

Радиолокационные и радионавигационные системы

DOI 10.24412/2221-2574-2024-2-52-58

УДК 621.396.96

ОСОБЕННОСТИ ВТОРИЧНОЙ И ТРЕТИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТАХ В МНОГОПОЗИЦИОННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗНЕСЁННЫХ НЕКОГЕРЕНТНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Пальгуев Дмитрий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники радиофизического факультета, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского» (ННГУ)¹

E-mail: palguev@rf.unn.ru

Ильясафов Александр Дмитриевич

кандидат технических наук, заместитель генерального директора АО «ФНПЦ «ННИИРТ»²

Пиунов Константин Николаевич

аспирант, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского» (ННГУ)¹

Багурин Андрей Сергеевич

аспирант, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского» (ННГУ)¹

¹Адрес: 603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23.

²Адрес: 603950, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Шапошникова, д. 5.

Аннотация: В работе рассмотрены способы межпозиционного отождествления (объединения) радиолокационной информации в многопозиционной радиолокационной системе. Основным назначением межпозиционного отождествления является повышение непрерывности и качества сопровождения воздушных объектов. В многопозиционной системе вследствие наблюдения за воздушными объектами с разных позиций РЛС под различными ракурсами с различными углами закрытия соотношение сигнал/шум, приемлемое для обнаружения, также будет отличаться в один и тот же промежуток времени. Обработка радиолокационной информации, поступающей от разных позиций РЛС, в одном пункте, может учитывать изменение качества поступающей информации от каждой РЛС в системе в целом, и тем самым повысить время непрерывного сопровождения воздушного объекта в системе. Для неустойчивых в плане сопровождения воздушных объектов рассмотренные способы позволяют уменьшить время, необходимое в соответствии с алгоритмами РЛС на завязку траекторий. В современных условиях подобные решения являются актуальными в отношении низковысотных и малоскоростных воздушных объектов, какими являются малогабаритные беспилотные летательные аппараты.

Ключевые слова: многопозиционная радиолокационная система, межпозиционное отождествление радиолокационной информации.

Введение

Повышение эффективности непрерывного траекторного сопровождения низковысотных и малоскоростных воздушных объектов является актуальной задачей современной радиолокации. Особенности такого класса воздушных

объектов (ВО), как малогабаритные беспилотные летательные аппараты (МБПЛА), являются малая эффективная площадь рассеивания (ЭПР), малые высоты и скорости, высокая манёвренность. В сочетании с рельефом местности, неизотропностью диаграмм направленно-

сти радиолокационных станции (РЛС) эти особенности составляют определённые трудности для обеспечения непрерывности сопровождения при сборе и обработке радиолокационной информации (РЛИ), в том числе в автоматизированных системах управления (АСУ).

Вместе с тем, наличие достаточно большого количества источников РЛИ позволяет предположить, что объединение траекторной информации при «мерцающих» трассах в соответствующей информационной системе может улучшить коэффициент проводки воздушных объектов. В ряде работ [1–3] рассматриваются вопросы траекторной обработки информации, завязке и отождествлении трасс в многопозиционных радиолокационных системах (МПРЛС). В частности, в работе [1] приводятся различные варианты объединения РЛИ в пространственно-некогерентных МПРЛС и отмечается, что в ряде случаев применение алгоритмов отождествления трасс в пунктах цифровой обработки информации МПРЛС приводит к достаточно стабильным результатам по вероятности правильного объединения не хуже 0,994. В работах [4, 5] отмечается актуальность непрерывности сопровождения МБПЛА и представлены варианты повышения качества проводки с использованием разнородных, в частности, оптических источников, или по траекторным признакам по результатам наблюдения в течение определённого периода времени.

Тем не менее, большинство существующих источников РЛИ не объединены в общую МПРЛС с временной привязкой, поэтому очевидно, что проблема с перезавязкой трасс в пределах зон обзора нескольких РЛС представляется задачей, решение которой может улучшить непрерывность сопровождения воздушных объектов.

