

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 623.681.93

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ РАНЖИРОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ПО СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЯ ПО ДАННЫМ БОРТОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

© 2021 г. В. С. Верба^а *, А. С. Богачев^а, В. И. Меркулов^а

^а Концерн радиостроения “Вега”,
Кутузовский просп., 34, Москва, 121170 Российская Федерация

*E-mail: mail@vega.su

Поступила в редакцию 29.09.2020 г.

После доработки 29.09.2020 г.

Принята к публикации 27.11.2020 г.

Предложен вариант многокритериального ранжирования воздушных судов (ВС) по степени опасности столкновения по данным бортовой радиолокационной станции (БРЛС), который может послужить основой для разработки автономной системы предупреждения столкновений летательных аппаратов в районах их интенсивного движения. В рамках этой задачи рассмотрены критерии и показатели определения конфликтной ситуации, в качестве которых предложено использовать: расстояние максимального сближения ВС с самолетом-носителем БРЛС, время достижения границы области столкновения, дальность до контролируемого ВС и время до возможной встречи. Рекомендованы четырехэтапные процедуры ранжирования ВС по этим показателям, обеспечивающие надежное предотвращение их столкновений. Получены конкретные соотношения для реализации предложенного варианта ранжирования ВС в антенной системе координат, реализуемые на основе измерений БРЛС и автономной навигационной системы.

DOI: 10.31857/S0033849421110103

ВВЕДЕНИЕ

Предупреждение опасных сближений и предотвращение столкновения воздушных судов (ВС) между собой достигаются в результате реализации целого комплекса мероприятий: вертикального, продольного и бокового эшелонирования; точного выдерживания заданной пространственно-временной траектории полета; соблюдения установленных правил полетов; надежного управления воздушным движением; применения систем предупреждения столкновений (СПС) [1–3], а также осмотрительностью экипажа при полетах в условиях визуальной видимости (особенно при пролете аэродромов, точек пересечения воздушных трасс и местных воздушных линий) [4].

В настоящее время наряду с совершенствованием СПС типа TCAS [5] во многих странах ведутся работы по созданию на основе системного подхода перспективных СПС на базе технологии ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast [1] – автоматическое зависимое наблюдение в режиме радиовещания), а также автономных СПС на основе бортовых радиолокационных станций

(БРЛС), оптико-электронных систем (ОЭС) и других датчиков [6, 7].

Постоянно растущий в мире интерес к беспилотным летательным аппаратам (БПЛА) стимулирует создание автономных СПС на основе БРЛС и ОЭС. Организационные проблемы включения БПЛА в неразделенное воздушное пространство страны и проблемы безопасных полетов могут быть решены при условии, что в состав бортового комплекса любого БПЛА без исключения будет входить очень надежная система SAA (Sense and Avoid – “обнаружил–уклонился”) [8]. В этой связи, как отмечалось ранее, в автономных СПС пилотируемых и беспилотных ЛА перспективно применение БРЛС, функционирующих в режиме программируемого многоцелевого сопровождения (МЦС).

Цель статьи – разработать критерии и показатели для определения конфликтных ситуаций и способ ранжирования всех потенциально опасных с точки зрения столкновения ВС по данным БРЛС в режиме МЦС при отсутствии внешнего целеуказания. При этом для решения данной задачи используется подход, изложенный в работе

[9], которая посвящена двухэтапному ранжированию воздушных целей (ВЦ) по степени опасности при функционировании БРЛС в режиме программируемого МЦС.

При разработке критериев и показателей [10] для определения конфликтных ситуаций и ранжирования всех опасных с точки зрения столкновения ВС по данным БРЛС в режиме МЦС при отсутствии внешнего целеуказания аналогично [9] предполагалось, что антенная система БРЛС выполнена в виде фазированной или активной фазированной антенной решетки (ФАР или АФАР), формирующей на излучение однолепестковую диаграмму направленности (ДН), и для упрощения анализа фазовый центр антенны совмещен с центром масс (ЦМ) самолета.

В режиме программируемого МЦС при отсутствии команд внешнего целеуказания обычно вначале антенной БРЛС просматривается вся рабочая зона [2]. По результатам просмотра осуществляется ранжирование сопровождаемых ВЦ по степени их важности (опасности), после чего выполняется приоритетное облучение наиболее важных целей с периодическим возвращением к просмотру всей рабочей зоны для обнаружения и последующего взятия на сопровождение вновь выявленных ВЦ. Как правило, режим МЦС реализуется в несколько этапов, включая этап ранжирования целей (в частности, по рангу важности (опасности)) [2, 3, 11].

Учитывая достаточно высокую частоту обновления информации в БРЛС с ФАР (АФАР) благодаря использованию электронного управления ДН, можно в непрерывном времени [9] получать исходные аналитические соотношения для отдельной i -й ВЦ, которые необходимы при разработке критериев и показателей для определения наиболее опасной цели. При этом одна из осей антенной системы координат (СК) (и, соответственно, ДН антенны БРЛС) непрерывно ориентируется по линии визирования (ЛВ) сопровождаемой цели. Применительно к задаче предупреждения столкновений самолетов в воздухе в качестве ВЦ выступают ВС.

Поскольку для предотвращения столкновений ВС приходится учитывать несколько различных показателей опасного сближения примерно одинаковой значимости, то далее будет использован наиболее простой последовательный вариант многокритериальной оптимизации [12] решения задачи в целом. Суть его состоит в том, что результаты, полученные на этапе оптимизации по первому критерию, используются в качестве начальных условий для оптимизации по второму критерию. Полученные при этом результаты используются в качестве начальных условий для оптимизации по третьему критерию, и т.д.

1. КРИТЕРИИ И ПОКАЗАТЕЛИ ОПАСНОГО СБЛИЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ

Одной из основных целей анализа относительного движения самолета-носителя БРЛС и конфликтующего ВС в задаче предотвращения столкновений в воздухе является определение прогнозируемых расстояния их наибольшего сближения и времени его достижения. Данные параметры (показатели) определяются путем прогнозирования в расчетный момент времени t , при этом в общем случае необходимо учитывать возможность совершения самолетами произвольных маневров в процессе их сближения. Однако на практике прогнозирование относительного движения самолетов часто выполняется в предположении, что вектор их относительной скорости постоянен.

Пусть относительное движение в пространстве в расчетный момент времени t самолета-носителя БРЛС (точка O) и i -го ВС (точка C_i) задано векторами абсолютных (земных) скоростей $\vec{V}_c(t)$ и $\vec{V}_i(t)$ соответственно, а их взаимное положение — вектором относительной дальности $\vec{D}_i(t)$ (рис. 1).

