

УДК 621.396.7:623.746.4-519

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА «СОПРОВОЖДЕНИЕ-ДО-ОБНАРУЖЕНИЯ»
В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ОБНАРУЖЕНИЯ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Д.С. НЕФЁДОВ¹, С.М. КОСТРОМИЦКИЙ²

¹Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»
(г. Минск, Беларусь)

²Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси
(г. Минск, Беларусь)

E-mail: nooff85@mail.ru

Аннотация. Доклад посвящен исследованию метода «сопровождение-до-обнаружения», реализованного в специализированной радиолокационной станции (РЛС) обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Метод позволяет повысить дальность обнаружения БПЛА при сохранении приемлемого количества ложных срабатываний РЛС за счет совместного выбора порога первичного обнаружения и параметров алгоритма обнаружения траекторий. Рассмотрены особенности реализации алгоритма обнаружения и сопровождения траекторий в специализированной РЛС обнаружения БПЛА. Получены аналитические выражения для показателей эффективности РЛС, учитывающие взаимное влияние порога первичного обнаружения и параметров алгоритма обнаружения и сопровождения траекторий. На примере типовой двухкоординатной РЛС обнаружения БПЛА продемонстрирована потенциальная возможность увеличения дальности обнаружения до 70 %, что эквивалентно приросту в пороговом отношении сигнал / шум на 9 дБ.

Abstract. The report is devoted to the study of the «Track-before-Detect» method implemented in a specialized radar for detecting unmanned aerial vehicles (UAVs). The method makes it possible to increase the detection range of UAVs while maintaining an acceptable number of false radar alarms by jointly selecting the threshold for initial detection and the parameters of the trajectory detection algorithm. The features of the implementation of the trajectory detection and tracking algorithm in a specialized UAV detection radar are considered. Analytical expressions for radar performance indicators have been obtained, taking into account the mutual influence of the initial detection threshold and the parameters of the trajectory detection and tracking algorithm. Using the example of a typical UAV detection radar, the potential for increasing the detection range to 70 % is demonstrated, which is equivalent to an increase in the threshold signal-to-noise ratio by 9 dB.

Введение

Радиолокационное обнаружение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) характеризуется рядом особенностей, которые требуют корректировки подходов к построению специализированных радиолокационных станций (РЛС) для их обнаружения. К наиболее существенным особенностям относятся малые значения эффективной поверхности рассеяния, высокая маневренность, малые высоты и скорости полета БПЛА, обнаружение в условиях интенсивных отражений от местных предметов, что требует применения специальных мер повышения дальности обнаружения.

При ограничении излучаемой мощности, определяемой необходимостью обеспечения скрытности и экологичности РЛС, снижение порогового отношения сигнал / шум (порога первичного обнаружения) является наиболее реальным вариантом увеличения дальности обнаружения БПЛА. Основным недостатком данного варианта – значительное возрастание количества ложных превышений порога, борьба с которыми может осуществляться применением различных методов «сопровождение-до-обнаружения». Смысл предлагаемого метода заключается в том, что обнаружение траектории отождествляется с обнаружением цели, а возросшая первичная вероятность ложной тревоги возвращается к приемлемому значению за счет «фильтрующей способности» более «жестких» алгоритмов обнаружения траекторий.

Доклад посвящен рассмотрению совместного влияния порога первичного обнаружения радиолокационных сигналов и параметров алгоритма обнаружения траекторий на показатели эффективности РЛС. В качестве показателей эффективности РЛС рассмотрены условная вероятность ложного обнаружения траектории, среднее количество траекторий, находящихся в обработке РЛС, условная вероятность правильного обнаружения цели и связанная с ней дальность обнаружения.

