

Радиолокация и радионавигация

УДК 621.391

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-5-61-70>

Обнаружение траекторий движущихся прямолинейно воздушных целей при вторичной обработке радиолокационной информации

Г. С. Нахмансон, Д. С. Акиншин✉

Военно-воздушная академия
им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж, Россия✉ ads199011@icloud.com

Аннотация

Введение. Основными задачами вторичной обработки радиолокационной информации являются обнаружение и сопровождение траекторий движения воздушных целей (ВЦ). При этом процесс обнаружения траекторий движения ВЦ принято характеризовать вероятностями их обнаружения и средним временем их автозахвата. При движении цели ее дальность от радиолокационной станции (РЛС) изменяется, что приводит к изменению отношения сигнал/шум и вероятности обнаружения ВЦ.

Цель работы. Оценка влияния изменения вероятности обнаружения прямолинейно движущейся цели при радиолокационных наблюдениях на характеристики обнаружения траектории ее движения при вторичной обработке радиолокационной информации.

Методы. Используются методы математической статистики: проверка статистических гипотез, оценка параметров распределений и теория возмущений по малому параметру. В качестве возмущающего параметра выбрано отношение расстояния, проходимого ВЦ за период обзора, к дальности цели в начальный момент ее обнаружения.

Результаты. Получены аналитические выражения для вероятности обнаружения прямолинейно движущейся ВЦ и вероятности обнаружения траектории ее движения на интервалах, кратных периоду обзора. Проиллюстрировано уменьшение вероятности обнаружения ВЦ, удаляющейся от РЛС, при последовательных радиолокационных наблюдениях с уменьшением отношений сигнал/шум и угла между вектором скорости и радиусом-вектором ВЦ относительно РЛС. Увеличение скорости ВЦ, вызывающее изменение параметра z с 0.01 до 0.07, приводит к уменьшению вероятности обнаружения ВЦ с 0.727 до 0.52 и к соответствующему изменению вероятности обнаружения траектории. При сокращении времени наблюдения на один временной интервал уменьшение вероятности обнаружения траектории составляет от 0.03 до 0.04...0.07 для отношения сигнал/шум 40 и от 0.06 до 0.08...0.11 для отношения сигнал/шум 25 (при вероятности ложной тревоги 10^{-4}).

Заключение. Полученные выражения позволяют рассчитывать характеристики обнаружения траекторий воздушных целей, движущихся прямолинейно, с учетом изменений вероятностей обнаружения целей в последовательных временных интервалах обзора радиолокационных наблюдений.

Ключевые слова: автозахват траектории, среднее время обнаружения, дисперсия, характеристики обнаружения

Для цитирования: Нахмансон Г. С., Акиншин Д. С. Обнаружение траекторий движущихся прямолинейно воздушных целей при вторичной обработке радиолокационной информации // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 5. С. 61–70. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-61-70

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 05.07.2019; статья принята к публикации после рецензирования 15.09.2019; опубликована онлайн 29.11.2019

© Нахмансон Г. С., Акиншин Д. С., 2019



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License

Detection of the Trajectories of Moving Rectilinearly Air Targets in the Secondary Processing of Radar Information

G. S. Nakhmanson, D. S. Akinshin✉

N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia

✉ ads199011@icloud.com

Abstract

Introduction. The primary functions of secondary processing of radar information are to detect and maintain the trajectories of air targets (AT). The AT trajectory detection can be characterised by the probability of detecting trajectory and average autocapture time. When the target moves, its distance from the radar station changes, leading to a change in the signal/noise ratio and the probability of detecting AT.

Aim. To assess the impact of a change in the probability of detection of a straight and evenly moving target at consecutive time intervals of radar observation upon the characteristics of trajectory detection during secondary processing of radar information.

Methods and materials. The research aim was achieved using the methods of mathematical statistics, including verification of statistical hypotheses, assessment of distribution parameters and theory of perturbations by small parameters. The ratio of the distance travelled by the AT during the review period to the target range at the initial moment of its detection was chosen as a perturbation parameter.

