_{k+1}|s_k), \quad (3)$$

для индикатора состояния ГВЦ

$$\pi_{k+1}(r_{k+1}|x_{k+1}, s_{k+1}, x_k, s_k, z_k, r_k) = \pi_{k+1}(r_{k+1}|r_k, s_{k+1}), \quad (4)$$

для неуправляемых случайных возмущений и помех

$$\Phi_k(\xi_k, \zeta_k) \rightarrow G_k, Q_k, \quad (5)$$

при начальных условиях

$$f_0(x_0, s_0) \rightarrow P[s_0] = \tilde{p}_0(s_0), M[x_0|s_0] = \tilde{x}_0(s_0), R(x_0|s_0) = \tilde{R}_0(s_0), \quad (6)$$

где

- k – дискретный момент времени;
- $x_k = (F_1, F_2, \dots, F_M; F_{1k}, F_{2k}, \dots, F_{Mk})$ – вектор ФСК, вектор доплеровских частот планерных и компрессорных спектральных составляющих элементов ГВЦ с максимальным численным составом (при необходимости может включать дополнительные информативные параметры);
- F_i – значение доплеровской частоты соответствующее i -му элементу ГВЦ;
- M – максимальный численный состав ГВЦ, подлежащий распознаванию;
- $s_k = (s_1, s_2, s_3, s_4)_k$ – вектор состояния ГВЦ;
- $(s_1)_k$ – вариант характера полета (набора параметров);
- $(s_2)_k$ – численный состав ГВЦ;
- $(s_3)_k$ – режимы функционирования и работоспособности БРЛС;
- $(s_4)_k$ – вид информационного противодействия;
- $z_k = \bar{x}_k = (\bar{F}_1, \bar{F}_2, \dots, \bar{F}_M)$ – вектор измерений доплеровских частот в БРЛС (выходной сигнал);
- $r_k = \bar{s}_k = (\bar{s}_1, \bar{s}_2, \bar{s}_3, \bar{s}_4)_k$ – выходные показания индикатора состояния ГВЦ;
- ξ_k, ζ_k – стандартные дискретные векторные белые шумы;
- $F_k(s_k)\xi_k$ – вектор неуправляемых случайных возмущений (шумов возбуждения), действующих на ГВЦ;
- $E_k(s_k)\zeta_k$ – вектор помех измерению;

- $\varphi_k(\cdot), \psi_k(\cdot)$ — векторные детерминированные функции случайных аргументов (модели динамики ФСК и их измерений в БРЛС);
- $q_k(s_{k+1}|s_k)$ — вероятности перехода ГВЦ из состояния s_k в состояние s_{k+1} ;
- $\pi_{k+1}(r_{k+1}|r_k, s_{k+1})$ — вероятности индикации состояния r_{k+1} при условии, что истинно состояние s_{k+1} , а на предыдущем шаге было показано состояние r_k ;
- $\Phi_k(\xi_k, \zeta_k)$ — совместная функция распределения возмущений и помех;
- G_k, Q_k — ковариационные матрицы (КМ) соответственно шумов возбуждения и помех;
- $f_0(x_0, s_0)$ — начальное совместное распределение ФСК и состояния ГВЦ;
- $P[s_0], M[x_0|s_0], R(x_0|s_0)$ — соответственно начальное распределение состояний ГВЦ, условное математическое ожидание (МО) функционально-связанных координат при фиксированном состоянии ГВЦ, условная КМ ошибок оценки ФСК при фиксированном состоянии ГВЦ;
- $\tilde{p}_0(s_0), \tilde{x}_0(s_0), \tilde{R}_0(s_0)$ — соответственно начальные прогнозируемые на один шаг дискретности вперед распределение состояний ГВЦ, МО и КМ функционально-связанных координат;
- $A_k(s_k), F_k(s_k), C_k(s_k), E_k(s_k)$ — известные матрицы детерминированных функций случайного аргумента s_k .

Для индикатора состояния структуры характерно принятие решения по результатам наблюдения без учета априорной информации (3) о динамике состояний ГВЦ.

Зависимость матрицы $A_k(s_k)$ от состояния ГВЦ обусловлена необходимостью учета различных моделей движения, отражающих характер полета ГВЦ и способных отличаться как составом фазовых координат (количеством его компонент и их физическим смыслом), так и вариантами наборов параметров.

Так, стационарному полету ГВЦ с численным составом M соответствует модель, определяемая первым вариантом ($s_1 = 1$) набора параметров

$$A_k(s_1) = A_k(1) = \begin{pmatrix} a_{11}^{(s_1)} & a_{12}^{(s_1)} & \dots & a_{1M}^{(s_1)} \\ a_{21}^{(s_1)} & a_{22}^{(s_1)} & \dots & a_{2M}^{(s_1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{M1}^{(s_1)} & a_{M2}^{(s_1)} & \dots & a_{MM}^{(s_1)} \end{pmatrix} = \left(a_{ij}^{(s_1)} \right)_{M \times M} = \left(a_{ij}^{(1)} \right)_{M \times M}.$$

Маневру в группе соответствует модель, определяемая вторым вариантом ($s_1 = 2$) набора параметров

$$A_k(s_1) = A_k(2) = \left(a_{ij}^{(2)} \right)_{M \times M}.$$

Маневру составом группы соответствует модель, определяемая третьим вариантом ($s_1 = 3$) набора параметров

$$A_k(s_1) = A_k(3) = \left(a_{ij}^{(3)} \right)_{M \times M}.$$

При стационарном полете ГВЦ могут быть дополнительно учтены модели полета в боевом порядке «пеленг» с четвертым вариантом ($s_1 = 4$) набора параметров

$$A_k(s_1) = A_k(4) = \left(a_{ij}^{(4)} \right)_{M \times M},$$

«клин» с пятым ($s_1 = 5$) набором параметров

$$A_k(s_1) = A_k(5) = \left(a_{ij}^{(5)} \right)_{M \times M}$$

и «фронт» с шестым ($s_1 = 6$)

$$A_k(s_1) = A_k(6) = \left(a_{ij}^{(6)} \right)_{M \times M}.$$

Зависимость матриц $A_k(s_k), F_k(s_k), C_k(s_k), E_k(s_k)$ от состояния ГВЦ обусловлена тем, что состав вектора ФСК и наблюдения должен соответствовать численному составу ГВЦ, который заранее неизвестен.