Описание алгоритма обнаружения и сопровождения траекторий в специализированной РЛС обнаружения БПЛА

Для обнаружения и сопровождения траекторий используется распространенный в практике построения РЛС алгоритм, основанный на методе серийных испытаний (cascaded logic algorithm) [1, 2]. В основе алгоритма лежит последовательная процедура обнаружения и сопровождения траекторий по критерию вида « $2/M + n/N - L_{сбр}$ », предполагающая: завязку траектории по критерию « $2/M$ » – наличие не менее двух обнаруженных отметок, отождествленных с траекторией, в M последовательных циклах обзора; подтверждение траектории по критерию « n/N » – наличие не менее n обнаруженных отметок, отождествленных с траекторией, в N последовательных циклах обзора; сопровождение траектории с возможностью сброса в случае отсутствия обнаруженных отметок, отождествленных с ней, в $L_{сбр}$ последовательных циклах обзора.

Рассматривается специализированная РЛС предназначена для эффективного обнаружения БПЛА, преимущественно малоразмерных и высокоманевренных целей. Эффективное обнаружение БПЛА достигается [3, 4]:

- реализацией максимально возможного времени когерентного накопления, выбранного на основании времени корреляции флуктуаций сигналов, отраженных от БПЛА, и обуславливающего высокую разрешающую способность по скорости;
- снижением порога первичного обнаружения, с целью обеспечения приемлемой условной вероятности правильного обнаружения;
- высоким темпом обзора, достигающим значений вплоть до 0,25...1 с и реализацией сложных процедур междуобзорной обработки.

Перечисленные особенности РЛС определяют принципиальные отличия алгоритма обнаружения траекторий БПЛА, к которым относятся:

- функционирование в условиях большого количества обнаруженных отметок, вызванного снижением порога первичного обнаружения;
- целесообразность использования оценки радиальной скорости цели при формировании корреляционных стробов, позволяющая ограничить их размеры на этапах завязки и подтверждения;
- необходимость отождествления обнаруженных отметок, попавших в пересекающиеся стробы захвата (сопровождения) нескольких траекторий, со всеми из них;
- формирование новых траекторий по всем новым обнаруженным отметкам (в том числе при условии их попадания в стробы захвата и сопровождения каких-либо траекторий).

С учетом изложенных особенностей рассмотрим процедуру обнаружения и сопровождения траектории цели на примере критерия « $2/2 + 3/5 - 2$ ». Для пояснений представлен рисунок 1, иллюстрирующий индикатор «азимут-дальность» 2D РЛС секторного обзора.

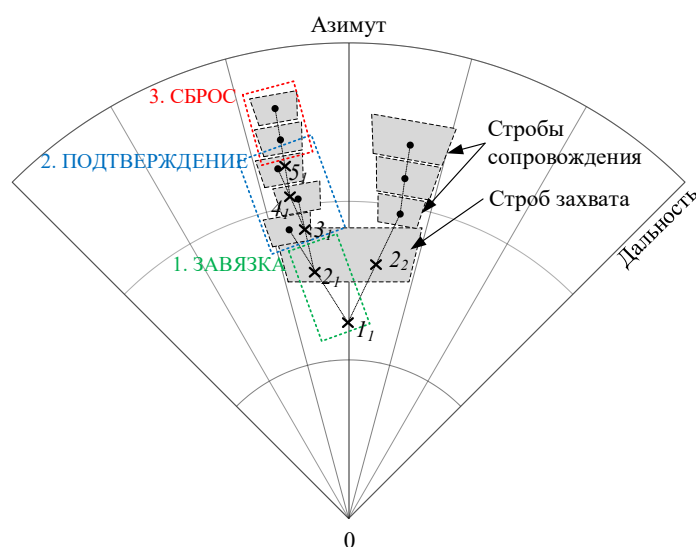


Рис. 1. Изображение индикатора «азимут-дальность» 2D РЛС секторного обзора

Обнаруженная отметка I_1 служит началом новой траектории. На этапе завязки траектории формируется строб захвата, использующий информацию о максимальной, тактически оправданной скорости цели, ошибках первичного измерения дальности, азимута и радиальной скорости цели:

$$\delta r_{\text{захв}} = k_r \sqrt{\sigma_r^2 T_{\text{обз}}^2 + 2\sigma_r^2}; \quad (1)$$

$$\delta \beta_{\text{захв}} = 2 \left(\arctg \left[\frac{T_{\text{обз}} (V_{\text{max}} - \hat{V}_r)}{\hat{r} - 3\sigma_r} \right] + 3\sigma_\beta \right), \quad (2)$$

где k_r – коэффициент уширения стога захвата по дальности; $T_{\text{обз}}$ – цикл обзора – время, соответствующее времени однократного просмотра всех элементов разрешения РЛС; V_{max} – максимальная скорость цели; $\hat{r}, \hat{V}_r$ – оценка дальности и радиальной скорости цели; $\sigma_r, \sigma_\beta, \sigma_{V_r}$ – среднеквадратические ошибки (СКО) оценок дальности, азимута и радиальной скорости цели.

