

**АЛГОРИТМ СОПРОВОЖДЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО СВЯЗАННЫХ КООРДИНАТ И РАСПОЗНАВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «ГВЦ – БРЛС – ИНДИКАТОР – ИСТРЕБИТЕЛЬ» СО СЛУЧАЙНОЙ СКАЧКООБРАЗНОЙ СТРУКТУРОЙ ПРИ БАЙЕСОВСКОМ КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОСТИ<sup>1</sup>**

**Скрынников А.А.\* , Федотов А.Ю.\*\* , Лобанов А.А.\*\* , Ткачева О.О.\*\* ,  
Викулова Ю.М.\*\***

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

\*\*Военная академия воздушно-космической обороны

имени Маршала Советского Союза Г.К. Жукова, г. Тверь

\*\*\*АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца», г. Москва

---

*Поступила в редакцию 26.02.2019, после переработки 29.05.2019.*

---

Актуальность работы обусловлена тем, что отсутствие оптимального алгоритма сопровождения функционально связанных координат (ФСК) и распознавания состояний групповой воздушной цели (ГВЦ), учитывающего априорные сведения о их смене, ведет к занижению информационных возможностей бортовой радиолокационной станции (БРЛС) истребителя. Для улучшения характеристик БРЛС по оценке воздушной целевой обстановки в статье при байесовском критерии оптимальности разрабатывается новый алгоритм сопровождения ФСК и распознавания состояния системы «ГВЦ – БРЛС – индикатор – истребитель» со случайной скачкообразной структурой. Для этого на основании формулы Байеса и марковского свойства рассматриваемых случайных процессов находятся выражения для апостериорных оценок ФСК и состояния ГВЦ.

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

*Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2019. № 2. С. 57–69.*  
<https://doi.org/10.26456/vtprm532>

## **Введение**

Опыт применения авиации в современных вооруженных конфликтах показывает, что эффективность истребителя в значительной степени определяется информационными возможностями его бортовой радиолокационной станции (БРЛС) по обнаружению, разрешению, сопровождению и распознаванию воздушных целей.

---

<sup>1</sup>Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №19-08-00487а).

В [1] обосновывается необходимость в наличии на борту истребителя дополнительной информации об одиночных, групповых и разделяющихся воздушных целях в интересах поддержки принятия решений летчиком и оптимизации наведения ракет. В частности, востребована информация о следующих состояниях групповой воздушной цели (ГВЦ):

- численный состав (как правило, кратен двум);
- классовый состав по принципу «самолет с турбореактивным двигателем – самолет с турбовинтовым двигателем – вертолёт – ракета»;
- типовой состав (однотипные и разнотипные самолеты в группе);
- характер полета по принципу «стационарный полёт – манёвр в группе – манёвр составом группы»;
- функциональное назначение самолётов в группе по принципу «ведущий – ведомый» в основных формах боевого порядка «пеленг», «клин», «фронт»;
- факт разделения по принципу «произошло – не произошло»;
- характер разделения «по скорости – по направлению»;
- количество пущенных ракет;
- направление полета ракет по принципу «на меня – не на меня».

Результаты лётно-экспериментальных исследований [2–4] и анализ информационных свойств радиолокационных сигналов, отраженных от реальных воздушных целей, подтверждают принципиальную возможность распознавания требуемых состояний.

Так в [5] при байесовском критерии оптимальности синтезированы алгоритмы распознавания на этапе вторичной обработки сигналов численного и типового состава ГВЦ, характера ее полета в радиолокационных системах воздушного базирования, построенных по импульсно-доплеровскому принципу обработки сигналов с длительным временем их когерентного накопления.

Однако, следствием применения в разработанных алгоритмах положений теории совместного различения и оценивания сигналов на фоне помех явились следующие ограничения и допущения:

- предполагается, что состояние групповой цели не меняется на интервале наблюдения;
- не учитываются априорные сведения о смене состояний ГВЦ;
- не учитывается статистическая зависимость состояния ГВЦ от функционально связанных координат (ФСК);
- не учитываются показания дополнительных источников информации – индикаторов (обнаружителей) состояния ГВЦ;
- оценки, для которых получены аналитические выражения, являются не оптимальными, а условно оптимальными.