Так, при полете ГВЦ с максимальным численным составом $s_2 = M$

$$A_k(s_2) = A_k(M) = \left(a_{ij}^{(M)} \right)_{M \times M}; C_k(s_2) = C_k(M) = \left(c_{ij}^{(M)} \right)_{M \times M};$$

$$F_k(s_2) = F_k(M) = \begin{pmatrix} f_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & f_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & f_{MM} \end{pmatrix} = \text{diag}(f_{11}, f_{22}, \dots, f_{MM});$$

$$E_k(s_2) = E_k(M) = \text{diag}(f_{11}, f_{22}, \dots, f_{MM}),$$

и в векторах ФСК и наблюдения присутствуют все компоненты

$$x_k = (F_1, F_2, \dots, F_M), z_k = (\bar{F}_1, \bar{F}_2, \dots, \bar{F}_M),$$

где $\text{diag}(\cdot)$ – диагональная матрица.

При полете одиночной цели $s_2 = 1$

$$A_k(s_2) = A_k(1) = \text{diag}(a_{11}, 0, \dots, 0), F_k(s_2) = F_k(1) = \text{diag}(f_{11}, 0, \dots, 0),$$

$$C_k(s_2) = C_k(1) = \text{diag}(c_{11}, 0, \dots, 0), E_k(s_2) = E_k(1) = \text{diag}(e_{11}, 0, \dots, 0),$$

в векторах ФСК и наблюдения остаются только по одной ненулевой компоненте – доплеровская частота планерной составляющей единственной цели и ее измерение в БРЛС

$$x_k = (F_1, 0, \dots, 0), z_k = (\bar{F}_1, 0, \dots, 0).$$

При $s_2 = 2$

$$A_k(s_2) = A_k(2) = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}_{MM},$$

$$C_k(s_2) = C_k(2) = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & 0 \\ c_{21} & c_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}_{MM},$$

$$F_k(s_2) = F_k(1) = \text{diag}(f_{11}, f_{22}, \dots, 0), E_k(s_2) = E_k(1) = \text{diag}(e_{11}, e_{22}, \dots, 0);$$

$$x_k = (F_1, F_2, \dots, 0), z_k = (\bar{F}_1, \bar{F}_2, \dots, 0).$$

А для ГВЦ, состоящей из m элементов, матрицы формируются с учетом

$$\forall i, j > m : a_{ij}^{(s_2)} = f_{ij}^{(s_2)} = c_{ij}^{(s_2)} = e_{ij}^{(s_2)} = 0.$$

Зависимость матрицы наблюдения $C_k(s_k)$ от состояния БРЛС обусловлена необходимостью учета различных режимов функционирования и работоспособности радиолокационной станции (условий наблюдения), а от состояния ГВЦ — необходимостью учета различных вариантов осуществляемого с ее стороны информационного противодействия.

Так, при работоспособном ($s_3 = 1$) состоянии БРЛС

$$C_k(s_3) = C_k(1) = \left(c_{ij}^{(1)} \right)_{M \times M},$$

при неработоспособном ($s_3 = 2$) состоянии БРЛС

$$C_k(s_3) = C_k(2) = \left(c_{ij}^{(2)} \right)_{M \times M}.$$

При неработоспособном состоянии БРЛС могут быть дополнительно учтены частично неработоспособные состояния, при которых БРЛС способна частично выполнять свои функции. Так для первого ($s_3 = 3$) частично работоспособного состояния БРЛС

$$C_k(s_3) = C_k(3) = \left(c_{ij}^{(3)} \right)_{M \times M},$$

для второго ($s_3 = 4$)

$$C_k(s_3) = C_k(4) = \left(c_{ij}^{(4)} \right)_{M \times M} \text{ и т.д.}$$

При отсутствии помех ($s_4 = 1$)

$$C_k(s_4) = C_k(1) = \left(c_{ij}^{(1)} \right)_{M \times M},$$

при наличии уводящей только по скорости помехи ($s_4 = 2$)

$$C_k(s_4) = C_k(2) = \left(c_{ij}^{(2)} \right)_{M \times M},$$

при наличии уводящей только по дальности помехи ($s_4 = 3$)

$$C_k(s_4) = C_k(3) = \left(c_{ij}^{(3)} \right)_{M \times M} \text{ и т.д.}$$

Зависимость матрицы $E_k(s_k)$ от состояния ГВЦ обусловлена необходимостью учета различных вариантов помеховой обстановки.

Так, при отсутствии помех ($s_4 = 1$)

$$E_k(s_4) = E_k(1) = \text{diag}(0, 0, \dots, 0);$$

при наличии уводящей только по скорости помехи ($s_4 = 2$)

$$E_k(s_4) = E_k(2) = \text{diag}(e_{11}^{(2)}, e_{22}^{(2)}, \dots, e_{MM}^{(2)});$$

при наличии уводящей только по дальности помехи ($s_4 = 3$)

$$E_k(s_4) = E_k(3) = \text{diag}(e_{11}^{(3)}, e_{22}^{(3)}, \dots, e_{MM}^{(3)}).$$

Методика построения линейных моделей динамики ФСК при фиксированном состоянии ГВЦ (1) [нахождения матриц $A_k(s_k)$ и $F_k(s_k)$] на основе результатов летно-экспериментальных исследований, а также сами разработанные модели полета ГВЦ приводятся в [9]. Там же отражены результаты исследования адекватности этих моделей (неадекватность составляет 10...12%).