При подтверждении траектории, когда она содержит не менее двух отметок, что позволяет сформировать оценку полного вектора скорости движения цели, формируются стробы сопровождения:

$$\delta r_{\text{сопр}} = k_r \sqrt{\sigma_r^2 T_{\text{обз}}^2 + 2\sigma_r^2}; \quad (3)$$

$$\delta \beta_{\text{сопр}} = k_\beta \sqrt{\sigma_\beta^2 T_{\text{обз}}^2 + 2\sigma_\beta^2}, \quad (4)$$

где k_β – коэффициент уширения стога по азимуту; σ_β – СКО оценки производной азимута.

Центры стробов сопровождения соответствуют экстраполированным координатам цели на следующий цикл обзора, а размеры определяются ошибками измерения дальности, азимута и скорости цели (по двум координатам). Коэффициенты уширения, регулирующие размеры стробов, выбираются в зависимости от помеховой обстановки и необходимости обнаружения возможного маневра сопровождаемой цели.

Отдельное внимание необходимо уделить возможности сопровождения цели по радиальной скорости, как например это реализовано в [5]. В отличие от дальности и азимута, которые определяются фактическим расположением цели в пространстве и изменяются относительно медленно, радиальная скорость, особенно у интенсивно маневрирующего БПЛА, может изменяться довольно быстро. В этом случае подходы к оценке радиального ускорения цели, выбора коэффициентов уширения стробов захвата и сопровождения должны отличаться, что требует рассмотрения в рамках отдельных исследований.

Для получения практических оценок размеров стробов захвата и сопровождения рассмотрим типовую РЛС обнаружения БПЛА X диапазона длин волн с параметрами: $T_{\text{обз}} = 1,5$ с; $\Delta \beta_{0,5} = 10^\circ$ – разрешающая способность по азимуту; $\beta_{\text{max}} = 90^\circ$ – сектор работы РЛС; $r_{\text{max}} = 6000$ м – приборная дальность; $T_n = 82$ мс – время наблюдения что соответствует 2048 импульсам когерентного накопления; $\Delta_f = 12$ Гц ($\Delta_{V_r} = 0,18$ м/с) – разрешающая способность по частоте Доплера (радиальной скорости); $\Delta_r = 15$ м – разрешающая способность по дальности; $N_\Sigma = 1\,972\,800$ – общее количество элементов разрешения (азимут-дальность-радиальная скорость); $\sigma_r = 1,5$ м; $\sigma_\beta = 1^\circ$; $\sigma_{V_r} = 0,02$ м/с соответственно. На основании выражений (1)–(4) можно получить, что при коэффициентах уширения равных 5...7, размеры стробов захвата и сопровождения примерно соответствуют одному элементу разрешения РЛС по дальности и азимуту. Примечательным является существенное ограничение размеров стробов, которое обусловлено использованием оценки радиальной скорости цели. Так, например, сравнивая размер стога захвата по дальности, полученного по выражению (1) с размерами стога захвата, вычисленного при отсутствии оценки радиальной скорости цели ($\delta r_{\text{сопр}} = 2(T_{\text{обз}} V_{\text{max}} + 3\sigma_r) \approx 150$ м при $V_{\text{max}} = 50$ м/с), можно отметить десятикратное уменьшение его размера.

В первом приближении предлагается считать, что размеры стробов сопровождения за несколько смежных циклов обзора РЛС не будут превышать некоторых фиксированных значений, определяемых характеристиками

РЛС, что позволяет получить аналитические выражения для условной вероятности ложного обнаружения траектории для произвольного критерия подтверждения « n / N ».