При этом на практике имеет место:

- смена состояний ГВЦ в случайные моменты времени;
- возможность выявления и описания закономерностей смены различных состояний ГВЦ во времени;
- зависимость численного состава ГВЦ, функционального назначения самолетов группы, формы ее боевого порядка, характера полета, вида ставимых помех, фактов пуска ракет, их количества и направления полета от радиальных дальностей, скоростей и ускорений;
- 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;
- возможность комплексирования измерений БРЛС с показаниями индикаторов (например, информационного или огневого противодействия).

Целью статьи является синтез общего алгоритма совместного траекторного сопровождения функционально связанных координат и распознавания состояния системы «ГВЦ – БРЛС – индикатор – истребитель» со случайной скачкообразной структурой (ССС) при байесовском критерии оптимальности в интересах повышения достоверности оценок путем устранения выявленных несоответствий.

Под групповой воздушной целью (ГВЦ) в рамках решаемой задачи понимается определенным образом функционально связанное в пространстве расположение средств воздушного нападения, находящихся в главном луче диаграммы направленности БРЛС истребителя и действующих по единому тактическому замыслу.

Под функционально связанными координатами (ФСК) понимаются дальности до элементов ГВЦ, радиальные скорости и ускорения взаимного сближения самолетов группы и истребителя – носителя БРЛС, а также дистанции между самолетами в боевых порядках.

### 1. Алгоритм оценивания фазовых координат и состояния групповой воздушной цели при байесовском подходе на основе модели со случайной скачкообразной структурой

Пусть обобщенная система «ГВЦ – БРЛС – индикатор – истребитель» [6] описывается следующей математической моделью со случайной скачкообразной структурой (ССС) [7–9]

- для линейной динамики ФСК

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

– для их измерений в БРЛС и вспомогательных измерителях

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

– для динамики состояния ГВЦ

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

– для индикатора состояния обобщенной системы

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

– для неуправляемых случайных возмущений и помех

$$\Phi_k(\xi_k, \zeta_k), \quad (5)$$

при начальных условиях

$$f_0(x_0, s_0), \quad (6)$$

где

- $k$  – дискретный момент времени;
- $x_k$  – вектор ФСК;
- $s_k$  – вектор состояний ГВЦ;
- $z_k$  – вектор измерений ФСК;
- $r_k$  – вектор индикации состояния ГВЦ;
- $\xi_k$  – вектор возмущений, действующих на объект (дискретный белый шум);
- $\zeta_k$  – вектор помех измерению;
- $\varphi_k(\cdot), \psi_k(\cdot)$  – известные векторные детерминированные функции случайных аргументов;
- $q_k(\cdot), \pi_{k+1}(\cdot)$  – известные условные вероятности переходов;
- $\Phi_k(\xi_k, \zeta_k)$  – совместная функция распределения возмущений и помех;
- $f_0(x_0, s_0)$  – начальная совместная плотность вероятности ФСК и состояния ГВЦ.

Оптимальная оценка составного вектора  $(x_k, s_k)$  функционально связанных координат  $x_k$  и состояния ГВЦ  $s_k$ , на основе наблюдений БРЛС, вспомогательных измерителей  $z_{\overline{0,k}} = z_0, z_1, \dots, z_k$  и индикатора  $r_{\overline{0,k}} = r_0, r_1, \dots, r_k$  на интервале  $[0, k]$ , при байесовском критерии оптимальности

$$(\hat{x}_k, \hat{s}_k)_\delta = \arg \inf_{\bar{x}_k, \bar{s}_k} R(\bar{x}_k, \bar{s}_k; z_{\overline{0,k}}, r_{\overline{0,k}}), \quad (7)$$

заключается в определении такой его оценки, для которой минимален апостериорный риск  $R(\bar{x}_k, \bar{s}_k; z_{0,k}, r_{0,k})$  (среднее значение выбранной функции потерь по апостериорной плотности вероятности) [10], определяемый как

$$R(\bar{x}_k, \bar{s}_k; z_{0,k}, r_{0,k}) = \sum_{s_k} \int_{-\infty}^{\infty} \Pi(\bar{x}_k, \bar{s}_k; x_k, s_k) f(x_k, s_k | z_{0,k}, r_{0,k}) dx_k, \quad (8)$$