Способ определения вероятностей переходов ГВЦ (3) из одного состояния в другое приводится в [10]. Если вероятности переходов изменяются во времени, то можно применить способ, основанный на гипотезе кусочного постоянства этих характеристик.

Оценка начального распределения вероятностей состояний ГВЦ в момент ее обнаружения или в момент принятия ее на сопровождения может быть найдена методами математической статистики на основании обработки информации с систем объективного контроля истребителей, регистрирующих параметры взаимного положения и относительного движения групповой цели и истребителя. Например, вероятность стационарного полета ГВЦ в момент ее обнаружения может быть оценена, как частота — отношение числа обнаружений групп целей со стационарным характером полета к общему числу обнаружений по результатам многократного применения истребительной авиации. При отсутствии таких опытных данных искомое распределение может быть найдено методами экспертных оценок или принято равновероятным, как обладающим наибольшей степенью статистической неопределенности. Разрабатываемый алгоритм, как будет показано далее, не является критичным к достоверности начального распределения вероятностей состояний ГВЦ, так как в последующем информация об этих вероятностях многократно корректируется по результатам измерений и показаниям индикаторов.

Таким образом, построена линейная модель обобщенной системы «ГВЦ — БРЛС — индикатор — истребитель» с марковской структурой, отличающаяся от известных одновременным:

- учетом априорных сведений о динамике распознаваемых состояний ГВЦ (устраняет априорную неопределенность) в виде вероятностей переходов (3);
- учетом дополнительной статистической взаимосвязи между ФСК и состоянием ГВЦ: в выражение (1) ФСК x_{k+1} зависят от состояний ГВЦ s_k ;
- учетом различных моделей движения ГВЦ, режимов функционирования и работоспособности БРЛС, видов информационного противодействия посредством зависимости в выражениях (1), (2) матриц $A_k(s_k)$, $F_k(s_k)$, $C_k(s_k)$ и $E_k(s_k)$ от состояния ГВЦ s_k , причем модели могут отличаться как по структуре (составом вектора фазовых координат — количеством его компонент и их физическим смыслом), так и значениями используемых в них параметров;
- учетом дополнительной информации, поступающей от индикатора с моделью (4);
- возможностью представления в (2), (4) информации, поступающей от измерителей ФСК и индикаторов состояния ГВЦ, отличных по физическим принципам от радиолокационных, с целью ее последующего комплексирования с информацией, выдаваемой БРЛС.

Определение конкретных видов зависимостей (1)–(6) с учетом существующих подходов [9, 10] позволяет получить на основе известных результатов теории систем со ССС [7] новые квазиоптимальные рекуррентные алгоритмы для решения задачи совместного сопровождения и распознавания ГВЦ в БРЛС истребителя, отличающиеся повышенной точностью.

Таким образом, задача разработки алгоритма формулируется следующим образом. На основе наблюдений (2) и (4) необходимо получить квазиоптимальный алгоритм, согласно которому будет осуществляться оценка составного вектора (x_k, s_k) функционально-связанных координат x_k и состояния ГВЦ s_k (в общем случае системы «ГВЦ – БРЛС – истребитель – индикатор»).

2. Алгоритм совместного траекторного сопровождения и распознавания состояния групповой воздушной цели на основе линейной модели с марковской структурой и метода двухмоментной параметрической аппроксимации

Пусть обобщенная система «ГВЦ – БРЛС – индикатор – истребитель» [8] описывается линейной моделью с марковской структурой (1)–(6). Тогда на основе известных результатов теории систем со ССС с использованием метода двухмоментной параметрической аппроксимации [7] алгоритм совместного сопровождения и распознавания состояния ГВЦ, примет вид

$$\tilde{p}_{k+1}(s_{k+1}) = \sum_{s_k} q_k(s_{k+1}|s_k) \hat{p}_k(s_k), \quad (7)$$

$$\tilde{x}_{k+1}(s_{k+1}) = \tilde{p}_{k+1}^{-1}(s_{k+1}) \sum_{s_k} q_k(s_{k+1}|s_k) \hat{p}_k(s_k) A_k(s_k) \hat{x}_k(s_k), \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{k+1}(s_{k+1}) = & \tilde{p}_{k+1}^{-1}(s_{k+1}) \sum_{s_k} q_k(s_{k+1}|s_k) \hat{p}_k(s_k) \left\{ A_k(s_k) \hat{R}_k(s_k) A_k^T(s_k) + \right. \\ & \left. + F_k(s_k) G_k F_k^T(s_k) + [\tilde{x}_k(s_{k+1}) - A_k(s_k) \hat{x}_k(s_k)] [\tilde{x}_k(s_{k+1}) - A_k(s_k) \hat{x}_k(s_k)]^T \right\}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\hat{p}_{k+1}(s_{k+1}) = \frac{\alpha_{k+1}(s_{k+1})}{\sum_{s_k} \alpha_{k+1}(s_{k+1})}, \quad (10)$$

$$\hat{x}_{k+1}(s_{k+1}) = \tilde{x}_{k+1}(s_{k+1}) + \tilde{R}_{k+1}(s_{k+1}) C_{k+1}^T(s_{k+1}) \Theta_{k+1}^{-1}(s_{k+1}) \Delta_{k+1}(s_{k+1}), \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \hat{R}_{k+1}(s_{k+1}) = & \tilde{R}_{k+1}(s_{k+1}) - \tilde{R}_{k+1}(s_{k+1}) C_{k+1}^T(s_{k+1}) \times \\ & \times \Theta_{k+1}^{-1}(s_{k+1}) C_{k+1}(s_{k+1}) \tilde{R}_{k+1}(s_{k+1}), \end{aligned} \quad (12)$$