1. Исходные данные

В соответствии с классификацией, приведённой в [1], будем рассматривать источники РЛИ, объединённые в пространственно-некогерентную МПРЛС, но не имеющих вре-

менной когерентности, то есть приёмопередатчики РЛС не синхронизированы по времени излучения импульсов или пачек импульсов. Будем полагать, что линии передачи данных от РЛС до пунктов сбора и обработки информации обладают достаточной пропускной способностью, чтобы передавать трассовую информацию (сообщения о ВО) без задержек, а сами РЛС имеют систему единого времени, способную обеспечить передачу времени локализации в каждом сообщении о ВО.

Очевидно, что на пункте сбора и обработки информации (ПСОИ) принимается трассовая (вторичная) информация о ВО, которая отождествляется по известным алгоритмам третичной обработки. В случае пересекающихся зон обзора РЛС на входе ПСОИ может присутствовать избыточная по параметрам информация, которая в случае устойчивого сопровождения по данным одного из источников для дальнейшей обработки не используется.

Предположим, что вследствие особенностей движения воздушного объекта (малая ЭПР, низковысотный, малоскоростной и т.п.), трасса по данным то от одного, то от другого источника прерывается, и в соответствии с алгоритмами завязки трасс во вторичной обработке на каждой РЛС, через определённое количество обзоров завязывается снова, но под другим номером. В моменты перезавязки трасс на нескольких источниках трасса будет потеряна и для потребителей, получающих информацию от ПСОИ или непосредственно от РЛС. Последующее появление трасс таких ВО требует их повторного распознавания и идентификации с трассами, имевшимися на сопровождении ранее. Соответственно, подобная ситуация приводит к временным задержкам и дополнительным сложностям для потребителей.

Для условия случайного пропадания любой из единичных отметок, метод отбора для каждого ВО и в каждый момент времени, траектории, построенной в какой-либо позиции МПРЛС [1, с. 390], для заданной ситуации не подходит. С некоторыми изменениями может быть использован метод весового объединения

траекторий — оптимальный алгоритм параллельного объединения оценок траекторий разных позиций, в предположении, что будет производиться объединение результатов реального единичного замера в экстраполированном стробе, рассчитанном по данным другой позиции МПРЛС. Необходимо отметить, что указанный метод теряет эффективность при манёвре ВО, особенно на начальных стадиях, когда на некоторых позициях МПРЛС манёвр обнаружен, а на остальных — нет [1, с. 390]. Тем не менее, начальное выражение для алгоритма параллельного объединения оценок параметров траекторий разных позиций для случая, когда оценки отсчётов, поступающие от разных позиций, не коррелированы, может быть использовано для дальнейших рассуждений и имеет вид [1, с. 391]:

$$\hat{\alpha}_k = \left(\sum_{i=1}^m \mathbf{T}_i^T \mathbf{P}_{k,i}^{-1} \mathbf{T}_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^m \mathbf{T}_i^T \mathbf{P}_{k,i}^{-1} \hat{z}_{k,i}, \quad (1)$$

где α_k — вектор состояния ВО; $\hat{\alpha}_k$ — сглаженная оценка вектора состояния ВО α_k ; $z_{k,i}$ — вектора состояний ВО в каждой позиции МПРЛС; i — номер позиции МПРЛС; k — порядковый номер измерения, соответствующий определённой трассе ВО; $\hat{z}_{k,i}$ — сглаженные оценки векторов состояний ВО $z_{k,i}$ в каждой позиции МПРЛС; $\mathbf{P}_{k,i}$ — корреляционная матрица i -ой позиции МПРЛС; \mathbf{T}_i — матрица преобразований декартовой системы координат $z_{k,i}$ относительно α_k .