где  $\Pi(\bar{x}_k, \bar{s}_k; x_k, s_k)$  – функция потерь, характеризующая потери при использовании оценок  $(\bar{x}_k, \bar{s}_k)$ , в то время, когда истинные значения векторов ФСК и состояний ГВЦ равны  $(x_k, s_k)$ ;  $f(x_k, s_k | z_{0,k}, r_{0,k})$  – апостериорная плотность вероятности составного вектора состояния, включающего вектор ФСК и вектор состояния ГВЦ, при фиксированном наблюдении  $(z_{0,k}, r_{0,k})$ , которая определяется на основании формулы Байеса [7, 8]

$$\begin{aligned} f(x_{k+1}, s_{k+1} | z_{0,k+1}, r_{0,k+1}) &= f(x_{k+1}, s_{k+1} | z_{k+1}, r_{k+1}; z_{0,k}, r_{0,k}) = \\ &= \frac{f(z_{k+1}, r_{k+1} | x_{k+1}, s_{k+1}, z_{0,k}, r_{0,k}) f(x_{k+1}, s_{k+1} | z_{0,k}, r_{0,k})}{f(z_{k+1}, r_{k+1} | z_{0,k}, r_{0,k})}, \end{aligned} \quad (9)$$

где

- $f(z_{k+1}, r_{k+1} | x_{k+1}, s_{k+1}, z_{0,k}, r_{0,k})$  – условная плотность вероятности вектора наблюдения  $(z_{k+1}, r_{k+1})$  при каждом фиксированном значении оцениваемого составного вектора  $(x_{k+1}, s_{k+1})$  и истории наблюдения  $(z_{0,k}, r_{0,k})$ ;
- $f(z_{k+1}, r_{k+1} | z_{0,k}, r_{0,k})$  – априорная плотность вероятности сигналов в БРЛС и индикаторе;
- $f(x_{k+1}, s_{k+1} | z_{0,k}, r_{0,k})$  – прогнозируемая (априорная) плотность вероятности составного вектора состояния  $(x_{k+1}, s_{k+1})$ , при фиксированном наблюдении  $(z_{0,k}, r_{0,k})$ .

На основании (1)–(4) в силу марковского свойства случайного процесса  $\{x_k, s_k, z_k, r_k\}$  из (9) получаем

$$\begin{aligned} f(x_{k+1}, s_{k+1} | z_{0,k+1}, r_{0,k+1}) &= f(x_{k+1}, s_{k+1} | z_{k+1}, r_{k+1}; z_k, r_k) = \\ &= \frac{f(z_{k+1}, r_{k+1} | x_{k+1}, s_{k+1}; z_k, r_k) f(x_{k+1}, s_{k+1} | z_k, r_k)}{f(z_{k+1}, r_{k+1} | z_k, r_k)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Для определения функции потерь в формуле (8) введем в рассмотрение нормированные потери [5], равные нулю при одновременном выполнении следующих условий:

- вектор ФСК оценен правильно;
- состояние ГВЦ определено правильно.

Если любая из компонент вектора ФСК или вектора состояния ГВЦ оценена неверно, то потери должны быть равны единице. При этом правильная оценка вектора ФСК  $x_k$  будет иметь место только в том случае, когда модуль разности

истинного значения вектора  $x_k$  и его оценки  $\bar{x}_k$  не будет превосходить некоторой величины  $\varepsilon$ , которая определяется ошибками сопровождения фазовых координат.

Исходя из этого, нормированная функция потерь для вектора состояний ГВЦ, состоящего из  $N$  компонент, и вектора ФСК, состоящего из  $M$  компонент, примет вид

$$\begin{aligned} \Pi(\bar{x}_k, \bar{s}_k; x_k, s_k) &= 1 - \prod_{i=1}^N K_{\bar{s}_k^{(i)} s_k^{(i)}} \prod_{j=1}^M [1 - \chi(|\bar{F}_j - F_j| - \varepsilon)] = \\ &= 1 - \prod_{i=1}^N K_{\bar{s}_k^{(i)} s_k^{(i)}} \prod_{j=1}^M (\chi(\varepsilon - |\bar{F}_j - F_j|), \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} - K_{ij} &= \begin{cases} 1, & \text{при } i = j, \\ 0, & \text{при } i \neq j, \end{cases} \quad - \text{символ Кронекера;} \\ - \chi(x) &= \begin{cases} 1, & \text{при } x \geq 0, \\ 0, & \text{при } x < 0, \end{cases} \quad - \text{функция Хевисайда;} \end{aligned}$$

-  $F_j$  и  $\bar{F}_j$  - соответственно  $j$ -ые компоненты векторов истинных ФСК (например, доплеровских частот планерных и первых компрессорных составляющих спектра радиолокационного сигнала, отраженного от ГВЦ) и их наблюдений.