Results. Analytical expressions were established for the probability of detecting a straight-moving AT and the probability of detecting the trajectory of its movement at interval multiples during the study period. The study illustrated the probability of detecting AT moving away from radar by means of consistent radar observations with reduced signal/noise ratios and angles between the velocity vector and the AT vector radius relative to the radar. The increase in AT speed which causes the z parameter to change from 0.01 to 0.07 reduces the probability of AT detection from 0.727 to 0.52 and leads to a corresponding change in the probability of detecting the trajectory. If the observation time is reduced by one time interval, the probability of detecting the trajectory is from 0.03 to 0.04...0.07 for signal/noise 40 ratio and from 0.06 to 0.08...0.11 for signal/noise 25 ratio (with the probability of false alarm 10^{-4}).

Conclusion. The resulting expressions allow for the calculation of directly moving AT trajectory detection, considering changes in the probability of detecting targets in successive time intervals of radar observations.

Key words: auto-trajectory, the average time of detection, dispersion, detection characteristics

For citation: Nakhmanson G. S., Akinshin D. S. Detection of the Trajectories of Moving Rectilinearly Air Targets in the Secondary Processing of Radar Information. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 5, pp. 61–70. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-5-61-70

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 05.07.2019; accepted 15.09.2019; published online 29.11.2019

Введение. Одной из основных задач, решаемых радиолокационной станцией (РЛС), является сопровождение движущихся воздушных целей (ВЦ). Эта задача решается в результате первичной и вторичной обработки радиолокационной информации (РЛИ). Под первичной обработкой понимается обнаружение цели в определенный момент времени. Вторичная обработка состоит в обнаружении траектории (последовательном об-

наружении ВЦ за несколько установленных заранее интервалов обзора) и в ее сопровождении.

Эффективность решения задач вторичной обработки принято оценивать по вероятности обнаружения траектории движения ВЦ и среднему времени ее обнаружения [1–9]. Указанные характеристики существенным образом зависят от вероятностей обнаружения ВЦ в каждой из точек наблюдения, которые обычно при вторичной обработке РЛИ при-

нято считать одинаковыми [3, 4, 9–12]. Однако при движении дальность ВЦ относительно РЛС может существенно меняться, что вызывает изменение отношений сигнал/шум для отраженных от цели принимаемых сигналов и, соответственно, вероятности обнаружения ВЦ. Дополнительную информацию об обнаружении траектории ВЦ, помимо среднего времени захвата, дает изменение вероятности ее обнаружения на заранее заданных интервалах времени [13, 14]. Поэтому исследование влияния изменения вероятности обнаружения ВЦ в точках ее последовательного радиолокационного наблюдения на характеристики обнаружения траекторий движения ВЦ при вторичной обработке РЛИ представляет практический интерес.

Целью настоящей статьи является оценка влияния изменения вероятности обнаружения прямолинейно движущейся цели при радиолокационных наблюдениях на характеристики обнаружения траектории ее движения при вторичной обработке РЛИ.

Методы обнаружения целей. Будем считать, что ВЦ движется со скоростью v по прямолинейной траектории, составляющей с радиусом-вектором R_0 нахождения ВЦ в начальный момент ее обнаружения угол θ (рис. 1). Дальности цели через интервалы времени T_0 , равные периоду обзора РЛС, определяются как R_1, R_2, \dots, R_k .

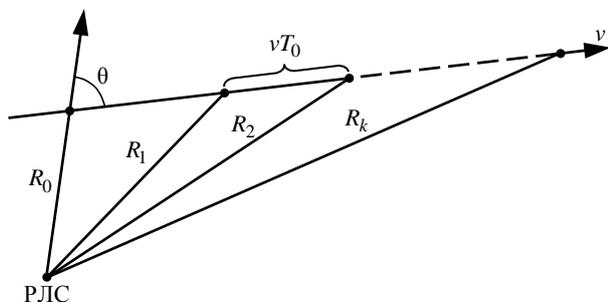


Рис. 1. К расчету дальности цели в точках наблюдения
Fig. 1. To the calculate of the ranges of the targets in the observation points