В качестве показателей, характеризующих степень опасности i -го воздушного судна, с учетом сказанного выше будем рассматривать прогнозируемые в расчетный момент времени t следующие параметры:

- расстояние максимального сближения $d_{сбли}(t)$ ВС с самолетом-носителем БРЛС (модуль вектора максимального сближения $d_{сбли}(t) = |\vec{d}_{сбли}(t)|$ рис. 1);

- время $t_{ГОС i}(t)$ достижения воздушным судном границы области столкновения (ГОС), функционально связанное со временем $t_{сбли}(t)$ достижения максимального сближения;

- измеряемую БРЛС дальность $D_{и i}(t)$ до ВС;

- вычисляемое время возможной встречи $t_{в i}(t) = D_{и i}(t)/|\dot{D}_{и i}(t)|$, где $|\dot{D}_{и i}(t)|$ — модуль скорости изменения измеряемой дальности.

Для гипотезы, предполагающей, что маневр самолетов отсутствует, т.е. $\vec{V}_i(t) = \text{const}$, $\vec{V}_c(t) = \text{const}$ и, соответственно, вектор относительной скорости $\vec{V}_{отн i}(t) = \vec{V}_i(t) - \vec{V}_c(t) = \text{const}$, защищаемая область (объем) воздушного пространства представляет собой шар радиусом R_3 с центром в ЦМ защищаемого самолета (рис. 1). При заданном значении относительной скорости $\vec{V}_{отн i}$ величина R_3 определяется из условия получения интервала времени, достаточного для обнаружения угрозы столкновения и выполнения самолетом-носителем БРЛС маневра уклонения, прежде чем произойдет вторжение i -го ВС в область (объем) воздушного пространства в виде шара радиусом $R_{ст}$ (область столкновения) (см. рис. 1).

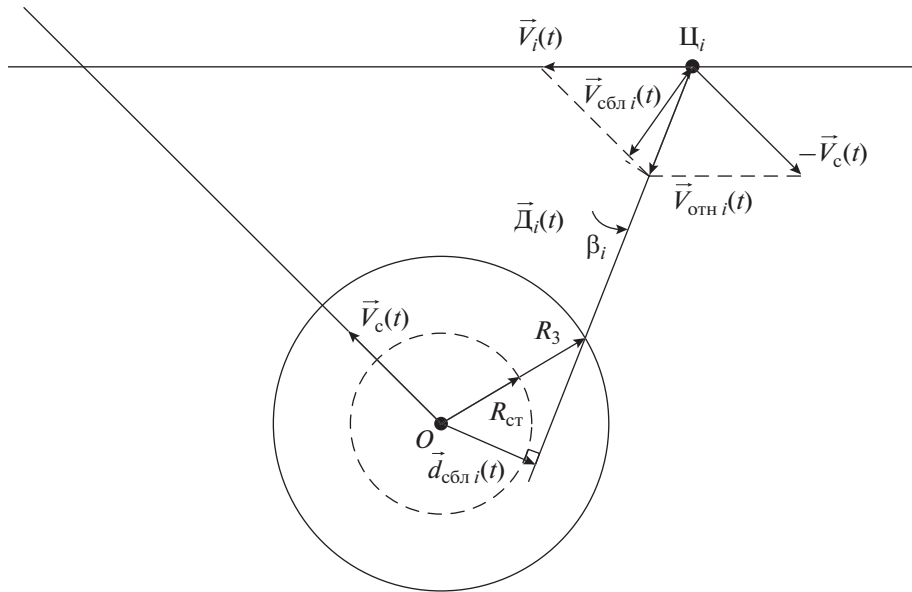


Рис. 1. Взаимное положение самолета-носителя БРЛС и i -го ВС в пространстве.

При гипотезе постоянства относительной скорости $\vec{V}_{отн\,i}(t) = \text{const}$ показатели $d_{сбл\,i}(t)$ и $t_{сбл\,i}(t)$ могут быть определены по формулам [9]

$$d_{сбл\,i}(t) = \frac{|\vec{V}_{отн\,i}(t) \times \vec{D}_i(t)|}{|\vec{V}_{отн\,i}(t)|}, \quad (1)$$

$$t_{сбл\,i}(t) = \frac{\sqrt{D_i^2(t) - d_{сбл\,i}^2(t)}}{|\vec{V}_{отн\,i}(t)|}, \quad (2)$$

где $|\vec{V}_{отн\,i}(t) \times \vec{D}_i(t)|$ – модуль векторного произведения векторов $\vec{V}_{отн\,i}(t)$ и $\vec{D}_i(t)$; $D_i(t) = |\vec{D}_i(t)|$; $|\vec{V}_{отн\,i}(t)| = |\vec{V}_i(t) - \vec{V}_c(t)|$; t – расчетный момент времени.

Как следует из формул (1) и (2), для определения показателей $d_{сбл\,i}(t)$ и $t_{сбл\,i}(t)$ необходимо знать векторы $\vec{V}_c(t)$, $\vec{V}_i(t)$ и $\vec{D}_i(t)$. При этом из качественного анализа этих формул и рис. 1 видно, что показатели $d_{сбл\,i}(t)$ и $t_{сбл\,i}(t)$ зависят не только от величины (модулей) векторов, но и от их взаимной ориентации в пространстве (от угла β_i) при заданном расчетном моменте времени t .

Естественно, что наиболее опасным с точки зрения столкновения с защищаемым самолетом является ВС, которое по прогнозу (по сравнению с другими ВС) в процессе сближения достигнет наименьшего значения расстояния максимального сближения за минимальное время. Однако на практике в силу различия относительных скоростей и различного удаления от носителя БРЛС наименьшее значение расстояния максимального

сближения может не достигаться за минимальное время. Поэтому для принятия наиболее достоверного решения о степени опасности того или иного ВС, с точки зрения столкновения с защищаемым самолетом, ранжирование целесообразно выполнять с использованием всех указанных выше критериев в несколько этапов. В предлагаемом способе, как отмечалось ранее, используется четыре этапа ранжирования.

На *первом этапе* всем воздушным судам, траектории которых берутся БРЛС на сопровождение, присваиваются номера в порядке очередности взятия их на сопровождение, в результате чего формируется исходный ряд пронумерованных ВС:

$$BC_1, BC_2, \dots, BC_i, \dots, BC_I, \quad i = \overline{1, I}, \quad (3)$$

где I – число ВС, траектории которых сопровождают БРЛС к моменту $t_{н.р}$ начала ранжирования; $I \leq I_{\max}$, $I_{\max}$ – максимально возможное число ВС (траекторий), которые может сопровождать БРЛС.