На основании (8) и (11) нормированный апостериорный риск примет следующий вид

$$\begin{aligned} R(\bar{x}_k, \bar{s}_k; z_{\overline{0,k}}, r_{\overline{0,k}}) &= \\ &= \sum_{s_k} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ 1 - \prod_{i=1}^N K_{\bar{s}_k^{(i)} s_k^{(i)}} \prod_{j=1}^M \chi(\varepsilon - |\bar{F}_j - F_j|) \right] f(x_k, s_k | z_{\overline{0,k}}, r_{\overline{0,k}}) dx_k = \\ &= \sum_{s_k} \int_{-\infty}^{\infty} f(x_k, s_k | z_{\overline{0,k}}, r_{\overline{0,k}}) dx_k - \\ &- \sum_{s_k} \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^N K_{\bar{s}_k^{(i)} s_k^{(i)}} \prod_{j=1}^M \chi(\varepsilon - |\bar{F}_j - F_j|) f(x_k, s_k | z_{\overline{0,k}}, r_{\overline{0,k}}) dx_k. \end{aligned}$$

С учетом того, что первое слагаемое равно единице:

$$\begin{aligned} R(\bar{x}_k, \bar{s}_k; z_{\overline{0,k}}, r_{\overline{0,k}}) &= \\ &= 1 - \sum_{s_k} \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^N K_{\bar{s}_k^{(i)} s_k^{(i)}} \prod_{j=1}^M \chi(\varepsilon - |\bar{F}_j - F_j|) f(x_k, s_k | z_{\overline{0,k}}, r_{\overline{0,k}}) dx_k. \end{aligned}$$

Интеграл в правой части отличен от нуля только при  $|\bar{F}_j - F_j| \leq \varepsilon, j = \overline{1, M}$ , а множитель  $\prod_{i=1}^N K_{\bar{s}_k^{(i)} s_k^{(i)}}$  отличен от нуля только при условии  $\bar{s}_k = s_k$ . При выполнении этих условий выражение преобразуется к виду

$$R(\bar{x}_k, \bar{s}_k; \overline{z_{0,k}}, \overline{r_{0,k}}) = 1 - \int_{|\bar{x}_k - x_k| < \varepsilon} f(x_k, \bar{s}_k | \overline{z_{0,k}}, \overline{r_{0,k}}) dx_k. \quad (12)$$

Подставляя формулу (10) в выражение (12), получаем

$$\begin{aligned} R(\bar{x}_{k+1}, \bar{s}_{k+1}; \overline{z_{0,k+1}}, \overline{r_{0,k+1}}) &= 1 - f^{-1}(z_{k+1}, r_{k+1} | z_k, r_k) \times \\ &\times \int_{|\bar{x}_k - x_k| < \varepsilon} f(z_{k+1}, r_{k+1} | x_{k+1}, \bar{s}_{k+1}, z_k, r_k) f(x_{k+1}, \bar{s}_{k+1} | z_k, r_k) dx_{k+1}. \end{aligned} \quad (13)$$

Из анализа выражений (12), (13) следует, что минимизация (7) апостериорного риска достигается путем максимизации величины интеграла в правой части полученного выражения. В результате совместная оптимальная по критерию минимума апостериорного риска оценка  $(\hat{x}_k, \hat{s}_k)_\delta$  будет определяться, как

$$\begin{aligned} (\hat{x}_{k+1}, \hat{s}_{k+1})_\delta &= \arg \max_{s_{k+1}} \sup_{\bar{x}_{k+1}} \left\{ \int_{|\bar{x}_{k+1} - x_{k+1}| < \varepsilon} f(x_{k+1}, s_{k+1} | \overline{z_{0,k+1}}, \overline{r_{0,k+1}}) dx_{k+1} \right\} = \\ &= \arg \max_{s_{k+1}} \sup_{\bar{x}_{k+1}} \left\{ \int_{|\bar{x}_{k+1} - x_{k+1}| < \varepsilon} f(z_{k+1}, r_{k+1} | x_{k+1}, s_{k+1}, z_k, r_k) \times \right. \\ &\quad \left. \times f(x_{k+1}, s_{k+1} | z_k, r_k) dx_{k+1} \right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