с учетом введенных обозначений

$$\alpha_{k+1}(s_{k+1}) = \tilde{p}_{k+1}(s_{k+1}) \pi_k(r_{k+1}|r_k, s_{k+1}) [\det \Theta_{k+1}(s_{k+1})]^{-1/2} \exp[-h_{k+1}(s_{k+1})], \quad (13)$$

$$\Theta_{k+1}(s_{k+1}) = C_{k+1}(s_{k+1}) \tilde{R}_{k+1}(s_{k+1}) C_{k+1}^T(s_{k+1}) + E_{k+1}(s_{k+1}) Q_{k+1} E_{k+1}^T(s_{k+1}), \quad (14)$$

$$h(s_{k+1}) = \frac{1}{2} \Delta_{k+1}^T(s_{k+1}) \Theta_{k+1}^{-1}(s_{k+1}) \Delta_{k+1}(s_{k+1}), \quad (15)$$

$$\Delta_{k+1}(s_{k+1}) = z_{k+1} - C_{k+1}(s_{k+1}) \tilde{x}(s_{k+1}), \quad (16)$$

где

- $\tilde{p}_{k+1}(s_{k+1})$ и $\hat{p}_{k+1}(s_{k+1})$ — соответственно прогнозируемая на один шаг дискретности вперед и апостериорная вероятности нахождения ГВЦ в состоянии s_{k+1} ;
- $\tilde{x}_{k+1}(s_{k+1})$ и $\hat{x}_{k+1}(s_{k+1})$ — соответственно прогнозируемая на один шаг дискретности вперед условная оценка и апостериорное условное математическое ожидание ФСК при фиксированном состоянии ГВЦ;
- $\tilde{R}_{k+1}(s_{k+1})$ и $\hat{R}_{k+1}(s_{k+1})$ — соответственно прогнозируемая на один шаг дискретности вперед и апостериорная условные ковариационные матрицы вектора ФСК при фиксированном состоянии ГВЦ;
- G_k, Q_k — КМ соответственно векторов шумов возбуждения ξ_k и помех ζ_k ;
- $\Theta_{k+1}(s_{k+1})$ — условная КМ измерения при фиксированном состоянии ГВЦ.

При этом идентификация распознанного состояния ГВЦ и безусловные оценки ФСК \bar{x}_k и R_k вычисляются по формулам:

- оптимальная по критерию максимума апостериорной вероятности оценка состояния ГВЦ

$$\bar{s}_k = \arg \max_{s_k} p_k(s_k); \quad (17)$$

- математическое ожидание ФСК

$$\bar{x}_k = \sum_{s_k} \bar{x}_k(s_k) p(s_k); \quad (18)$$

- ковариационная матрица ФСК

$$R_k = \sum_{s_k} [R_k(s_k) + \bar{x}_k(s_k) \bar{x}_k^T(s_k)] p_k(s_k) - \bar{x}_k \bar{x}_k^T. \quad (19)$$

Таким образом, разработан алгоритм совместного сопровождения и распознавания состояния ГВЦ, на основе линейной модели с марковской структурой и метода двухмоментной параметрической аппроксимации, отличающийся от известных одновременным:

- наличием дополнительного этапа вычисления априорных вероятностей состояний ГВЦ в соответствии с выражением (7) и их учетом в (10) на этапе коррекции;
- учетом на этапе прогноза (7)–(9) априорных данных о динамике распознаваемых состояний ГВЦ в виде вероятностей переходов (3);
- наличием многоканальности соответствующей числу состояний ГВЦ, подлежащих распознаванию: для каждой гипотезы о состоянии групповой цели вычисляются свои условные МО функционально-связанных координат (8), (11) и КМ ошибок оценивания (9), (44);
- учетом различных моделей движения ГВЦ, режимов функционирования и работоспособности БРЛС, видов информационного противодействия посредством использования в выражениях (8), (9), (11), (44) не одного варианта матриц, а семейства матриц для каждой гипотезы относительно текущего состояния ГВЦ;
- комплексным использованием на этапе «коррекция» информации, поступающей от БРЛС, вспомогательных измерителей (2) и индикаторов (4), в том числе отличных по физическим принципам от радиолокационных;
- совместным распознаванием состояния ГВЦ (17) и оцениванием (18), (19) ее ФСК;
- отсутствием необходимости для вычисления оценок \bar{s}_k и \bar{x}_k запоминать результаты наблюдений $z_{\overline{0,k-1}} = z_0, z_1, \dots, z_{k-1}$ и $r_{\overline{0,k-1}} = r_0, r_1, \dots, r_{k-1}$, используя на $k + 1$ шаге счета только два последних измерения: z_k, z_{k+1} и r_k, r_{k+1} (следствие марковского свойства составного вектора $[x_k, s_k, z_k, r_k]$);

- в общем случае, отличием числа измерителей, индикаторов и числа ФСК, состояний ГВЦ, подлежащих оцениванию (часть фазовых координат и состояний ГВЦ могут не наблюдаться непосредственно, а некоторые из фазовых координат и состояний ГВЦ могут измеряться двумя и более датчиками).

Это позволяет при осуществлении совместного сопровождения ФСК и распознавания состояния ГВЦ в БРЛС истребителя дополнительно учитывать:

- закономерности смены различных состояний ГВЦ в случайные моменты времени;
- ограничение допустимых диапазонов скоростей и ускорений летательных аппаратов, образующих ГВЦ, летно-техническими характеристиками их типов или классов;
- ограничение возможных видов огневого и информационного противодействия, а также функционального назначения самолетов в группе их типами и классами.

Разработанный квазиоптимальный алгоритм фильтрации представляет собой обыкновенные рекуррентные уравнения для вероятностей состояний, МО фазовых координат и КМ ошибок их оценивания, в отличие от функциональных интегральных рекуррентных уравнений для плотностей вероятностей составного вектора ФСК и состояния ГВЦ характерных для оптимального алгоритма [7]. Поэтому, в сравнении с оптимальным, реализация разработанного квазиоптимального алгоритма на борту истребителя требует значительно меньших объемов памяти и быстродействия бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ).