Исходя из анализа (1) и начальных условий объединения результатов реального единичного замера в дважды экстраполированном стробе, в сложившейся ситуации необходим комбинированный алгоритм межпозиционного отождествления, который решал бы задачу определения принадлежности и объединения единичной отметки в экстраполированном стробе одной позиции МПРЛС с экстраполированной отметкой в стробе, полученной ранее в другой позиции. Для более точного решения этой задачи необходимо наличие дополнительной (избыточной) информации, которая

имеется на каждой РЛС, но при вторичной обработке по каналам передачи данных на ПСОИ не поступает, а именно: координаты экстраполированного центра строба автосопровождения, рассчитанного на позиции МПРЛС, ведущей устойчивое сопровождение ВО определённого, выбранного класса, а также время в следующем обзоре РЛС, на которое эта отметка экстраполирована. Соответственно, сохраняется привязка к номеру трассы и времени локации, которое было определено по результатам последнего единичного измерения.

Кроме временной задержки, которая должна быть в случае пространственно-некогерентных РЛС значительно меньше периода обзора РЛС, существует несколько задач, связанных с предлагаемым способом вторичной обработки РЛИ в МПРЛС:

1. Расчёт центра и размеров передаваемого с одной РЛС строба экстраполяции в соответствии с периодом обзора и среднеквадратическим отклонением (СКО) другой РЛС, на которую эти данные передаются.
 2. Оценка и передача особенностей манёвра и расчёт возможных погрешностей при таком способе обработки.
 3. Приближенная оценка вычислительных возможностей ЭВМ вторичной обработки РЛС при проведении дополнительных вычислений.
- Ниже рассмотрим две первые задачи и возможные подходы к их решению.

2. Способы объединения отметок во временно-когерентной и пространственно-некогерентной МПРЛС с использованием экстраполированных стробов

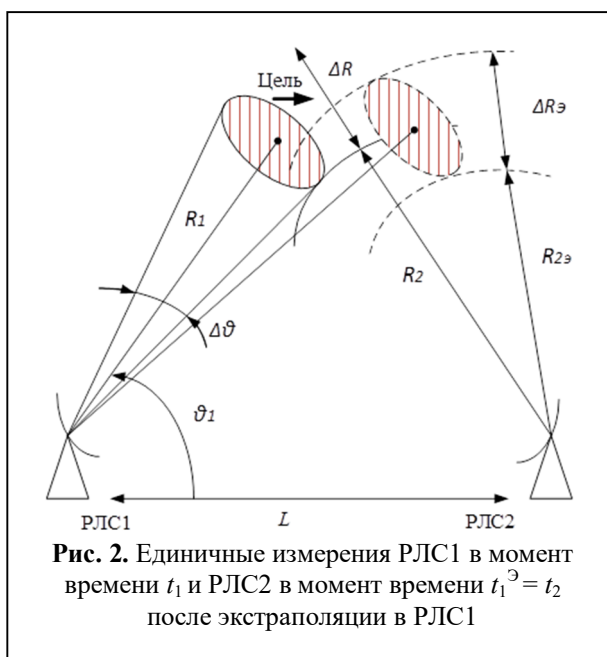
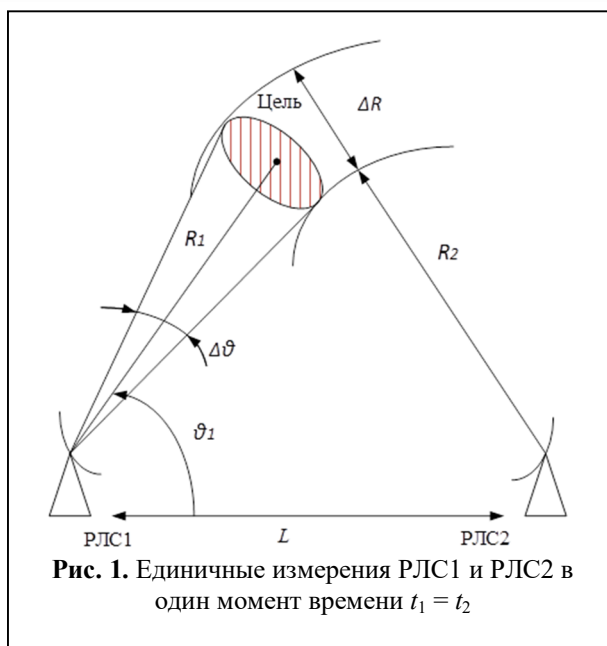
Предположим, что, так же, как и в МПРЛС с временной когерентностью, имеется ПСОИ с возможностью дополнительной, не только третичной обработки РЛИ, и возможностью использования избыточных параметров, которые могут быть переданы в сообщениях о ВО на его входе, тогда можно рассмотреть следующие способы повышения непрерывности сопровождения воздушных объектов в пространственно-некогерентной МПРЛС.