В этом случае расстояния между точками местоположения ВЦ на траектории движения в моменты наблюдения составляют vT_0 . В этом случае дальность ВЦ через k интервалов обзора составляет:

$$R_k = \sqrt{R_0^2 + (kvT_0)^2 + 2kvT_0R_0 \cos \theta} = R_0 \sqrt{1 + \left(\frac{kvT_0}{R_0}\right)^2 + 2\frac{kvT_0}{R_0} \cos \theta}. \quad (1)$$

Мощность сигнала, отраженного от цели и принимаемого РЛС, имеет вид [1, 2]

$$P_c = a^2 = \frac{P_{\Pi} G \sigma_{\Pi} A_{\text{пр}}}{(4\pi)^2 R^4},$$

где a – эффективное значение амплитуды; P_{Π} – мощность передатчика; G – коэффициент усиления антенны; σ_{Π} – эффективная поверхность отражения; $A_{\text{пр}}$ – эффективная поверхность антенны; R – дальность до цели от РЛС.

Мощность сигнала, принимаемая при начальном наблюдении:

$$P_{c0} = a_0^2 = \frac{P_{\Pi} G \sigma_{\Pi} A_{\text{пр}}}{(4\pi)^2 R_0^4}.$$

Соотношение мощностей принятого сигнала на начальном и текущем наблюдениях имеет вид

$$P_c / P_{c0} = a^2 / a_0^2 = (R_0 / R)^4,$$

откуда $a^2 = a_0^2 (R_0 / R)^4$.

Тогда отношение сигнал/шум для сигнала, отраженного от ВЦ, находящейся на k -м временном интервале обзора, и принимаемого приемником РЛС:

$$Q_k = \frac{2a^2 E_1}{N_0} = \frac{2a_0^2 E_1}{N_0} \left(\frac{R_0}{R_k}\right)^4 = Q_0 \left(\frac{R_0}{R_k}\right)^4, \quad (2)$$

где

$$E_1 = \frac{1}{2} \int_0^T U^2(t) dt$$

– энергия сигнала при единичной амплитуде; N_0 – двухсторонняя спектральная плотность шума; Q_0 – отношение сигнал/шум на выходе приемника РЛС при приеме сигнала, отраженного от ВЦ, в момент радиолокационного наблюдения на дальности R_0 от РЛС.

Если принимаемый сигнал имеет случайные начальную фазу и амплитуду, причем начальная фаза распределена равномерно на интервале $(-\pi, \pi)$, а амплитуда подчиняется релеевскому распределению:

$$\omega(a) = (a/\sigma_a^2) e^{-[a^2/(2\sigma_a^2)]}, \quad a \geq 0,$$

где σ_a^2 – дисперсия флуктуаций амплитуды сигнала, отраженного от цели, то отношение сигнал/шум принимает вид $Q_0 = 2\sigma_a^2 E_1 / N_0$.

С учетом указанных распределений параметров принимаемого сигнала подставим (1) в (2) и разложим полученное выражение в ряд по малой величине $z = vT_0/R_0$ – отношению расстояния, проходимого ВЦ за время одного периода обзора T_0 , к дальности цели в начальный момент ее обнаружения. Тогда отношение сигнал/шум для сигнала, отраженного от ВЦ, находящейся в точке k траектории, и принимаемого приемником РЛС, имеет вид

$$Q_k = Q_0 (R_0/R_k)^4 = Q_0 \left[1 - 4k(vT_0/R_0) \cos \theta + 2(6 \cos^2 \theta - 1)k^2 (vT_0/R_0)^2 \right]^2. \quad (3)$$

Вероятности правильного обнаружения ВЦ при последовательных временных интервалах радиолокационных наблюдений определяются соотношением [9], [10]

$$D_k = F^{(1+Q_k)^{-1}}, \quad (4)$$

где F – вероятность ложной тревоги.