Практическая ценность разработанного алгоритма состоит:

- в расширении путем его реализации на борту истребителя функциональных возможностей БРЛС и улучшение ее точностных характеристик по распознаванию таких состояний ГВЦ, как ее численного и типового (классового) составов, функционального назначения самолетов в группе по принципу «ведущий – ведомый», формы боевого порядка (пеленг, клин и т. д.), характера ее полета по принципу «стационарный полет – маневр группой – маневр в группе», видов оказываемого информационного противодействия (уводящие по скорости и/или по дальности помехи), а также фактов и количества запусков ракет;
- в обосновании требований к БЦВМ истребителя по объемам памяти и быстродействию для реализации перспективных квазиоптимальных алгоритмов совместного оценивания–распознавания ГВЦ.

Результаты моделирования [11–13] подобных алгоритмов, основанных на моделях со ССС, в задаче оценивания дальности при сопровождении маневренной воздушной цели в сравнении с алгоритмами, основанными на линейной калмановской фильтрации, свидетельствуют о повышении точности оценивания.

3. Связь полученного алгоритма с линейным фильтром Калмана и совместным оцениванием и различением сигналов на фоне помех

По отношению к полученному алгоритму линейная калмановская фильтрация и алгоритм совместного оценивания и различения сигналов [6] являются частными случаями.

Так, при $n^{(s)} = 1$

$$x_{k+1} = A_k(s_k)x_k + F_k(s_k)\xi_k = A_kx_k + F_k\xi_k, \quad (20)$$

$$z_k = C_k(s_k)x_k + E_k(s_k)\zeta_k = C_kx_k + E_k\zeta_k, \quad (21)$$

$$q_k(s_{k+1}|s_k) = K_{s_{k+1}s_k}K_{s_k1}, \quad (22)$$

$$\pi_{k+1}(r_{k+1}|r_k, s_{k+1}) = \pi_{k+1}(r_{k+1}|r_k, 1) = 1, \quad (23)$$

$$\Phi_k(\xi_k, \zeta_k) \rightarrow G_k, Q_k, \quad (24)$$

$$s_0 = 1, f_0(x_0, s_0) = f_0(x_0) \rightarrow \hat{p}_0(1) = 1, \hat{x}_0, \hat{R}_0, \quad (25)$$

где $n^{(s)}$ — мощность множества состояний ГВЦ, K_{ij} — символ Кронекера, выражения (7)–(19) вырождаются в линейный фильтр Калмана:

прогноз

$$\tilde{p}_{k+1}(s_{k+1}) = \sum_{s_k} K_{s_{k+1}s_k}K_{s_k1}\hat{p}_k(s_k) = K_{s_{k+1}1} \rightarrow \tilde{p}_{k+1}(1) = 1, \quad (26)$$

$$\tilde{x}_{k+1}(s_{k+1}) = K_{s_{k+1}1}^{-1} \sum_{s_k} K_{s_{k+1}s_k}K_{s_k1}A_k(s_k)\hat{x}_k(s_k) \rightarrow \tilde{x}_{k+1}(1) = A_k(1)\hat{x}_k(1), \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{k+1}(s_{k+1}) &= K_{s_{k+1}1}^{-1} \sum_{s_k} K_{s_{k+1}s_k}K_{s_k1}K_{s_k1} \left\{ A_k(s_k)\hat{R}_k(s_k)A_k^T(s_k) + \right. \\ &\quad \left. + F_k(s_k)G_kF_k^T(s_k) + [\tilde{x}_k(s_{k+1}) - A_k(s_k)\hat{x}_k(s_k)] \times \right. \\ &\quad \left. \times [\tilde{x}_k(s_{k+1}) - A_k(s_k)\hat{x}_k(s_k)]^T \right\} \rightarrow \tilde{R}_{k+1}(1) = A_k(1)\hat{R}_k(1)A_k^T(1) + F_k(1)G_kF_k^T(1), \end{aligned} \quad (28)$$

коррекция

$$\begin{aligned} \hat{p}_{k+1}(s_{k+1}) &= \\ &= \frac{K_{s_{k+1}1}\pi_k(r_{k+1}|r_k, s_{k+1})[\det\Theta_{k+1}(s_{k+1})]^{-1/2} \exp[-h_{k+1}(s_{k+1})]}{\sum_{s_{k+1}} K_{s_{k+1}1}\pi_k(r_{k+1}|r_k, s_{k+1})[\det\Theta_{k+1}(s_{k+1})]^{-1/2} \exp[-h_{k+1}(s_{k+1})]} \rightarrow \\ &\rightarrow \hat{p}_{k+1}(1) = 1, \end{aligned} \quad (29)$$

$$\hat{x}_{k+1}(1) = \tilde{x}_{k+1}(1) + \tilde{R}_{k+1}(1)C_{k+1}^T(1)\Theta_{k+1}^{-1}(1)[z_{k+1} - C_{k+1}(1)\tilde{x}(1)], \quad (30)$$

$$\hat{R}_{k+1}(1) = \tilde{R}_{k+1}(1) - \tilde{R}_{k+1}(1)C_{k+1}^T(1)\Theta_{k+1}^{-1}(1)C_{k+1}(1)\tilde{R}_{k+1}(1), \quad (31)$$

где

$$\Theta_{k+1}(1) = C_{k+1}(1)\tilde{R}_{k+1}(1)C_{k+1}^T(1) + E_{k+1}(1)Q_{k+1}E_{k+1}^T(1). \quad (32)$$