При условии унимодальности апостериорной плотности вероятности [5] на этапе сопровождения ГВЦ в (14) можно опустить знак интеграла. С учетом этого имеем

$$\begin{aligned} (\hat{x}_{k+1}, \hat{s}_{k+1})_\delta &= \arg \max_{s_{k+1}} \sup_{x_{k+1}} \left\{ f(x_{k+1}, s_{k+1} | \overline{z_{0,k+1}}, \overline{r_{0,k+1}}) \right\} = \\ &= \arg \max_{s_{k+1}} \sup_{x_{k+1}} \left\{ f(z_{k+1}, r_{k+1} | x_{k+1}, s_{k+1}, z_k, r_k) f(x_{k+1}, s_{k+1} | z_k, r_k) \right\}, \end{aligned}$$

из чего можно сделать вывод, что при выбранной нормированной функции потерь совместная оценка по критерию минимума апостериорного риска совпадает с оценкой по критерию максимума апостериорной вероятности.

На основании теоремы умножения вероятностей

$$\begin{aligned} f(x_{k+1}, s_{k+1} | \overline{z_{0,k+1}}, \overline{r_{0,k+1}}) &= \\ &= p(s_{k+1} | \overline{z_{0,k+1}}, \overline{r_{0,k+1}}) f(x_{k+1} | s_{k+1}, \overline{z_{0,k+1}}, \overline{r_{0,k+1}}) = \\ &= f(x_{k+1} | \overline{z_{0,k+1}}, \overline{r_{0,k+1}}) p(s_{k+1} | x_{k+1}, \overline{z_{0,k+1}}, \overline{r_{0,k+1}}), \end{aligned}$$

из чего следует, что получение оптимальной оценки составного вектора  $(x_k, s_k)$  ФСК  $x_k$  и состояния ГВЦ  $s_k$  на основе наблюдений  $(z_{0,k+1}, r_{0,k+1})$  при байесовском критерии оптимальности может осуществляться в три этапа:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{x}_{k+1}(s_{k+1}) = \arg \sup_{x_{k+1}} f(x_{k+1}|s_{k+1}, z_{0,k+1}, r_{0,k+1}), \\ \hat{s}_{k+1} = \arg \max_{s_{k+1}} \left\{ p(s_{k+1}|z_{0,k+1}, r_{0,k+1}) f(\hat{x}_{k+1}|s_{k+1}, z_{0,k+1}, r_{0,k+1}) \right\}, \\ \hat{x}_{k+1} = \sum_{s_{k+1}} p(s_{k+1}|z_{0,k+1}, r_{0,k+1}) \hat{x}_{k+1}(s_{k+1}), \end{array} \right. \quad (15)$$

или

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{s}_{k+1}(x_{k+1}) = \arg \max_{s_{k+1}} p(s_{k+1}|x_{k+1}, z_{0,k+1}, r_{0,k+1}), \\ \hat{x}_{k+1} = \arg \sup_{x_{k+1}} \left\{ f(x_{k+1}|z_{0,k+1}, r_{0,k+1}) p(\hat{s}_{k+1}|x_{k+1}, z_{0,k+1}, r_{0,k+1}) \right\}, \\ \hat{s}_{k+1} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x_{k+1}|z_{0,k+1}, r_{0,k+1}) \hat{s}_{k+1}(x_{k+1}) dx_{k+1}. \end{array} \right. \quad (16)$$

На первом этапе находятся условные оценки вектора ФСК (состояния ГВЦ) при фиксированном состоянии ГВЦ (фиксированных ФСК).

На втором этапе определяется безусловная оценка состояния ГВЦ (ФСК) с учетом полученных условных оценок вектора ФСК (состояния ГВЦ).

На третьем этапе вычисляются безусловные оценки вектора ФСК (состояния ГВЦ).