Оценка показателей эффективности РЛС

В качестве показателей эффективности при определении зависимостей порога первичного обнаружения и параметров алгоритма обнаружения и сопровождения траекторий (вид критерия, размеры стробов захвата и сопровождения и др.) рассматриваются:

- максимальное количество траекторий, находящихся в обработке, характеризующее нагрузку на вычислительные средства РЛС;
- условная вероятность обнаружения ложной траектории, характеризующая устойчивость РЛС к ложным срабатываниям;
- условная вероятность правильного обнаружения цели и связанная с ней дальность обнаружения, характеризующие прирост в эффективности РЛС за счет снижения порога первичного обнаружения.

На основании анализа алгоритма обнаружения и сопровождения траекторий и его особенностей получено выражение для определения максимального количества траекторий, находящихся в обработке РЛС [6]:

$$N_{Tp\max} = (M-1)\bar{N}_{ЛОтм} + N\bar{N}_{ЛПр1} - \sum_{i=N-n+1}^{N-1} (N-i)\bar{N}_{сбр1,i} + L_{\max}\bar{N}_{ЛПр2} - \sum_{i=L_{сбр}}^{L_{\max}-1} (N-i)\bar{N}_{сбр1,i}, \quad (5)$$

где $\bar{N}_{ЛОтм}$ – среднее количество обнаруженных ложных отметок за один цикл обзора; $\bar{N}_{ЛПр1}$, $\bar{N}_{ЛПр2}$ – среднее количество ложных траекторий, прошедших этап завязки и подтверждения соответственно; $\bar{N}_{сбр1,i}$, $i = N-n+1, N-1$ – среднее количество ложных траекторий, сбрасываемых на i -м цикле этапа подтверждения; $\bar{N}_{сбр2,i}$, $i = L_{сбр}, L_{\max}-1$ – среднее количество ложных траекторий, сбрасываемых на i -м цикле этапа сопровождения; $L_{\max}$ – максимальное количество циклов обзора, требуемого для сброса сопровождаемых ложных траекторий, порожденных ложными отметками, обнаруженными на $(i - L_{\max} - N - M)$ -м цикле обзора.

Существенное влияние на количество траекторий, находящихся в обработке РЛС, оказывает порог первичного обнаружения, от которого зависит условная вероятность ложной тревоги в элементе разрешения РЛС и среднее количество обнаруженных ложных отметок за один цикл обзора, а также параметры алгоритма обнаружения и сопровождения траекторий, определяющие среднее количество ложных траекторий, прошедших этапы завязки и подтверждения.

При условии гауссовского шума и равенства условных вероятностей ложной тревоги во всех элементах разрешения РЛС выражение для среднего количества обнаруженных ложных отметок в зоне обзора РЛС за один цикл обзора имеет вид [7, 8]:

$$\bar{N}_{ЛОтм} = N_{\Sigma}F = N_{\Sigma} \exp\left(-\frac{z_*}{k_{сн}\bar{Z}_0}\right). \quad (6)$$

где F – условная вероятность ложной тревоги в элементе разрешения РЛС; z_* – порог первичного обнаружения, выставленный из условия наличия одной ложной отметки в зоне обзора РЛС за цикл обзора; $k_{сн}$ – коэффициент снижения порога первичного обнаружения; $\bar{Z}_0$ – среднее значение квадрата модуля реализации входного воздействия РЛС на выходе квадратичного детектора при отсутствии полезного сигнала.