Подставив (3) в (4) и разложив последнее выражение в ряд по z , получим выражение для вероятности правильного обнаружения ВЦ в точке k траектории:

$$D_k = D_0 + A_1 k z + A_2 (kz)^{-2}, \quad (5)$$

где

$$A_1 = D_0 \frac{4Q_0 \ln F \cos \theta}{(1+Q_0)^2};$$

$$A_2 = D_0 \left[\frac{8(\ln F Q_0 \cos \theta)^2}{(1+Q_0)^4} + \right.$$

$$\left. + \frac{\ln F (4Q_0 \cos \theta)^2}{(1+Q_0)^3} + \frac{2Q_0 \ln F (1-6 \cos^2 \theta)}{(1+Q_0)^2} \right].$$

На рис. 2 приведены результаты расчетов вероятности правильного обнаружения (D_k) ВЦ, движущейся по прямолинейной траектории, как функции от номера интервала наблюдения, кратного периоду обзора РЛС (T_0), для отношения сигнал/шум на выходе приемника РЛС, при приеме сигнала, отраженного от цели, находящейся в момент радиолокационного наблюдения на дальности R_0 от РЛС $Q_0 = 30$, отношении расстояния, проходимого ВЦ за время одного обзора РЛС, к ее дальности в начальный момент наблюдения $z = 0.01$ и 0.07 , вероятности ложной тревоги F при различных значениях угла θ между траекторией движения ВЦ и ее радиусом-вектором в начальной точке наблюдения.

Из хода кривых на рис. 2 и соотношения (1) следует, что вероятности правильного обнаружения уменьшаются с увеличением номера интервала наблюдения ВЦ относительно начального момента ее обнаружения, а также при уменьшении угла θ между направлением движения ВЦ и радиусом-вектором ее местонахождения в начальный момент наблюдения ($k = 0$). Действительно, уменьшение угла приводит к увеличению дальности ВЦ относительно РЛС за интервал обзора.

Сравнение кривых на рис. 2, *a* и *в* показывает, что на уменьшение вероятности обнаружения влияет также увеличение скорости движения ВЦ, вызывающее увеличение расстояния, проходимого ею за временной интервал обзора T_0 , и, соответственно, ее дальности от РЛС, и уменьшение отношения сигнал/шум для принимаемого сигнала, отраженного от ВЦ. Так, для $\theta = 25^\circ$ при $F = 10^{-4}$ и $Q_0 = 30$ увеличение скорости ВЦ, вызывающее изменение параметра z с 0.01 до 0.07 ,

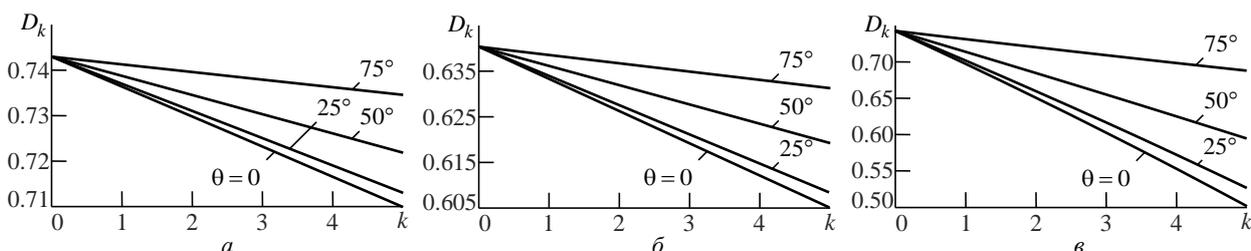


Рис. 2. Зависимости вероятности правильного обнаружения от номера интервала обзора РЛС

Fig. 2. Dependencies of the probability of correct detection on the number of radar coverage interval:

a – $z = 0.01$; $F = 10^{-4}$; *б* – $z = 0.01$; $F = 10^{-6}$; *в* – $z = 0.07$; $F = 10^{-4}$

приводит к уменьшению D_3 с 0.727 до 0.52. К уменьшению D_k приводит также снижение вероятности ложной тревоги, вызываемое увеличением уровня порога решающего устройства приемника обнаружения сигнала. Как следует из кривых для $\theta = 25^\circ$ на рис. 2, a и b , изменение F от 10^{-4} до 10^{-6} при прочих равных условиях вызывает уменьшение вероятности D_3 с 0.725 до 0.621.