Известно, что при вторичной обработке ЭВМ каждой РЛС при сопровождении ВО рассчитывает строб автосопровождения на следующий после текущего обзор при экстраполяции траектории. Предположим, что координаты центра stroba, экстраполированные на следующий обзор РЛС, передаются на ПСОИ и далее на вторую РЛС после текущего сообщения о ВО и после экстраполяции stroba автосопровождения.

Если время задержки при передаче и обработке сообщения о ВО на ПСОИ значительно меньше времени обзора РЛС, то, с учётом временной некогерентности, координаты центра stroba могут быть пересчитаны на другой РЛС для своего следующего периода обзора. При обнаружении сигнала в переданном и экстраполированном strobe на следующем обзоре второй РЛС можно с большой вероятностью предположить, что полученный сигнал является отметкой о ВО, уже сопровождаемом первой РЛС. В таком случае, процесс завязки трассы можно не проводить, а присвоить полученной отметке номер, связанный с номером трассы первой РЛС ранее сопровождаемого ВО. Таким образом, при пропадании отметок о трассе ВО на первой РЛС, если вторая РЛС получает хотя бы единичные отметки по результатам первичной обработки, на РЛС и, соответственно, на ПСОИ будет формироваться непрерывная трасса с тем же номером, без перезавязки, повторного распознавания и идентификации.

Для пояснения алгоритма передачи данных о центре экстраполированного stroba в МПРЛС, состоящей из двух позиций, приведём рис. 1 для случая моментов локации $t_1 = t_2$ для РЛС1 и РЛС2 (МПРЛС с временной когерентностью), и рис. 2 для $t_1^{\ominus} = t_2$ (пространственно-некогерентная МПРЛС), то есть единичное измерение РЛС2 происходит в момент времени t_1^{\ominus} , так как РЛС не синхронизированы по времени.

Из рис. 1 и рис. 2 видно, что расчёт размеров stroba для РЛС2 можно получить двумя способами: по stroбу, рассчитанному в соот-



ветствии с рис. 2, и по stroбу, рассчитанному в РЛС2 с учётом СКО РЛС1 и РЛС2.

Для первого случая применим расчёт для МПРЛС, приведённый в [1]. Если $R_1 \gg L$, с учётом $\cos(\Delta\theta/2) \cong 1$, $\sin(\Delta\theta/2) \cong \Delta\theta/2$

$$\Delta R \cong L \cdot \sin(\theta) \cdot \Delta\theta \cong L_{\text{эф}} \Delta\theta. \quad (2)$$

Ширина stroba ΔR пропорциональна эффективной базе между позициями и ошибке измерения угловой координаты воздушного объекта (цели) в плоскости базы. В трёхмерном пространстве, при измерениях дальности

R , азимута β и угла места ε при $R \gg L$

$$\Delta R \cong L_{\text{эф}\beta} \Delta\beta + L_{\text{эф}\varepsilon} \Delta\varepsilon, \quad (3)$$

где $L_{\text{эф}\beta} = L \cos(\varepsilon)\sin(\beta)$, $L_{\text{эф}\varepsilon} = L \cos(\beta)\sin(\varepsilon)$ — эффективные базы в азимутальном и угло-местном направлениях.