Среднее количество ложных траекторий, прошедших этап завязки и подтверждения (передаваемых на сопровождение РЛС) определяются соотношениями [6]:

$$\bar{N}_{ЛПp1} = \bar{N}_{ЛОmm} F_{зав} \prod_{j=2}^M \frac{\bar{N}_{ЛОmm} N_{стр.захв_j}}{N_{\Sigma}}, \forall j \in \{2, \dots, M\} : \frac{\bar{N}_{ЛОmm} N_{стр.захв_j}}{N_{\Sigma}} > 1; \quad (7)$$

$$\bar{N}_{ЛПp2} = F_{подтв} \bar{N}_{ЛПp1}, \quad (8)$$

где $F_{зав i} = 1 - \prod_{j=2}^M \prod_{k=N_{j1,i}}^{N_{j1,i} + N_{стр.захв_j,i}} (1 - F_{k,j})$ – вероятность события, что по i -й ложной отметке, обнаруженной в произвольном цикле обзора, завяжется траектория; $F_{k,j}$ – условная вероятность ложной тревоги в k -м элементе разрешения РЛС на j -м цикле обзора; $N_{j1,i}$ – номер первого элемента разрешения РЛС в строке захвата для i -й отметки на j -м цикле обзора; $N_{стр.захв_j,i}$ – количество элементов разрешения РЛС в строке захвата для i -й отметки на j -м цикле обзора; $F_{подтв} = \sum_{j=n}^N C_N^j F_{стр.сопр}^j (1 - F_{стр.сопр})^{N-j}$ – вероятность того, что ложная траектория после этапа завязки пройдет этап подтверждения; $F_{стр.сопр} = 1 - (1 - F)^{N_{стр.сопр}}$ – вероятность обнаружения не менее одной ложной отметки в строке сопровождения, содержащем $N_{стр.сопр}$ элементов разрешения РЛС.

Условная вероятность обнаружения ложной траектории равна произведению вероятностей:

$$F_{ЛПp} = F F_{зав} F_{подтв}. \quad (9)$$

Условная вероятность правильного обнаружения, для гауссовских флуктуаций комплексных амплитуд отраженного сигнала и шума, определяется выражением [7]:

$$D = F^{\frac{1}{1+\rho}}. \quad (10)$$

где ρ – отношение сигнал / шум на выходе квадратичного детектора устройства обработки отраженного сигнала.

Дальность обнаружения рассчитывается на основании соотношения [7]:

$$r_{обн} = \sqrt[4]{\frac{k}{\rho_{mp}(D, F)}}, \quad (11)$$

где k – коэффициент, зависящий от параметров РЛС и цели; ρ_{mp} – отношение сигнал / шум, требуемое для обнаружения цели с заданными вероятностями D и F .

Оценка возможности снижения порога первичного обнаружения осуществлена на примере двухкоординатной РЛС с параметрами, приведенными выше. Для 1972800 элементов разрешения РЛС значение порога первичного обнаружения, выставленного исходя из общепринятого требования обеспечения одной ложной тревоги в зоне действия РЛС за один цикл обзора, соответствует условной вероятности ложной тревоги в элементе разрешения РЛС $5 \cdot 10^{-7}$. Критерием допустимости снижения порога первичного обнаружения является наличие в среднем одной ложной траектории в зоне обзора РЛС за один цикл обзора. В таблице 1 представлены результаты расчета показателей эффективности, полученные на основании выражений (5)–(11).

Таблица 1. Результаты расчета показателей эффективности РЛС

F	$\bar{N}_{ЛОmm}$	Критерий обнаружения и сопровождения траекторий	$F_{ЛПp}$	$N_{Трmax}$	Прирост в дальности обнаружения, %
$8,0 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^4$	«2/2+2/3–3»	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^4$	32
$4,0 \cdot 10^{-2}$	$8,1 \cdot 10^4$	«2/2+4/5–3»	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^5$	47
$1 \cdot 10^{-1}$	$2,1 \cdot 10^5$	«2/2+8/10–3»	$3 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^6$	60
$1,8 \cdot 10^{-1}$	$3,9 \cdot 10^5$	«2/2+12/15–3»	$5 \cdot 10^{-8}$	$7,9 \cdot 10^6$	70