Далее осуществляется ранжирование ВС ряда (3) по показателю $D_{и\,i}(t)$ с использованием критерия

$$I_D = \min_{i=\overline{1, I}} D_{и\,i}(t_{н.р}). \quad (4)$$

В результате проведенного ранжирования формируется строго возрастающая последовательность:

$$\{D_{и\,ik}(t_{н.р})\} = D_{и\,i1}(t_{н.р}), \dots, D_{и\,ik}(t_{н.р}), \dots, D_{и\,iI}(t_{н.р}), \quad (5)$$

где $D_{и\,i(k+1)}(t_{н.р}) > D_{и\,ik}(t_{н.р})$ для всех $i \in \overline{1, I}$; $k = \overline{1, I}$.

Последовательности (5) соответствует ряд отранжированных пронумерованных BC_{i_k} , который содержит I членов:

$$BC_{i_1}, BC_{i_2}, \dots, BC_{i_k}, \dots, BC_{i_l}, \quad i_k \in \overline{1, I}, \quad (6)$$

где значения индекса i_k в (6) равны значениям индекса i в (5) при одном и том же значении индекса k ; например, если член последовательности (5) $D_{iik}(t_{н.п}) = D_{i32}(t_{н.п})$, то член ряда (6) $BC_{i_k} = BC_{i_2} = BC_3$.

Далее последовательность (5) разбивается на две последовательности:

1) строго возрастающая последовательность значений показателя $D_{iik}(t_{н.п})$, члены которой относятся к конфликтующим ВС:

$$\{D_{iik}(t_{н.п})\} = D_{iil}(t_{н.п}), \dots, D_{iik}(t_{н.п}), \dots, D_{iil_1}(t_{н.п}), \quad (7)$$

где $D_{iik}(t_{н.п}) \leq R_3$ для всех $i \in \overline{1, I}$; $k = \overline{1, I_1}$, $I_1 \leq I$;

2) конечная строго возрастающая последовательность значений показателя $D_{iik}(t_{н.п})$, члены которой относятся к неконфликтующим ВС:

$$\begin{aligned} \{D_{iik}(t_{н.п})\} = \\ = D_{i(i_1+1)}(t_{н.п}), \dots, D_{iik}(t_{н.п}), \dots, D_{iil}(t_{н.п}), \end{aligned} \quad (8)$$

где $D_{iik}(t_{н.п}) > R_3$ для всех $i \in \overline{1, I}$; $k = \overline{I_1 + 1, I}$.

Последовательности (7) соответствует конечный ряд отранжированных пронумерованных BC_{i_k} , который содержит I_1 членов:

$$BC_{i_1}, BC_{i_2}, \dots, BC_{i_k}, \dots, BC_{i_{I_1}}, \quad i_k \in \overline{1, I}. \quad (9)$$

Необходимо отметить, что ряд (8) показателей $D_{iik}(t_{н.п})$ в данном цикле функционирования БРЛС в дальнейшем не анализируется.

На первом этапе решение по определению наиболее опасного конфликтующего ВС выносится на основе данных последовательности (7). Наиболее опасным в ряду (9) является ВС, которому в (7) соответствует минимальное значение показателя $D_{iik}(t_{н.п})$; с ростом индекса k степень опасности i -го конфликтующего ВС уменьшается.

Все значения показателя $D_{iik}(t_{н.п})$, входящие в последовательность (7) (и, соответственно, все ВС ряда (9)), относятся к конфликтующим ВС. Поэтому на *втором этапе* дальнейшее ранжирование ВС, входящих в ряд (9), целесообразно выполнять с использованием следующего критерия:

$$I_d = \min_{j=i_k \in \overline{1, I}} d_{сбл j}(t_{н.п}). \quad (10)$$

В результате проведенного ранжирования по критерию (10) формируется строго возрастающая последовательность:

$$\begin{aligned} \{d_{сбл j l}(t_{н.п})\} = \\ = d_{сбл j l}(t_{н.п}), \dots, d_{сбл j l}(t_{н.п}), \dots, d_{сбл j l_1}(t_{н.п}), \end{aligned} \quad (11)$$

где $d_{сбл j(l+1)}(t_{н.п}) > d_{сбл j l}(t_{н.п})$ для всех $j = i_k \in \overline{1, I}$; $l = \overline{1, I_1}$.

Последовательности (11) соответствует конечный ряд отранжированных пронумерованных BC_{j_l} , содержащий I_1 членов:

$$BC_{j_1}, BC_{j_2}, \dots, BC_{j_l}, \dots, BC_{j_{I_1}}, \quad j_l \in \overline{1, I}. \quad (12)$$

Далее последовательность (11) разбивается на две последовательности:

1) конечная строго возрастающая последовательность значений показателя $d_{сбл j l}(t_{н.п})$, члены которой относятся к конфликтующим ВС и по прогнозу в момент $t_{н.п}$ могут вторгнуться в область столкновения радиусом $R_{ст}$ (рис. 1):

$$\begin{aligned} \{d_{сбл j l}(t_{н.п})\} = \\ = d_{сбл j l}(t_{н.п}), \dots, d_{сбл j l}(t_{н.п}), \dots, d_{сбл j l_2}(t_{н.п}), \end{aligned} \quad (13)$$

где $d_{сбл j l}(t_{н.п}) \leq R_{ст}$ для всех $j = i_k \in \overline{1, I}$; $l = \overline{1, I_2}$; $I_2 \leq I_1$;

2) конечная строго возрастающая последовательность значений показателя $d_{сбл j l}(t_{н.п})$, члены которой также относятся к конфликтующим ВС, но по прогнозу в момент $t_{н.п}$ не вторгаются в область столкновения:

$$\begin{aligned} \{d_{сбл j l}(t_{н.п})\} = \\ = d_{сбл j(l_2+1)}(t_{н.п}), \dots, d_{сбл j l}(t_{н.п}), \dots, d_{сбл j l_1}(t_{н.п}), \end{aligned} \quad (14)$$

где $d_{сбл j l}(t_{н.п}) > R_{ст}$ для всех $j = i_k \in \overline{1, I}$; $l = \overline{I_2 + 1, I_1}$.