А при

$$x_{k+1} = A_k(s_k)x_k + F_k(s_k)\xi_k = A_k(s_k)x_k + F_k\xi_k, \quad (33)$$

$$z_k = C_k(s_k)x_k + E_k(s_k)\zeta_k = C_k(s_k)x_k + E_k\zeta_k, \quad (34)$$

$$q_k(s_{k+1}|s_k) = K_{s_{k+1}s_k}, \quad (35)$$

$$\pi_{k+1}(r_{k+1}|r_k, s_{k+1}) = 1/n^{(s)}, \quad (36)$$

$$\Phi_k(\xi_k, \zeta_k) \rightarrow G_k, Q_k, \quad (37)$$

$$f_0(x_0, s_0) \rightarrow \hat{p}_0(s_k), \hat{x}_0(s_k), \hat{R}_0(s_k) \quad (38)$$

и нормированной функции потерь [2], выражения (7)–(19) превращаются в приближенно-оптимальное, по критерию минимума среднего риска и максимума апостериорной вероятности, решение задачи типа «совместного различения сигналов и оценки их параметров на фоне помех» [6]:

прогноз

$$\tilde{p}_{k+1}(s_{k+1}) = \sum_{s_k} K_{s_{k+1}s_k} \hat{p}_k(s_k) = K_{s_{k+1}s_k} \hat{p}_k(s_k), \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{k+1}(s_{k+1}) &= K_{s_{k+1}s_k} \hat{p}_k^{-1}(s_k) \sum_{s_k} K_{s_{k+1}s_k} \hat{p}_k(s_k) A_k(s_k) \hat{x}_k(s_k) = \\ &= K_{s_{k+1}s_k} A_k(s_k) \hat{x}_k(s_k), \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{k+1}(s_{k+1}) &= K_{s_{k+1}s_k} \hat{p}_k^{-1}(s_k) \sum_{s_k} K_{s_{k+1}s_k} \hat{p}_k(s_k) [A_k(s_k) \hat{R}_k(s_k) A_k^T(s_k) + \\ &+ F_k(s_k) G_k F_k^T(s_k)] = K_{s_{k+1}s_k} [A_k(s_k) \hat{R}_k(s_k) A_k^T(s_k) + F_k(s_k) G_k F_k^T(s_k)], \end{aligned} \quad (41)$$

коррекция

$$\begin{aligned} \hat{p}_{k+1}(s_{k+1}) &= \\ &= \frac{\tilde{p}_{k+1}(s_{k+1}) [\det \Theta_{k+1}(s_{k+1})]^{-1/2} \exp[-h_{k+1}(s_{k+1})]}{\sum_{s_{k+1}} \tilde{p}_{k+1}(s_{k+1}) [\det \Theta_{k+1}(s_{k+1})]^{-1/2} \exp[-h_{k+1}(s_{k+1})]}, \end{aligned} \quad (42)$$

$$\hat{x}_{k+1}(s_{k+1}) = \tilde{x}_{k+1}(s_{k+1}) + \tilde{R}_{k+1}(s_{k+1}) C_{k+1}^T(s_{k+1}) \Theta_{k+1}^{-1}(s_{k+1}) \Delta_{k+1}(s_{k+1}), \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \hat{R}_{k+1}(s_{k+1}) &= \tilde{R}_{k+1}(s_{k+1}) - \tilde{R}_{k+1}(s_{k+1}) C_{k+1}^T(s_{k+1}) \times \\ &\times \Theta_{k+1}^{-1}(s_{k+1}) C_{k+1}(s_{k+1}) \tilde{R}_{k+1}(s_{k+1}) \end{aligned} \quad (44)$$

с учетом введенных обозначений (14)–(16) и безусловных оценок (17)–(19).

Заключение

Таким образом, разработан метод распознавания состояния групповой воздушной цели на основе модели со случайной скачкообразной структурой, отличающийся от известных новым решающим правилом, реализуемым в алгоритме (7)–(19).

Для этого разработана линейная модель системы «ГВЦ – БРЛС – индикатор – истребитель» с марковской структурой, отличающаяся от существующих учетом априорных сведений о динамике распознаваемых состояний ГВЦ, учетом различных моделей движения ГВЦ, режимов функционирования и работоспособности БРЛС, видов информационного противодействия, а также учетом дополнительной информации, поступающей от индикатора.

Разработан алгоритм совместного сопровождения и распознавания состояния ГВЦ на основе линейной модели с марковской структурой и метода двухмоментной параметрической аппроксимации, отличающийся от известных одновременным наличием дополнительного этапа прогнозирования вероятностей состояний ГВЦ, многоканальностью по числу состояний ГВЦ, подлежащих распознаванию, учетом дополнительной статистической взаимосвязи между ФСК и состоянием ГВЦ, а также комплексированием информации, поступающей от БРЛС и индикаторов. Несмотря на линейность моделей динамики фазовых координат и измерений бортовой станции, полученный алгоритм нелинеен. Это объясняется зависимостью оценки фазовых координат от случайного состояния групповой цели.

Линейная калмановская фильтрация и алгоритм совместного оценивания и различения сигналов на фоне помех являются частными случаями полученного алгоритма соответственно при (20)–(25) и (33)–(38).

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что реализация разработанного метода распознавания на борту истребителя позволит расширить информационные возможности БРЛС и улучшить ее точностные характеристики по сопровождению ГВЦ и распознаванию таких ее состояний как численный и типовой (классовый) составы, характер полета по принципу «стационарный полет – маневр группой – маневр в группе», вид оказываемого информационного противодействия, а также количество пущенных ракет. Улучшение точностных характеристик БРЛС достигается за счет адаптации процесса сопровождения ГВЦ к изменениям воздушно-целевой обстановки.

Основными направлениями для дальнейших исследований по оптимальной обработке информации в интересах повышения эффективности БРЛС истребителя по сопровождению и распознаванию ГВЦ являются:

- разработка оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов управления системой «ГВЦ – БРЛС – индикатор – истребитель» со ССС;
- разработка оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов игрового управления системой «ГВЦ – БРЛС – индикатор – истребитель» со ССС.