Как видно из таблицы 1, даже для критерия «2/2+2/3–3» условная вероятность ложной тревоги в элементе разрешения может быть повышена до значения $8 \cdot 10^{-3}$. За счет алгоритма обнаружения траекторий обеспечивается «фильтрация» ложных отметок и обнаружение порядка одной ложной траектории за один цикл обзора. Снижение порога первичного обнаружения увеличивает дальность обнаружения цели до 32 % (при условной вероятности правильного обнаружения 0,9). Максимальное количество траекторий, находящихся в обработке РЛС составляет 20 000. Используя более «жесткий» критерий «2/2+12/15–3» порог обнаружения может быть снижен эквивалентно увеличению условной вероятности ложной тревоги в элементе разрешения РЛС с $5 \cdot 10^{-7}$ до $1,8 \cdot 10^{-1}$. Такое снижение порога обнаружения позволяет добиться увеличения дальности первичного обнаружения цели РЛС до 70 % что эквивалентно выигрышу в отношении сигнал / шум порядка 9 дБ. При этом значительное количество ложных отметок и анализируемых циклов обзора требует существенного повышения производительности вычислительных средств РЛС для обеспечения возможности одновременной обработки $7,9 \cdot 10^6$ траекторий.

Корректность полученных выражений проверена методом математического моделирования с использованием имитационной модели функционирования РЛС, в которой реализован описанный алгоритм обнаружения и сопровождения траекторий. Ложные отметки, формируемые имитационной моделью распределены равномерно в пространстве наблюдения РЛС. Результаты функционирования имитационной модели в виде графиков зависимости среднего количества ложных траекторий, находящихся в обработке РЛС от номера цикла обзора, а также экран индикатора «азимут-дальность» на примере реализации критерия «2/2+2/3–3» и условной вероятности ложной тревоги в элементе разрешения РЛС равной $8,0 \cdot 10^{-3}$ представлены на рисунках 2 и 3.

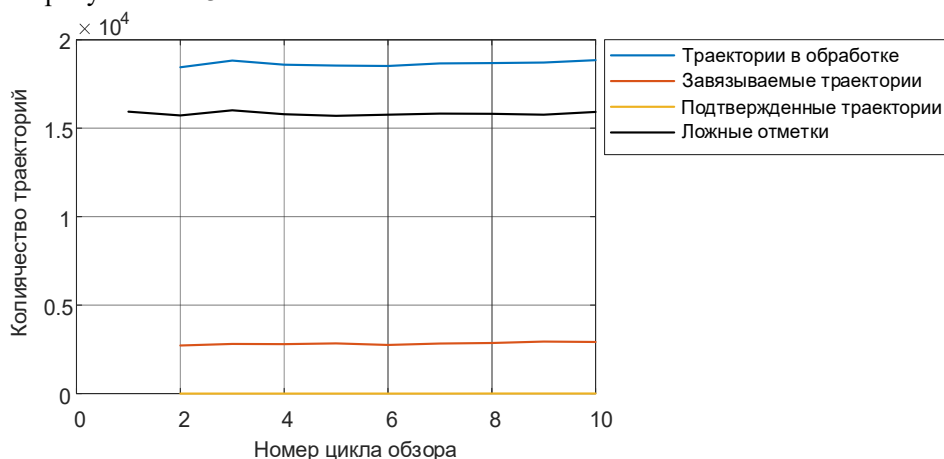


Рис. 2. Зависимости среднего количества ложных траекторий, находящихся в обработке РЛС, от номера цикла обзора