## Заключение

Таким образом, синтезирован общий алгоритм (15)–(16) совместного траекторного сопровождения функционально связанных координат и распознавания состояния системы «ГВЦ – БРЛС – индикатор – истребитель» (1)–(6) со случайной скачкообразной структурой при байесовском критерии оптимальности.

Полученный алгоритм отличается от известных [5] введением дополнительного (третьего) этапа нахождения безусловных оценок, обобщением на случай произвольного количества состояний, подлежащих распознаванию, и комплексированием информации, поступающей от БРЛС, вспомогательных измерителей и индикаторов, что способно повысить точность оценивания.

В ходе разработки алгоритма была получена нормированная функция потерь (11) общего вида для произвольного количества компонент векторов ФСК и состояния ГВЦ, а также доказано, что при выбранной нормированной функции потерь оптимальная оценка составного вектора ФСК и состояния ГВЦ по критерию минимума апостериорного риска совпадает с его же оптимальной оценкой по критерию максимума апостериорной вероятности.

Для конкретизации алгоритма необходимо воспользоваться рекуррентными выражениями для плотности распределения составного вектора ФСК и состояния ГВЦ, которые приводятся в [7, 8, 11].

## 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., Закомолдин Д.В., Лютиков И.В., Бондарев В.Н., Кочетов И.В., Федотов А.Ю., Докучаев Я.С., Черваков В.О. Метод повышения помехозащищенности бортовой радиолокационной станции истребителя. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2018.
- [3] Богданов А.В., Филонов А.В., Ковалев 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.
- [4] Богданов А.В., Васильев О.В., Филонов А.А., Жиронкин С.Б., Кучин А.А., Черваков В.О., Лютиков И.В., Анциферов А.А., Когтин А.В. Обнаружение и распознавание пущенной противником ракеты в бортовой радиолокационной станции истребителя. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2015.
- [5] 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 Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 10, № 2. С. 154–168.
- [6] 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.
- [7] Бухалев В.А. Оптимальное сглаживание в системах со случайной скачкообразной структурой. М.: Физматлит, 2013. 188 с.
- [8] Бухалев В.А., Скрынников А.А. Алгоритмическая помехозащита беспилотных летательных аппаратов. М.: Физматлит, 2018. 192 с.
- [9] Казаков И.Е., Артемьев В.М., Бухалев В.А. Анализ систем случайной структуры. М.: Физматлит, 1993. 272 с.
- [10] Трифонов А.П., Шинаков Ю.С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
- [11] Кучин А.А., Федотов А.Ю., Ткачева О.О., Скрынников А.А. Оптимальный алгоритм совместной экстраполяции функционально связанных координат и

состояния групповой воздушной цели на основе нелинейной модели со случайной скачкообразной структурой // Обработка, передача и отображение информации о быстропротекающих процессах: материалы XXIX Всероссийской научно-технической конференции школы-семинара. 2018. С. 389–394.

### Образец цитирования

Скрынников А.А., Федотов А.Ю., Лобанов А.А., Ткачева О.О., Викулова Ю.М. Алгоритм сопровождения функционально связанных координат и распознавания состояния системы «ГВЦ – БРЛС – индикатор – истребитель» со случайной скачкообразной структурой при байесовском критерии оптимальности // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2019. № 2. С. 57–69. <https://doi.org/10.26456/vtprmk532>

### Сведения об авторах

**1. Скрынников Андрей Александрович**

начальник сектора Государственного научно-исследовательского института авиационных систем.

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

**2. 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.*

**3. Лобанов Александр Александрович**

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. Ткачева Ольга Олеговна**

младший научный сотрудник 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.*

**5. Викулова Юлия Михайловна**

руководитель проектов - технический секретарь диссертационного совета АО "РТИ".