Для второго случая будем полагать, что сведения о манёвре воздушного объекта от РЛС1 к РЛС2 не передаются, как и предыдущие отметки о трассе ВО. Поэтому для экстраполяции центра строба в РЛС2 примем, что движение ВО прямолинейное и равномерное, как в третичной обработке [2]. Оценки векторов состояний ВО $z_{k,i}$ в соответствии с (1) сглаженные, поэтому перемещение центра строба ΔD_{S1-2} для РЛС2 определяется как

$$\Delta D_{S1-2} = t_2^{\ominus} V_{\text{во}}, \quad (4)$$

где $t_2^{\ominus} = t_1^{\ominus} + t_{\text{расч}} \text{ РЛС2}$, а $t_{\text{расч}} \text{ РЛС2}$ — экстраполированное время локации отметки на следующий период обзора для РЛС2.

Расчёт размеров строба в этом случае проводится численным методом решения обратной задачи — нахождением пределов интегрирования Δx , Δy , Δz , ΔV_x , ΔV_y , ΔV_z [3]

$$P_{\text{объед}} = \frac{1}{(2\pi)^3 \sqrt{|\Psi_{12}|}} \left(\int_0^{\Delta x} \int_0^{\Delta y} \int_0^{\Delta z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta x^2}{\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2} + \frac{\Delta y^2}{\sigma_{y_1}^2 + \sigma_{y_2}^2} + \frac{\Delta z^2}{\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2} \right) \right] d\Delta x d\Delta y d\Delta z \right) \times \\ \times \left(\int_0^{\Delta V_x} \int_0^{\Delta V_y} \int_0^{\Delta V_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_x^2}{\sigma_{V_{x1}}^2 + \sigma_{V_{x2}}^2} + \frac{\Delta V_y^2}{\sigma_{V_{y1}}^2 + \sigma_{V_{y2}}^2} + \frac{\Delta V_z^2}{\sigma_{V_{z1}}^2 + \sigma_{V_{z2}}^2} \right) \right] d\Delta V_x d\Delta V_y d\Delta V_z \right), \quad (5)$$

где пределы интегрирования Δx , Δy , Δz , ΔV_x , ΔV_y , ΔV_z определяются в соответствии с требуемой потребителем вероятностью объединения информации. В [4] также показано, что, применив функцию Лапласа вида

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (6)$$

выражение (6) для вероятности объединения информации по трём координатам можно преобразовать к виду:

$$P_{\text{объед}} = \frac{2\Phi(\Delta x)}{\sigma_x} \frac{2\Phi(\Delta y)}{\sigma_y} \frac{2\Phi(\Delta z)}{\sigma_z}, \quad (7)$$

где $t_x = \frac{\Delta x}{\sigma_x}$, $t_y = \frac{\Delta y}{\sigma_y}$, $t_z = \frac{\Delta z}{\sigma_z}$, а $\sigma_x = \sqrt{\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2}$,

$\sigma_y = \sqrt{\sigma_{y_1}^2 + \sigma_{y_2}^2}$, $\sigma_z = \sqrt{\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2}$ соответственно.

Отметим, что и в первом, и во втором способе расчёта стробов их размеры получаются больше, чем в случае автосопровождения в одной отдельно взятой РЛС с учётом погрешности экстраполяции при криволинейном движении [3, 6]. Кроме того, как принято во вторичной обработке, вокруг стробов автосопровождения строятся стробы манёвра [7–11], чтобы не потерять сопровождение воздушного объекта в момент манёвра между периодами обзора.

Таким образом, при первом способе построения строба в работе [1] предполагается (рис. 1), что МПРЛС обладает временной когерентностью, которая, в свою очередь, должна обеспечиваться системой синхронизации с характеристиками, обеспечивающими синхронную работу приёмников и передатчиков РЛС, а также антенных приводов по ориентированию диаграмм направленности РЛС на воздушные объекты в моменты локации. Пункт совместной обработки РЛИ и система передачи данных должны обладать достаточной вычислительной мощностью как для текущего автосопровождения и поиска ВО, так и для расчёта экстраполированных стробов при межпозиционном отождествлении (объединении) РЛИ, если этот расчёт производится в пункте совместной обработки, а не в ЭВМ вторичной обработки РЛС (ЭВМ ВОИ РЛС). С современной технической точки зрения эти задачи выполнимы в МПРЛС, объединённой одним пунктом обработки и системой синхронизации.