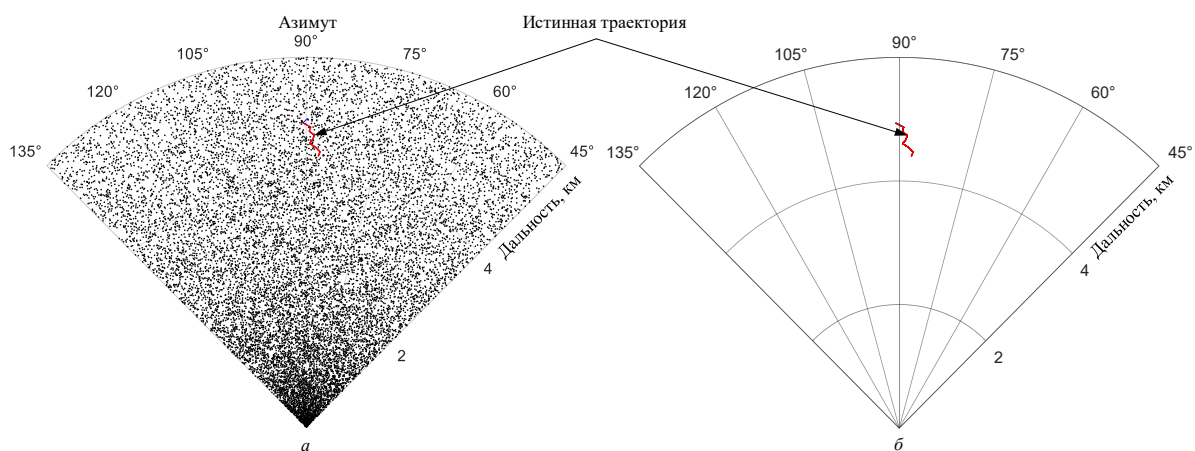


Рис. 3. Изображение индикатора «азимут-дальность» имитационной модели 2D РЛС секторного обзора: а – обнаруженные отметки; б – обнаруженные траектории

Кривые, изображенные на рисунке 2, подтверждают расчетные значения количества ложных отметок и траекторий на различных этапах функционирования алгоритма обнаружения и сопровождения траекторий, представленные в таблице 1. Алгоритм обнаружения и сопровождения траекторий обеспечивает обнаружение траектории истинной цели и фильтрацию ложных траекторий, что подтверждается изображением индикатора «азимут-дальность» имитационной модели 2D РЛС (рисунок 3, б).

Заключение

В докладе представлены результаты исследования метода «сопровождение-до-обнаружения», реализованного в специализированной РЛС обнаружения БПЛА. Применение метода позволяет повысить дальность обнаружения БПЛА, при сохранении приемлемого количества ложных срабатываний РЛС, за счет совместного выбора порога первичного обнаружения и параметров алгоритма обнаружения траекторий.

Получены аналитические зависимости среднего количества траекторий, находящихся в обработке ЭВМ РЛС, и условной вероятности обнаружения ложной траектории от порога первичного обнаружения и параметров алгоритма обнаружения и сопровождения траекторий, по методу серийных испытаний. Аналитические зависимости позволяют определить рациональные значения параметров первичной и вторичной обработки исходя из располагаемых вычислительных возможностей РЛС и требуемых (допустимых) значений показателей эффективности. На примере типовой двухкоординатной РЛС обнаружения БПЛА продемонстрирована возможность увеличения дальности обнаружения до 70 %, эквивалентного приросту порогового отношения сигнал / шум на 9 дБ.

Список использованных источников

1. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Советское радио, 1974. – 432 с.
2. Справочник по радиолокации / Под ред. М. И. Сколника. Пер. с англ. под общей ред. В. С. Вербы. В 2 книгах. Книга 1. М.: Техносфера, 2014. 672 с.
3. Костромицкий С.М., Нефёдов Д.С. Радиолокационные характеристики микро-БПЛА // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2023. № 3. С. 12–23.
4. Костромицкий С.М., Нефёдов Д.С. Оценка энергетического выигрыша при обнаружении малоразмерных целей методом «сопровождение до обнаружения» // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2022. № 3. С. 67–78.
5. Nathanson F.E., Reilly J.P., Cohen M.N. Radar design principles. Signal processing and the environment / New Jersey: SciTech Publishing, 1990. 720 p.
6. Костромицкий С.М., Нефёдов Д.С. Совместный выбор параметров первичной и вторичной обработки сигналов и информации в интересах повышения дальности обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов специализированными радиолокационными станциями / Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXXII Международной научно-технической конференции (г. Воронеж, 21–23 апреля 2026 г.): в 5 т. / Воронежский государственный университет; АО «Концерн «Созвездие». – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2026. – С. 60–70.
7. Охрименко А. Е. Основы радиолокации и РЭБ. М.: Воениздат, 1983. – 456 с.
8. Костромицкий С.М., Артемьев В.М., Нефёдов Д.С. Повышение эквивалентного энергopotенциала обзорных радиолокационных станций методом «обнаружения в результате сопровождения» // Докл. Нац. акад. Наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 4. – С. 404–411.