Список литературы

- [1] Богданов А.В., Коротков С.С., Кучин А.А., Бондарев В.Н., Лютиков И.В. Концепция распознавания воздушных целей в авиационном радиолокационном комплексе // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2016. Т. 9, № 3. С. 320–331.

- [2] Богданов А.В., Бондарев В.Н., Васильев О.В., Гарин Е.Н., Закомолдин Д.В., Коротков С.С., Лютиков И.В., Ляпоров В.Н. Синтез оптимальных алгоритмов распознавания групповых воздушных целей в радиолокационных системах воздушного базирования // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2017. Т. 10, № 2. С. 155–168.
- [3] Богданов А.В., Голубенко В.А., Княжев А.И., Филонов А.А. Алгоритм совместного траекторного сопровождения-распознавания функционального назначения самолетов, летящих в сомкнутом боевом порядке // Системы радиоуправления. Т. 5. М.: Радиотехника, 2018. С. 169–174.
- [4] Богданов А.В., Филонов А.А., Ковалев А.А., Кучин А.А., Лютиков И.В. Методы самонаведения истребителей и ракет класса «воздух-воздух» на групповую воздушную цель. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2014. 168 с.
- [5] Богданов А.В., Филонов А.А., Ибрагим А.К. Методы распознавания одиночных и групповых воздушных целей в наземных радиолокационных системах на этапе оценки воздушной целевой обстановки. Тверь: ВА ВКО, 2012. 92 с.
- [6] Трифонов А.П., Шинаков Ю.С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
- [7] Бухалев В.А. Оптимальное сглаживание в системах со случайной скачкообразной структурой. М.: Физматлит, 2013. 188 с.
- [8] Федотов А.Ю. Групповая воздушная цель как система со случайной скачкообразной структурой при совместном сопровождении и распознавании ее состояния в бортовой радиолокационной станции истребителя // Сборник трудов IV Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки», Авиатор (16–17 февраля 2017 года). Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018.
- [9] Богданов А.В., Закомолдин Д.В., Кочетов И.В., Федотов А.Ю. Динамические модели радиальных скоростей и ускорений пары воздушных целей, летящих в сомкнутом боевом порядке // Труды ГосНИИАС. Серия: Вопросы авионики. 2018. Т. 4, № 37. С. 50–62.
- [10] Казаков И.Е., Артемьев В.М., Бухалев В.А. Анализ систем случайной структуры. М.: Физматлит, 1993. 272 с.
- [11] Шатовкин Р.Р., Полукаров А.А., Малышев В.А. Исследование эффективности функционирования радиолокационно-оптического дальномера с текущей коррекцией прогноза // Системы радиоуправления. Под ред. В.И. Меркулова. Т. 5. М.: Радиотехника, 2018. С. 24–29.
- [12] Шатовкин Р.Р., Данилов С.Н. Алгоритм оценивания дальности при сопровождении маневренной воздушной цели на основе модели со случайной скачкообразной структурой // Системы радиоуправления. Под ред. В.И. Меркулова. Т. 5. М.: Радиотехника, 2018. С. 30–36.

- [13] Данилов С.Н., Шатовкин Р.Р. Сопровождение маневрирующей цели при подавлении канала измерения скорости // Системы радиуправления. Под ред. В.И. Меркулова. Т. 5. М.: Радиотехника, 2018. С. 37–40.

Образец цитирования

Филонов А.А., Кучин А.А., Федотов А.Ю., Скрынников А.А. Метод распознавания состояния групповой воздушной цели на основе модели со случайной скачкообразной структурой // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2019. № 1. С. 62–82. <https://doi.org/10.26456/vtprm513>

Сведения об авторах

1. **Филонов Андрей Александрович**

профессор кафедры автоматизированных систем управления (и связи) военной академии воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г.К. Жукова.

Россия, 170100, г. Тверь, ул. Жигарева, д. 50, ВА ВКО им. Г.К. Жукова.

2. **Кучин Александр Александрович**

заместитель начальника кафедры основ построения радиоэлектронных средств и систем Военной академии воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г.К. Жукова.

Россия, 170100, г. Тверь, ул. Жигарева, д. 50, ВА ВКО им. Г.К. Жукова.

3. **Федотов Александр Юрьевич**

адъюнкт кафедры автоматизированных систем управления (и связи) военной академии воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г.К. Жукова.

Россия, 170100, г. Тверь, ул. Жигарева, д. 50, ВА ВКО им. Г.К. Жукова.

4. **Скрынников Андрей Александрович**

начальник сектора Государственного научно-исследовательского института авиационных систем.

Россия, 125319, г. Москва, ул. Викторенко, д. 7, ГосНИИАС.

THE METHOD OF RECOGNITION OF THE STATE OF A GROUP AIR TARGET ON THE BASIS OF A MODEL WITH A RANDOM JUMP-LIKE STRUCTURE

Filonov Andrey Alexandrovich

Professor at the Department of Automated Control Systems (and Communications),
Military Aerospace Defense Academy
named after Marshal of the Soviet Union G.K. Zhukov
Russia, 170100, Tver, 50 Zhigareva str., MADA.

Kuchin Alexander Alexandrovich

Deputy Head of the Department of Fundamentals of the Construction of Radio
Electronic Equipment and Systems, Military Aerospace Defense Academy named
after Marshal of the Soviet Union G.K. Zhukov
Russia, 170100, Tver, 50 Zhigareva str., MADA.

Fedotov Alexander Yurievich

Adjunct at the Department of Automated Control Systems (and Communications),
Military Aerospace Defense Academy
named after Marshal of the Soviet Union G.K. Zhukov
Russia, 170100, Tver, 50 Zhigareva str., MADA.