Второй способ построения строба (рис. 2) предполагает предварительный расчёт в пункте совместной обработки вероятных областей пересечения зон обзора соседних РЛС, выдачу экстраполированного центра строба на предпо-

лагаемую к непрерывному сопровождению РЛС, и расчёт нового, экстраполированного строба с учётом темпа обзора на второй РЛС. Этот способ не требует временной когерентности РЛС, но предполагает использование ЭВМ ВОИ РЛС для построения дополнительного экстраполированного строба в дополнение к текущим задачам автосопровождения и поиска.

Выводы

1. Рассмотрены два способа межпозиционного отождествления (объединения) РЛИ в МПРЛС. Первый способ предполагает временную когерентность между позициями в МПРЛС и расчёт стробов в пункте совместной обработки. Второй способ может быть применён для варианта пространственно-некогерентных РЛС, объединённых в МПРЛС, расчёт стробов при этом производится в ЭВМ ВОИ РЛС.

2. Размеры стробов автосопровождения, рассчитываемые по обоим вариантам, будут большими, чем при сопровождении в одной РЛС. Эта особенность связана с учётом погрешностей при расчётах (рис. 1, выражения (2), (3)), а также временной задержкой при переносе времени локации на следующий обзор РЛС (выражения (5), (7)).

3. В качестве недостатка необходимо отметить, что в обоих случаях требуется определённая доработка программного обеспечения РЛС и ПСОИ, что делает достаточно сложно выполнимым применение серийно выпускаемых РЛС в МПРЛС с задачей повышения качества сопровождения воздушных объектов рассмотренными способами.

Литература

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.
2. Кузьмин С.З. Основы цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Сов. радио, 1974. 432 с.
3. Пальгеев Д.А. Сочетание алгоритмов обработки информации и структуры информационной системы как инструмент построения информационной системы сетевой структуры // Радиопромышленность. 2021. Т. 31. №2. С. 49–60.
4. Пальгеев Д.А., Пархачев В.В., Пиунов К.Н., Кудряшова О.Е., Васильев Д.А. Распознавание воздушных объектов типа "птицы" по траекторным признакам // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022. № 4(48). С. 39–50.
5. Пальгеев Д.А., Фитасов Е.С., Ильясов А.Д. Система распознавания малоразмерных малоскоростных воздушных объектов по объединенной разнородной информации и неполным данным от пространственно-разнесенных датчиков // Датчики и системы. 2023. №1(266). С. 16–22.
6. Пальгеев Д.А., Шентябин А.Н. К вопросу оценки вероятности объединения радиолокационной информации при третичной обработке в сетевых структурах // Радиопромышленность. 2020. Т. 30, № 2. С. 32
7. Справочник по основам радиолокационной техники / А.М. Педак [и др.]. М.: Военное издательство, 1967. 768 с.
8. Ботов М.И., Вяхирев В.А. Основы теории радиолокационных систем и комплексов. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. 530 с.
9. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Изд. 3-е, перераб. и доп. Сер. Учебник для ВУЗов. М.: Радиотехника, 2015. 440 с.
10. Сколник М. Справочник по радиолокации. Книга 1 / Под ред. М. Сколника. 3-е издание. Перевод с английского под общей редакцией В.С. Вербы. В 2-х книгах. М.: Техносфера, 2014. 672 с.
11. Сколник М. Справочник по радиолокации. Книга 2 / Под ред. М. Сколника. 3-е издание. Перевод с английского под общей редакцией В.С. Вербы. В 2-х книгах. Москва: Техносфера, 2014. 680 с.

Поступила 2 мая 2024 г.

English

FEATURES OF SECONDARY AND TERTIARY PROCESSING OF INFORMATION ABOUT AERIAL OBJECTS IN MULTI-POSITION SPATIALLY SPACED INCOHERENT RADAR SYSTEMS

Dmitry Anatolyevich Paluev — PhD, Associate Professor, Department of Radio Engineering, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod¹.