*Россия, 127083, г. Москва, ул. 8-го Марта, д. 10, стр. 1.*

**ALGORITHM FOR TRACKING FUNCTIONALLY RELATED  
COORDINATES AND RECOGNIZING THE STATE OF THE  
GVC-BRLS-FIGHTER INDICATOR SYSTEM WITH A RANDOM  
JUMP-LIKE STRUCTURE WITH A BAYESIAN OPTIMALITY  
CRITERION**

**Skrynnikov Andrey Alexandrovich**

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

**Fedotov Alexander Yurievich**

Adjunct in 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.*

**Lobanov Alexander Alexandrovich**

Adjunct in 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.*

**Tkacheva Olga Olegovna**

Junior Researcher, Military Aerospace Defense Academy  
named after Marshal of the Soviet Union G.K. Zhukov  
*Russia, 170100, Tver, 50 Zhigareva str., MADA.*

**Vikulova Yulia Mikhailovna**

Project Manager - Technical Secretary of the dissertation council of JSC "RTI"  
*Russia, 127083, Moscow, 8-go Marta str., 10/1.*

---

*Received 26.02.2019, revised 29.05.2019.*

---

The relevance of the work is due to the fact that the lack of an optimal tracking algorithm for functionally related coordinates (FGC) and recognition of the group air target (MCC), which takes into account a priori information about their change, leads to an underestimation of the information capabilities of the fighter's onboard radar station.

To improve the characteristics of the radar to assess the air target situation in the article for the Bayes optimality criterion, a new algorithm is developed for tracking the FGC and recognizing the state of the GVC-BRLS-indicator-fighter system with a random jump-like structure. For this, expressions are found for a posteriori estimates of FGC and the state of the MCC based on the Bayes formula and the Markov property of the random processes.

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

### Citation

Skrynnikov A.A., Fedotov A.Yu., Lobanov A.A., Tkacheva O.O., Vikulova Yu.M., “Algorithm for tracking functionally related coordinates and recognizing the state of the GVC-BRLS-Fighter Indicator system with a random jump-like structure with a Bayesian optimality criterion”, *Vestnik TverGU. Seriya: Prikladnaya Matematika [Herald of Tver State University. Series: Applied Mathematics]*, 2019, № 2, 57–69 (in Russian). <https://doi.org/10.26456/vtpmk532>

### 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., Zakomoldin D.V., Lyutikov I.V., Bondarev V.N., Kochetov I.V., Fedotov A.Yu., Dokuchaev Ya.S., Chervakov V.O., *Metod povysheniya pomekhozashchishchennosti bortovoj radiolokatsionnoj stantsii istrebitelya [The method of improving the noise immunity of fighter aircraft radar]*, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 2018 (in Russian).
- [3] Bogdanov A.V., Filonov A.V., Kovalev 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.
- [4] Bogdanov A.V., Vasilev O.V., Filonov A.A., Zhironkin S.B., Kuchin A.A., Chervakov V.O., Lyutikov I.V., Antsiferov A.A., Kogtin A.V., *Obnaruzhenie i raspoznavanie pushchennoj protivnikom rakety v bortovoj radiolokatsionnoj stantsii istrebitelya [Detection and recognition of the missile launched by the enemy in the onboard fighter radar station]*, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 2015 (in Russian).
- [5] Bogdanov A.V., Bondarev V.N., Vasilev O.V., Garin E.N., Zakomoldin D.V., Korotkov S.S., Lyutikov I.V., Lyaporov V.N., “Synthesis of Optimal Algorithms of Recognition of Group Air Targets in Airborne Radar Systems”, *Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii [Journal SFU. Technics and technology]*, **10:2** (2017), 154–168 (in Russian).
- [6] 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 February 2017), VUNTs VVS “VVA”, Voronezh, 2018 (in Russian).
- [7] Bukhalev V.A., *Optimalnoe sglazhivanie v sistemakh so sluchajnoj skachkoobraznoj strukturoj*, Fizmatlit Publ., Moscow, 2013 (in Russian), 188 pp.
- [8] Bukhalev V.A., Skrynnikov A.A., *Algoritmicheskaya pomekhozashchita bespilotnykh letatelnykh apparatov [Algorithmic noise protection of unmanned aerial vehicles]*, Fizmatlit Publ., Moscow, 2018 (in Russian), 192 pp.

- 
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Kuchin A.A., Fedotov A.Yu., Tkacheva O.O., Skrynnikov A.A., “The optimal algorithm for joint extrapolation of functionally related coordinates and the state of a group air target based on a non-linear model with a random hopping structure”, *Obrabotka, peredacha i otobrazhenie informatsii o bystroprotekayushchikh protsessakh: materialy XXIX Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii shkoly-seminara [Processing, transfer and display of information on fast processes: materials of the XXIX All-Russian Scientific and Technical Conference of the school seminar]*, 2018, 389–394 (in Russian).