Последовательностям (13) и (14) соответствуют полученные из ряда (12) конечные ряды отранжированных пронумерованных BC_{j_l} , содержащие соответственно I_2 и $I_1 - I_2$ членов:

$$BC_{j_1}, BC_{j_2}, \dots, BC_{j_l}, \dots, BC_{j_{I_2}}, \quad j_l \in \overline{1, I}; \quad (15)$$

$$BC_{j_{(I_2+1)}}, BC_{j_{(I_2+2)}}, \dots, BC_{j_l}, \dots, BC_{j_{I_1}}, \quad j_l \in \overline{1, I}. \quad (16)$$

Все члены последовательности (13) (и, соответственно, все ВС ряда (15)) относятся к конфликтующим ВС, непосредственно угрожающим носителю БРЛС. Поэтому в отличие от (14) последовательность (13) подлежит дальнейшему ранжированию в первую очередь.

Далее решение по определению наиболее опасного конфликтующего ВС выносится на ос-

нове данных последовательности (13). Наиболее опасным в ряду (15) является ВС, которому в (13) соответствует минимальное значение показателя $d_{сбл\ j l}(t_{н.р})$; с ростом индекса l степень опасности j -го конфликтующего ВС уменьшается.

На *третьем этапе* дальнейшее ранжирование ВС, входящих в ряд (15), целесообразно выполнять с использованием критерия

$$I_l = \min_{m=j \in \overline{1, I}} t_{ГОС\ m}(t_{н.р}). \quad (17)$$

В критерии (17) фигурирует не время $t_{сбл\ m}(t_{н.р})$ достижения m -м ВС расстояния максимального сближения с носителем БРЛС, а время $t_{ГОС\ m}(t_{н.р})$ достижения им ГОС, функционально связанное с $t_{сбл\ m}(t_{н.р})$. Для m -го ВС, которому соответствует показатель $d_{сбл\ m}(t_{н.р})$, время $t_{ГОС\ m}(t_{н.р})$ вычисляется по формуле

$$t_{ГОС\ m}(t_{н.р}) = t_{сбл\ m}(t_{н.р}) - \frac{\sqrt{R_{ст}^2 - d_{сбл\ m}^2(t_{н.р})}}{V_{отн\ m}(t_{н.р})}, \quad (18)$$

где $V_{отн\ m}(t_{н.р}) = |\vec{V}_{отн\ m}(t_{н.р})|$; время $t_{сбл\ m}(t_{н.р})$ определяется по формуле (2).

В результате проведенного ранжирования по критерию (17) показателя $t_{ГОС\ m}(t_{н.р})$, рассчитанного в соответствии с (18), формируется конечная строго возрастающая последовательность:

$$\{t_{ГОС\ mn}(t_{н.р})\} = t_{ГОС\ m1}(t_{н.р}), \dots, t_{ГОС\ mn}(t_{н.р}), \dots, t_{ГОС\ mI_2}(t_{н.р}), \quad (19)$$

где $t_{ГОС\ m(n+1)}(t_{н.р}) > t_{ГОС\ mn}(t_{н.р})$ для всех $m = j_l \in \overline{1, I}$; $n = \overline{1, I_2}$.

Последовательности (19) соответствует конечный ряд ВС $_{m_n}$, содержащий I_2 членов:

$$ВС_{m_1}, ВС_{m_2}, \dots, ВС_{m_n}, \dots, ВС_{mI_2}, \quad m_n \in \overline{1, I}. \quad (20)$$

Окончательное решение по определению наиболее опасного конфликтующего ВС по результатам трех этапов ранжирования выносится на основе данных последовательности (19). Наиболее опасным в ряду (20) является ВС, которому в (19) соответствует минимальное значение показателя $t_{ГОС\ mn}(t_{н.р})$; с ростом индекса n степень опасности m -го конфликтующего ВС уменьшается.

Дополнительно необходимо также выполнить ранжирование ВС, входящих в ряд (16), которому соответствует последовательность (14) значений показателя $d_{сбл\ j l}(t_{н.р})$. По прогнозу в момент $t_{н.р}$ данные ВС не вторгаются в область столкновения. Однако они остаются потенциально опасными, поскольку, находясь в защищаемой области пространства, в процессе дальнейшего движения могут

совершить пространственный маневр в сторону носителя БРЛС (например, для предотвращения попадания ВС в зоны опасных метеообразований) и вторгнуться в область столкновения. При этом в общем случае, чем меньше в расчетный момент времени t время

$$t_{в\ j}(t) = \frac{D_i(t)}{|\dot{D}_i(t)|}, \quad (21)$$

тем быстрее j -е ВС достигнет границы области столкновения и тем опаснее это воздушное судно.

Поэтому целесообразно использовать *четвертый этап* ранжирования ВС, входящих в ряд (16), по критерию:

$$I_{t_b} = \min_{p=j \in \overline{1, I}} t_{в\ p}(t_{н.р}), \quad (22)$$

где $t_{в\ p}$ — определяется соотношением (21).

В результате проведенного ранжирования показателя (21) при $t = t_{н.р}$ по критерию (22) формируется конечная строго возрастающая последовательность:

$$\{t_{в\ pq}(t_{н.р})\} = t_{в\ p1}(t_{н.р}), \dots, t_{в\ pq}(t_{н.р}), \dots, t_{в\ pI_3}(t_{н.р}), \quad (23)$$

где $t_{в\ p(q+1)}(t_{н.р}) > t_{в\ pq}(t_{н.р})$ для всех $p = j_l \in \overline{1, I}$; $q = \overline{1, I_3}$, $I_3 = I_1 - I_2$.

Последовательности (23) соответствует конечный ряд ВС $_{p_q}$, содержащий I_3 членов:

$$ВС_{p_1}, ВС_{p_2}, \dots, ВС_{p_q}, \dots, ВС_{pI_3}, \quad p_q \in \overline{1, I}. \quad (24)$$

Решение по определению наиболее опасного конфликтующего воздушного судна по результатам четвертого этапа ранжирования выносится на основе данных последовательности (23). Наиболее опасным в ряду (24) является ВС, которому в (23) соответствует минимальное значение показателя $t_{в\ pq}(t_{н.р})$; с ростом индекса q степень опасности p -го конфликтующего ВС уменьшается.