E-mail: paluev@rf.unn.ru

Alexander Dmitrievitch Ilyasafov — PhD, Deputy General Director, Nizhny Novgorod Research Institute of Radio Engineering².

Konstantin Nikolaevich Piunov — Post-graduate Student, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod¹.

Andrey Sergeevich Bagurin — Post-graduate Student, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod¹.

¹Address: 603950, Russian Federation, Nizhny Novgorod, Gagarin Ave., 23.

²Address: 603950, Russian Federation, Nizhny Novgorod, Shaposhnikova Str., 5.

Abstract: The use of multi-position radar systems makes it possible to improve the quality of tracking air objects by overlapping radar viewing areas and processing radar information from different radars in one information collection and processing point. According to the accepted classification, multi-position radar systems can be coherent, temporally coherent and spatially incoherent. The paper considers the methods of inter-position identification (unification) of radar information in time-coherent and spatially incoherent multi-position radar systems. The main purpose of the inter-position identification is to increase the continuity and quality of the control of air objects. In a multi-position system, due to the observation of aerial objects from different radar positions from different angles, with different closing angles, the signal-to-noise ratio acceptable for detection will also differ in the same time interval. Processing radar information coming from different radar positions at one point can take into account changes in the quality of incoming information from each radar in the system as a whole, and thereby increase the time of continuous tracking of an air object in the system. For failures in terms of tracking aerial objects, the considered methods make it possible to reduce the time required in accordance with radar algorithms to set trajectories. The basis of the methods under consideration are variants of calculations of extrapolated strobes, with the starting point being the coordinates of the center of the strobe transmitted from one radar station to another. In modern conditions, such solutions are relevant for low-altitude and low-speed air objects, such as small-sized unmanned aerial vehicles.

Keywords: multi-position radar system, inter-position identification of radar information.

References

1. *Chernyak V.S.* Multi-position radar. Moscow: Radio i svyaz', 1993. 416 p.
2. *Kuzmin S.Z.* Fundamentals of digital processing of radar information. Moscow: Sovetskoe Radio, 1974. 432 p.
3. *Palguev D.A.* Combination of algorithms for information processing and the structure of the information system as a tool for building an information system of a network structure. Radiopromyshlennost'. 2021. Vol. 31. No. 2. Pp. 49–60.
4. *Palguev D.A., Parkhachev V.V., Piunov K.N., Kudryashova O.E., Vasiliev D.A.* Recognition of aerial objects of the "bird" type by trajectory signs. Radio and telecommunication systems. 2022. No. 4(48). Pp. 39–50.
5. *Palguev D.A., Fitasov E.S., Ilyasafov A.D.* The recognition system for small-sized low-speed aerial objects based on combined heterogeneous information and incomplete data from spatially spaced sensors. Sensors and Systems. 2023. No.1 (266). Pp. 16–22.
6. *Palguev D.A., Shentyabin A.N.* On the issue of estimating the probability of combining radar information during tertiary processing in network structures. Radiopromyshlennost'. 2020. Vol. 30, No. 2. P. 32
7. Handbook of the basics of radar technology. *A.M. Pedak* [et al.]. Moscow: Voennoe izdatel'stvo, 1967. 768 p.
8. *Botov M.I., Vyakhirev V.A.* Fundamentals of the theory of radar systems and complexes. Krasnoyarsk: SFU, 2013. 530 p
9. *Bakulev P.A.* Radar systems. 3rd edition, revised. and additional Ser. Textbook for universities. Moscow: Radiotekhnika, 2015. 440 p.
10. *Skolnik M.* Handbook of radar. Book 1. Edited by *M. Skolnik*. 3rd edition. Translated from English under the general editorship of *V.S. Verba*. In 2 books. Moscow: Tehnosfera, 2014. 672 p.
11. *Skolnik M.* Handbook of radar. Book 2. Edited by *M. Skolnik*. 3rd edition. Translated from English under the general editorship of *V.S. Verba*. In 2 books. Moscow: Tehnosfera, 2014. 680 p.