Skrynnikov Andrey Alexandrovich

Head of Sector, State Research Institute of Aviation Systems
Russia, 125319, Moscow, 7 Viktorenko str., GosNIAS.

Received 19.11.2018, revised 10.02.2019.

The relevance of the research topic is due to the presence of inconsistencies of pragmatic and scientific character. The inconsistency in practice lies between the need and the possibility of improving the characteristics of an onboard radar station (BRLS) of a fighter to recognize the states of group air targets (MCC) and the insufficient level of its algorithmic support. To improve the information capabilities of the fighter radar, the article solves an urgent scientific problem, which is to develop a method for recognizing the states of the MCC that takes into account a priori information about their change. In accordance with the theory of systems with a random hopping structure, a new decision rule (algorithm) has been obtained, which is the novelty of the developed method. The simulation results of this algorithm indicate an increase in the probability of correct recognition by 15%.

Keywords: clustered air target, identification method, random jump structure system.

Citation

Filonov A.A., Kuchin A.A., Fedotov A.Yu., Skrynnikov A.A., "The method of recognition of the state of a group air target on the basis of a model with a

random jump-like structure”, *Vestnik TverGU. Seriya: Prikladnaya Matematika [Herald of Tver State University. Series: Applied Mathematics]*, 2019, № 1, 62–82 (in Russian).
<https://doi.org/10.26456/vtpmk513>

References

- [1] Bogdanov A.V., Korotkov S.S., Kuchin A.A., Bondarev V.N., Lyutikov I.V., “The concept of recognition of airborne targets in the aviation radar complex”, *Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii [Journal SFU. Technics and technology]*, **9:3** (2016), 320–331 (in Russian).
- [2] Bogdanov A.V., Bondarev V.N., Vasilev O.V., Garin E.N., Zakomoldin D.V., Korotkov S.S., Lyutikov I.V., Lyaporov V.N., “Sintez optimalnykh algoritmov raspoznavaniya gruppovykh vozdushnykh tselej v radiolokatsionnykh sistemakh vozdušnogo bazirovaniya”, *Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii [Journal SFU. Technics and technology]*, **10:2** (2017), 155–168 (in Russian).
- [3] Bogdanov A.V., Golubenko V.A., Knyazhev A.I., Filonov A.A., “Algorithm of joint trajectory accompaniment-recognition of the functional purpose of airplanes flying in close combat order”, *Sistemy radioupravleniya [Radio control systems]*. V. 5, Radiotekhnika Publ., Moscow, 2018, 169–174 (in Russian).
- [4] Bogdanov A.V., Filonov A.A., Kovalev A.A., Kuchin A.A., Lyutikov I.V., *Metody samonavedeniya istrebitelej i raket klassa “vozdukh-vozdukh” na gruppovuyu vozdušnuyu tsel [Methods of homing fighters and air-to-air missiles on a group air target]*, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 2014 (in Russian), 168 pp.
- [5] Bogdanov A.V., Filonov A.A., Ibragim A.K., *Metody raspoznavaniya odinochnykh i gruppovykh vozdushnykh tselej v nazemnykh radiolokatsionnykh sistemakh na etape otsenki vozdušnoj tselevoj obstanovki [Methods for the recognition of single and group air targets in ground-based radar systems at the stage of assessing the air target situation]*, VA VKO Publ., Tver, 2012 (in Russian), 92 pp.
- [6] Trifonov A.P., Shinakov Yu.S., *Sovmestnoe razlichenie signalov i otsenka ikh parametrov na fone pomekh [Combined discrimination of signals and evaluation of their parameters against the background of noise]*, Radio i Svyaz Publ., Moscow, 1986 (in Russian), 264 pp.
- [7] Bukhalev V.A., *Optimalnoe sglazhivanie v sistemakh so sluchajnoj skachkoobraznoj strukturoj*, Fizmatlit Publ., Moscow, 2013 (in Russian), 188 pp.
- [8] Fedotov A.Yu., “Group air target as a system with a random hopping structure with joint tracking and recognition of its state in the onboard fighter radar station”, *Sbornik trudov IV VNPk “Avionika” [Proceedings of the IV VNPk “Avionics”]*, Aviator (16–17 fevralya 2017 goda), VUNTs VVS “VVA”, Voronezh, 2018 (in Russian).
- [9] Bogdanov A.V., Zakomoldin D.V., Kochetov I.V., Fedotov A.Yu., “Dynamic models of radial velocities and accelerations of a pair of aerial targets flying in close combat order”, *Trudy GosNIAS. Seriya: Voprosy avioniki [Proceedings of GosNIAS. Series: Avionics Issues]*, **4:37** (2018), 50–62 (in Russian).

- [10] Kazakov I.E., Artemev V.M., Bukhalev V.A., *Analiz sistem sluchajnoj struktury [Analysis of Random Structure Systems]*, Fizmatlit Publ., Moscow, 1993 (in Russian), 272 pp.
- [11] Shatovkin R.R., Polukarov A.A., Malyshev V.A., “Investigation of the performance of the radar-optical rangefinder with the current forecast correction”, *Sistemy radioupravleniya [Radio control systems]*. V. 5, ed. V.I. Merkulov, Radiotekhnika Publ., Moscow, 2018, 24–29 (in Russian).
- [12] Shatovkin R.R., Danilov S.N., “Algorithm for estimating the range when accompanied by a maneuverable airborne target based on a model with a random jump structure”, *Sistemy radioupravleniya [Radio control systems]*. V. 5, ed. V.I. Merkulov, Radiotekhnika Publ., Moscow, 2018, 30–36 (in Russian).
- [13] Danilov S.N., Shatovkin R.R., “Accompanying a maneuvering target while suppressing a speed measurement channel”, *Sistemy radioupravleniya [Radio control systems]*. V. 5, ed. V.I. Merkulov, Radiotekhnika Publ., Moscow, 2018, 37–40 (in Russian).