Таким образом, как следует из формул (4), (10), (17) и (22), для проведения ранжирования ВС по степени опасности столкновения с самолетом-носителем БРЛС в соответствии с рассмотренными этапами и процедурами предложено определить показатели $D_{и i}(t)$, $d_{сбл i}(t_{н.р})$, $t_{ГОС i}(t_{н.р})$ и $t_{в i}(t_{н.р})$.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПАСНОГО СБЛИЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ В АНТЕННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ БРЛС

Конкретизируем формулы (1), (2) и (18) применительно к случаю использования измерений (оценивания) БРЛС координат и параметров дви-

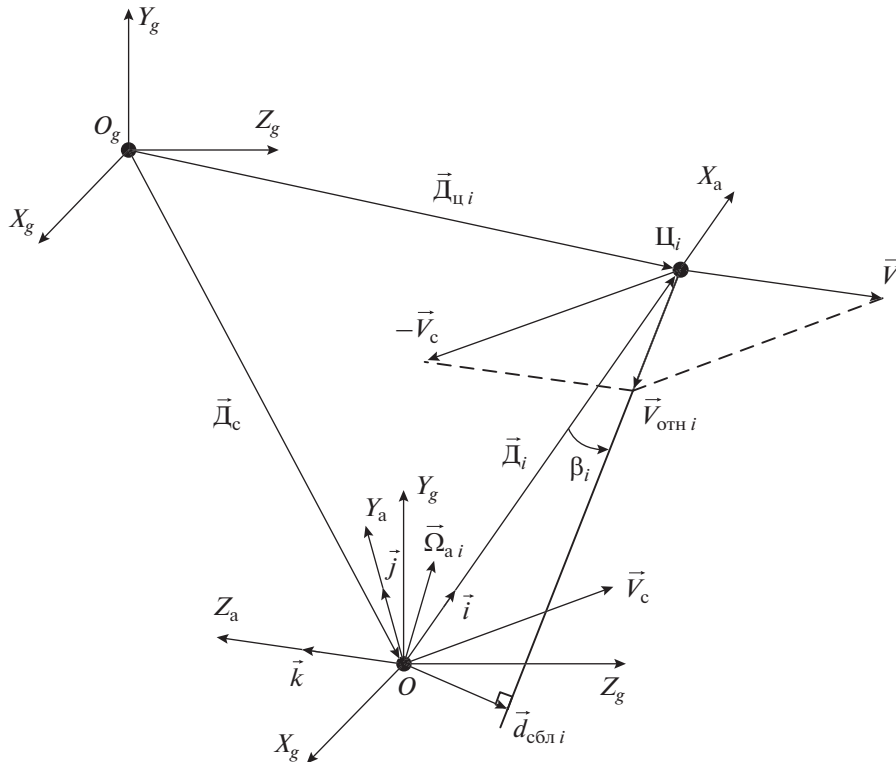


Рис. 2. Схематическое представление взаимного положения самолета-носителя БРЛС (точка O) и i -го ВС (точка Π_i) в нормальной земной СК.

жения ВС в режиме МЦС при отсутствии внешнего целеуказания в антенной СК (рис. 2).

На рис. 2 представлены следующие СК: нормальная земная $O_g X_g Y_g Z_g$, нормальная $O X_g Y_g Z_g$ и антенная $O X_a Y_a Z_a$. Положение i -го ВС (точка Π_i) и самолета-носителя БРЛС (точка O) в нормальной земной СК определяется векторами $\vec{D}_{\Pi i}(t)$ и $\vec{D}_c(t)$. Относительное положение ВС и самолета в расчетный момент времени t характеризуется вектором $\vec{D}_i(t)$, при этом выполняется соотношение

$$\vec{D}_{\Pi i}(t) = \vec{D}_c(t) + \vec{D}_i(t). \quad (25)$$

С БРЛС связана антенная СК $O X_a Y_a Z_a$ с началом в ЦМ самолета, вращающаяся вокруг ЦМ относительно нормальной СК $O X_g Y_g Z_g$ с угловой скоростью $\vec{\Omega}_{ai}(t)$. В антенной СК БРЛС автоматически измеряет (оценивает) для каждого ВС дальность $D_i(t)$, скорость ее изменения $\dot{D}_i(t) = dD_i(t)/dt$, углы бортовых пеленгов ВС в азимутальной $\varphi_{gi}(t)$ и угломестной $\varphi_{vi}(t)$ плоскостях, причем углы $\varphi_{gi}(t)$ и $\varphi_{vi}(t)$ характеризуют отклонение ЛВ i -го ВС в антенной СК относительно осей связанной СК $OXYZ$ (рис. 3). Кроме того, оцениваются угловые скорости $\omega_{gi}(t) = d\varphi_{gi}(t)/dt$ и $\omega_{vi}(t) = d\varphi_{vi}(t)/dt$. Для определенности координатных преобразований переход от связанной СК к антенной осуществля-

ется путем последовательных поворотов на углы $\varphi_{vi}(t)$ и $\varphi_{gi}(t)$ против часовой стрелки.

С учетом соотношения (25) можно показать [11], что

$$\vec{V}_i(t) = \vec{V}_c(t) + \vec{V}_{Di}(t) + \vec{\Omega}_{ai}(t) \times \vec{D}_i(t), \quad (26)$$

где $\vec{V}_i(t) = d\vec{D}_{\Pi i}(t)/dt$ – вектор земной скорости i -го ВС; $\vec{V}_c(t) = d\vec{D}_c(t)/dt$ – вектор земной скорости самолета; $\vec{V}_{Di}(t) = d\vec{D}_i(t)/dt$ – вектор относительной скорости точки Π_i (d/dt – символ локальной производной); $\vec{\Omega}_{ai}(t)$ – вектор угловой скорости вращения антенной СК при сопровождении БРЛС i -го ВС относительно СК $O X_g Y_g Z_g$.

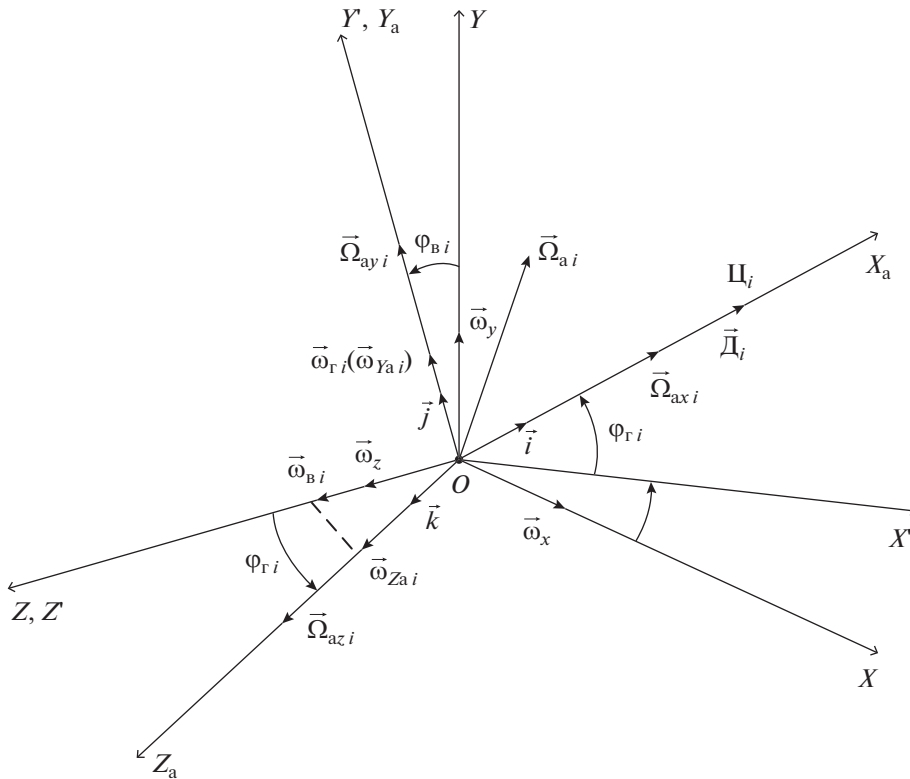
Согласно (26) вектор наблюдения (измерения) можно записать в форме

$$\vec{V}_{\Pi i}(t) = \vec{V}_{ci}(t) + \vec{V}_{Di}(t) + \vec{\Omega}_{ai}(t) \times \vec{D}_{\Pi i}(t). \quad (27)$$

Выразим векторы, входящие в (27), через их проекции на оси антенной СК $O X_a Y_a Z_a$

$$\begin{aligned} \vec{V}_{\Pi i}(t) &= V_{x\Pi i}(t)\vec{i} + V_{y\Pi i}(t)\vec{j} + V_{z\Pi i}(t)\vec{k}, \\ \vec{V}_{ci}(t) &= V_{xci}(t)\vec{i} + V_{yci}(t)\vec{j} + V_{zci}(t)\vec{k}, \\ \vec{V}_{Di}(t) &= \dot{D}_{\Pi i}(t)\vec{i}, \quad \vec{D}_{\Pi i}(t) = D_{\Pi i}(t)\vec{i}, \end{aligned} \quad (28)$$

$\vec{\Omega}_{ai}(t) = \Omega_{axi}(t)\vec{i} + \Omega_{ayi}(t)\vec{j} + \Omega_{azi}(t)\vec{k}$, где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орты СК $O X_a Y_a Z_a$ (см. рис. 2, 3).

Рис. 3. Углы бортовых пеленгов i -го ВС в антенной СК.

Проекции векторного произведения $\vec{\Omega}_{a i i}(t) \times \vec{D}_{i i}(t)$ на оси антенной СК могут быть получены в результате раскрытия определителя:

$$\vec{\Omega}_{a i i}(t) \times \vec{D}_{i i}(t) = \det \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \Omega_{a x i i}(t) & \Omega_{a y i i}(t) & \Omega_{a z i i}(t) \\ D_{i i}(t) & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \Omega_{a z i i}(t) D_{i i}(t) \vec{j} - \Omega_{a y i i}(t) D_{i i}(t) \vec{k} \end{pmatrix} \quad (29)$$

С учетом (28), (29) система скалярных соотношений измерений, соответствующих векторному выражению (27), приводится к виду

$$\begin{aligned} V_{x i i}(t) &= V_{c x i i}(t) + \dot{D}_{i i}(t), \\ V_{y i i}(t) &= V_{c y i i}(t) + \Omega_{a z i i}(t) D_{i i}(t), \\ V_{z i i}(t) &= V_{c z i i}(t) - \Omega_{a y i i}(t) D_{i i}(t). \end{aligned} \quad (30)$$

Выразим вектор относительной скорости $\vec{V}_{o t n i i}(t) = \vec{V}_i(t) - \vec{V}_c(t)$ через проекции на оси антенной СК. В результате с учетом выражений (30) получим

$$\begin{aligned} \vec{V}_{o t n i i}(t) &= \dot{D}_{i i}(t) \vec{i} + \\ &+ \Omega_{a z i i}(t) D_{i i}(t) \vec{j} - \Omega_{a y i i}(t) D_{i i}(t) \vec{k}. \end{aligned} \quad (31)$$

Векторное произведение $\vec{V}_{o t n i i}(t) \times \vec{D}_{i i}(t)$, входящее в формулу (1), при гипотезе $\vec{V}_{o t n i i}(t) = \text{const}$

для измеренных в момент времени $t = t_{n.p}$ значений векторов преобразуется следующим образом:

$$\begin{aligned} \vec{V}_{o t n i i}(t_{n.p}) \times \vec{D}_{i i}(t_{n.p}) &= \\ &= [\dot{D}_{i i}(t_{n.p}) \vec{i} + \Omega_{a z i i}(t_{n.p}) D_{i i}(t_{n.p}) \vec{j} - \\ &- \Omega_{a y i i}(t_{n.p}) D_{i i}(t_{n.p}) \vec{k}] \times D_{i i}(t_{n.p}) \vec{i} = \\ &= D_{i i}^2(t_{n.p}) \Omega_{a y i i}(t_{n.p}) \vec{j} + D_{i i}^2(t_{n.p}) \Omega_{a z i i}(t_{n.p}) \vec{k}. \end{aligned} \quad (32)$$

Модуль вектора $\vec{V}_{o t n i i}(t_{n.p})$ с учетом (31) при $t = t_{n.p}$ равен

$$\begin{aligned} V_{o t n i i}(t_{n.p}) &= \sqrt{\dot{D}_{i i}^2(t_{n.p}) + D_{i i}^2(t_{n.p}) \Omega_{a p i i}^2(t_{n.p})} = \\ &= D_{i i}(t_{n.p}) \sqrt{\frac{\dot{D}_{i i}^2(t_{n.p})}{D_{i i}^2(t_{n.p})} + \Omega_{a p i i}^2(t_{n.p})}, \end{aligned} \quad (33)$$

где

$$\Omega_{a p i i}^2(t_{n.p}) = \Omega_{a y i i}^2(t_{n.p}) + \Omega_{a z i i}^2(t_{n.p}). \quad (34)$$

Выражение для расстояния $d_{c b l i i}(t_{n.p})$ максимального сближения i -го ВС с носителем БРЛС согласно (1) и с учетом (32), (33) принимает вид

$$d_{c b l i i}(t_{n.p}) = D_{i i}(t_{n.p}) \frac{1}{\sqrt{1 + \mu_i(t_{n.p})}}, \quad (35)$$

$$\mu_i(t_{n.p}) = \frac{\dot{D}_{i i}^2(t_{n.p})}{D_{i i}^2(t_{n.p}) \Omega_{a p i i}^2(t_{n.p})}. \quad (36)$$

Время $t_{сбл\ i}(t_{н.р})$ достижения i -м ВС расстояния максимального сближения с носителем БРЛС согласно (2)

$$t_{сбл\ i}(t_{н.р}) = \frac{\sqrt{D_{и\ i}^2(t_{н.р}) - d_{сбл\ i}^2(t_{н.р})}}{V_{отн\ и\ i}(t_{н.р})}, \quad (37)$$

где $d_{сбл\ i}(t_{н.р})$ определяется выражениями (35), (36), а $V_{отн\ и\ i}(t_{н.р})$ — соотношениями (33), (34).

Соответственно, время $t_{ГОС\ i}(t_{н.р})$ достижения i -м ВС границы области столкновения в соответствии с (18) вычисляется по формуле

$$t_{ГОС\ i}(t_{н.р}) = t_{сбл\ i}(t_{н.р}) - \frac{\sqrt{R_{ст}^2 - d_{сбл\ i}^2(t_{н.р})}}{V_{отн\ и\ i}(t_{н.р})}, \quad (38)$$

где $t_{сбл\ i}(t_{н.р})$ определяется выражением (37).

Показатель $t_{в\ i}(t_{н.р})$, как отмечалось ранее, определяется выражением

$$t_{в\ i}(t_{н.р}) = \frac{D_{и\ i}(t_{н.р})}{|\dot{D}_{и\ i}(t_{н.р})|}. \quad (39)$$

Как следует из (33)–(38), для вычисления показателей $d_{сбл\ i}(t_{н.р})$, $t_{сбл\ i}(t_{н.р})$, $t_{ГОС\ i}(t_{н.р})$ необходимо определить параметр $\Omega_{ар\ и\ i}^2(t_{н.р})$, предварительно вычислив проекции $\Omega_{ауи\ i}(t_{н.р})$ и $\Omega_{азии\ i}(t_{н.р})$ вектора угловой скорости $\vec{\Omega}_{аи\ i}(t)$ вращения антенной СК $OX_a Y_a Z_a$ вокруг ЦМ самолета относительно нормальной СК.

Угловая скорость $\vec{\Omega}_{аи\ i}(t)$ обусловлена как угловыми перемещениями i -го ВС относительно связанной СК, которые характеризуются углами $\varphi_{ги\ i}(t)$ и $\varphi_{ви\ i}(t)$ и соответствующими угловыми скоростями $\omega_{ги\ i}(t)$ и $\omega_{ви\ i}(t)$, так и вращением связанной СК $OXYZ$ относительно нормальной СК $OX_g Y_g Z_g$, описываемым углами Эйлера: крена $\gamma(t)$, тангажа $\vartheta(t)$ и рыскания $\psi(t)$.

Можно показать [8], что при $t = t_{н.р}$ параметры $\Omega_{ауи\ i}(t_{н.р})$ и $\Omega_{азии\ i}(t_{н.р})$ определяются выражениями

$$\begin{aligned} \Omega_{ауи\ i}(t_{н.р}) &= \omega_{ги\ i}(t_{н.р}) + \cos \varphi_{ви\ i}(t_{н.р}) \omega_{уи}(t_{н.р}) - \\ &- \sin \varphi_{ви\ i}(t_{н.р}) \omega_{хи}(t_{н.р}), \quad \Omega_{азии\ i}(t_{н.р}) = \\ &= \cos \varphi_{ги\ i}(t_{н.р}) \omega_{ви\ i}(t_{н.р}) + \\ &+ \sin \varphi_{ги\ i}(t_{н.р}) \cos \varphi_{ви\ i}(t_{н.р}) \times \\ &\times \omega_{хи}(t_{н.р}) + \sin \varphi_{ги\ i}(t_{н.р}) \sin \varphi_{ви\ i}(t_{н.р}) \omega_{уи}(t_{н.р}) + \\ &+ \cos \varphi_{ги\ i}(t_{н.р}) \omega_{зи}(t_{н.р}), \end{aligned} \quad (40)$$

если отсчет углов бортовых пеленгов в БРЛС осуществляется относительно осей связанной СК, и выражениями

$$\begin{aligned} \Omega_{ауи\ i}(t_{н.р}) &= \omega_{ги\ i}(t_{н.р}) + \cos \varphi_{ви\ i}(t_{н.р}) \dot{\psi}_и(t_{н.р}), \\ \Omega_{азии\ i}(t_{н.р}) &= \cos \varphi_{ги\ i}(t_{н.р}) \omega_{ви\ i}(t_{н.р}) + \\ &+ \sin \varphi_{ги\ i}(t_{н.р}) \sin \varphi_{ви\ i}(t_{н.р}) \dot{\psi}_и(t_{н.р}), \end{aligned} \quad (41)$$

если отсчет углов выполняется относительно осей стабилизированной по крену и тангажу СК; здесь $\omega_{хи}(t_{н.р})$, $\omega_{уи}(t_{н.р})$, $\omega_{зи}(t_{н.р})$ — измеренные значения угловой скорости самолета на оси связанной СК.

Проекции $\omega_{хи}(t_{н.р})$, $\omega_{уи}(t_{н.р})$ и $\omega_{зи}(t_{н.р})$ связаны с измеренными значениями углов крена $\gamma(t)$, тангажа $\vartheta(t)$ и рыскания $\psi(t)$ и их производных $\dot{\gamma}(t) = d\gamma(t)/dt$, $\dot{\vartheta}(t) = d\vartheta(t)/dt$, $\dot{\psi}(t) = d\psi(t)/dt$ при $t = t_{н.р}$ соотношениями

$$\begin{aligned} \omega_{хи}(t_{н.р}) &= \dot{\gamma}_и(t_{н.р}) + \dot{\psi}_и(t_{н.р}) \sin \vartheta_и(t_{н.р}), \\ \omega_{уи}(t_{н.р}) &= \dot{\vartheta}_и(t_{н.р}) \sin \gamma_и(t_{н.р}) + \\ &+ \dot{\psi}_и(t_{н.р}) \cos \vartheta_и(t_{н.р}) \cos \gamma_и(t_{н.р}), \\ \omega_{зи}(t_{н.р}) &= \dot{\vartheta}_и(t_{н.р}) \cos \gamma_и(t_{н.р}) - \\ &- \dot{\psi}_и(t_{н.р}) \cos \vartheta_и(t_{н.р}) \sin \gamma_и(t_{н.р}). \end{aligned} \quad (42)$$

Таким образом, для расчетного момента времени $t = t_{н.р}$ получены все необходимые соотношения для определения показателей $d_{сбл\ i}(t_{н.р})$, $t_{сбл\ i}(t_{н.р})$, $t_{ГОС\ i}(t_{н.р})$ и $t_{в\ i}(t_{н.р})$ (соответственно формулы (35), (37), (38) и (39)). Это позволяет выполнить ранжирование ВС по степени опасности столкновения с самолетом-носителем БРЛС в полном соответствии с предложенным способом четырехэтапного ранжирования с использованием четырех экстремальных критериев (4), (10), (17) и (22). При этом необходимо предварительно вычислить параметры $\mu_i(t_{н.р})$, $\Omega_{ар\ и\ i}^2(t_{н.р})$ и $V_{отн\ и\ i}(t_{н.р})$ соответственно по формулам (36), (34) с учетом (40) или (41) и (33).

Результаты ранжирования ВС по степени опасности столкновения с самолетом-носителем БРЛС, полученные на первых трех этапах, используются при определении целесообразных маневров уклонения от столкновения, формировании сигналов управления самолетом, а также для индикации экипажу данных о воздушной обстановке. Использование результатов ранжирования ВС на дополнительном, четвертом этапе позволяет более оперативно реагировать на возможные изменения в воздушной обстановке в случае совершения воздушными судами маневров, в частности в целях предотвращения попадания ВС в зоны опасных метеообразований.

Следует отметить, что периодичность проведения ранжирования зависит от времени жизни

выбранной гипотезы относительного движения цели и защищаемого самолета, которое, как правило, составляет доли от времени соответствующего цикла работы БРЛС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный материал позволяет сделать следующие выводы.

Благодаря использованию четырех экстремальных критериев и процедур четырехэтапного ранжирования предложенный способ по сравнению с другими обеспечивает более высокую достоверность принятия правильного решения о степени опасности того или иного ВС в условиях интенсивного воздушного движения.

Согласно предложенному способу ранжирования решение по определению наиболее опасного конфликтующего ВС выносится на основе данных последовательности (19). Наиболее опасным в ряду (20) является ВС, которому в (19) соответствует минимальное значение показателя $t_{\text{ГОС}mn}(t_{\text{н.р}})$; с ростом индекса n степень опасности m -го конфликтующего ВС уменьшается.

Предложенный способ ранжирования ВС базируется на результатах измерений (оценивания) координат и параметров движения воздушных судов БРЛС, функционирующей в режиме МЦС. В данном режиме может осуществляться одновременное сопровождение большого числа ВС, что особенно важно для создания перспективных автономных СПС.

Для реализации четырехэтапного ранжирования воздушных судов по степени опасности столкновения необходимо для каждого i -го ВС измерить дальность $D_{\text{и}i}$, скорость ее изменения $\dot{D}_{\text{и}i}$, бортовые пеленги $\varphi_{\text{ги}i}$ и $\varphi_{\text{ви}i}$ ВС в азимутальной и угломестной плоскостях соответственно, а также угловые скорости $\omega_{\text{ги}i}$ и $\omega_{\text{ви}i}$. Кроме того, должны быть измерены углы крена γ , тангажа ϑ и рыскания ψ , а также соответствующие производные $\dot{\gamma}$, $\dot{\vartheta}$, $\dot{\psi}$. При этом параметры $D_{\text{и}i}$, $\dot{D}_{\text{и}i}$, $\varphi_{\text{ги}i}$, $\varphi_{\text{ви}i}$, $\omega_{\text{ги}i}$ и $\omega_{\text{ви}i}$ непосредственно измеряются (оцениваются) БРЛС, а параметры γ , ϑ , ψ , $\dot{\gamma}$, $\dot{\vartheta}$ и $\dot{\psi}$ — штатной инерциальной навигационной системой, благодаря чему не накладывается ограничений на возможности практической реализации предложенного способа ранжирования ВС.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-08-00060-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Топин В.А.* Глобальное АЗН-В. Научно-техническая информация. Сер. Авиационные системы. М.: НИЦ ГосНИИАС, 2014. № 4. С. 42.
2. *Меркулов В.И., Верба В.С., Ильчук А.Р., Кирсанов А.П.* Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов. Т. 3. Многоцелевое сопровождение. М.: Радиотехника, 2018.
3. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т. 1. РЛС — информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов / Под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. М.: Радиотехника, 2006.
4. *Белкин А.М., Миронов Н.Ф., Рублев Ю.И., Сарайский Ю.Н.* Воздушная навигация: Справочник. М.: Транспорт, 1988.
5. *Kochenderfer M.J., Holland J.E., James P.* // Lincoln Laboratory J. 2012. V. 19. № 1. P. 17.
6. *Lacher A.R., Maroney D.R., Zeitlin A.D.* // Proc. the USA/FAA Air Traffic Management R&D Seminar 2007. Barcelona. 2–5 Jul. Washington: FAA/Eurocontrol, 2007. P. 402.
7. *Temizer S., Kochenderfer M.J., Kaelbling L.P. et al.* // Proc. Amer. Inst. Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation, and Control Conf. Toronto. 2–5 Aug. 2010. Reston: AIAA, 2010. P. 8040.
8. Современное состояние и перспективы развития беспилотных авиационных систем XXI в. Аналитический обзор по материалам зарубежных информационных источников / Под ред. Е.А. Федосова. М.: ГосНИИАС, 2012.
9. *Верба В.С., Богачев А.С., Меркулов В.И., Михеев В.А.* // Радиотехника. 2018. № 2. С. 69.
10. Авиационные системы радиоуправления / Под ред. В.И. Меркулова. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008.
11. *Ярлыков М.С., Богачев А.С., Меркулов В.И., Дрогалин В.В.* Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов. Т. 2. Применение авиационных радиоэлектронных комплексов при решении боевых и навигационных задач / Под ред. М.С. Ярлыкова. М.: Радиотехника, 2012.
12. *Верба В.С., Меркулов В.И., Пляшечник А.С.* // Успехи совр. радиоэлектроники. 2020. Т. 74. № 9. С. 5.