Характеристики обнаружения траектории движения цели. Обнаружение траектории осуществляется в два этапа. На первом этапе при последовательном обнаружении цели на первых двух периодах радиолокационного обзора (интервалах наблюдения), сопровождаемых формированием меток в системе вторичной обработки РЛИ, происходит завязка траектории (определение предполагаемой траектории цели по двум точкам) с вероятностью $P = P_0 P_1$, где $P_0 = D_0$, $P_1 = D_1$ – вероятности обнаружения цели в начальный момент ее наблюдения и следующий за ним период обзора. Обнаружение траектории движения цели осуществляется после ее завязки при обнаружении цели (формировании метки) на одном из нескольких последующих интервалов радиолокационного наблюдения [10].

Учитывая, что вероятности правильного обнаружения ВЦ в различные периоды ее наблюдения не одинаковы, вероятность обнаружения траектории (появления метки в любом из k последующих интервалов обзора) определяется как

$$P_{от} = P_0 P_1 \sum_{k=2}^n P_k,$$

где

$$P_k = \begin{cases} D_2, & k = 2; \\ D_k \prod_{i=2}^{k-1} (1 - D_i), & k > 2 \end{cases} \quad (6)$$

– вероятность обнаружения ВЦ на k -м интервале ее наблюдения при автозахвате траектории. Тогда среднее время обнаружения траектории движения ВЦ (появление третьей метки):

$$T_{cp} = \frac{P_0 P_1 \sum_{k=2}^n T_0 (k+1) P_k}{P_0 P_1 \sum_{k=2}^n P_k} =$$

$$= \frac{\sum_{k=2}^n T_0 (k+1) P_k}{\sum_{k=2}^n P_k} = T_0 \left(1 + \frac{h_1}{h_0} \right),$$

где n – количество временных интервалов обзора РЛС, необходимых для обнаружения траекторий движения ВЦ при вторичной обработке РЛИ;

$$h_1 = \sum_{k=2}^n k P_k; \quad h_0 = \sum_{k=2}^n P_k.$$

Аналогично найдем второй момент оценки времени обнаружения траектории ВЦ:

$$T_2 = \frac{T_0^2 \sum_{k=2}^n (k+1)^2 P_k}{\sum_{k=2}^n P_k} = \frac{h_2 + 2h_1 + h_0}{h_0},$$

где $h_2 = \sum_{k=2}^n k^2 P_k$.

Тогда выражение для дисперсии оценки времени обнаружения траектории цели имеет вид

$$\sigma^2 = T_2 - T_{cp}^2 = T_0^2 \left(\frac{h_2}{h_0} - \frac{h_1^2}{h_0^2} \right).$$

На практике принято на этапе обнаружения траектории ВЦ использовать результаты обнаружения ВЦ после завязки траектории в четырех последовательных временных интервалах обзора P_2, P_3, P_4, P_5 ($n=5$) [10, 12].

Подставив (5) в (6), после математических преобразований получим:

$$h_0 = \sum_{k=2}^5 P_k = h_{00} + h_{01}z + h_{02}z^2;$$

$$h_1 = \sum_{k=2}^5 k P_k = h_{10} + h_{11}z + h_{12}z^2;$$

$$h_2 = \sum_{k=2}^5 k^2 P_k = h_{20} + h_{21}z + h_{22}z^2,$$

где

$$h_{00} = 1 + q + q^2 + q^3; \quad h_{01} = A_1 q (5q^2 - 5q - 2);$$

$$h_{02} = A_2 q (25q^2 - 13q - 4) + A_1^2 (6 - 45q);$$

$$\begin{aligned} h_{10} &= 2 + 3q + 4q^2 + 5q^3; \\ h_{11} &= A_1(25q^3 - 29q^2 - 11q - 2); \\ h_{12} &= A_2q(125q^3 - 81q^2 - 25q - 4) + \\ &\quad + A_1^2(6 + 50q - 225q^2); \\ h_{20} &= 4 + 9q + 16q^2 + 25q^3; \\ h_{21} &= A_1(125q^3 - 161q^2 - 53q - 10); \\ h_{22} &= A_2q(625q^3 - 469q^2 - 127q - 20) + \\ &\quad + A_1^2(42 + 330q - 1125q^2), \end{aligned}$$

причем $q = 1 - D_0$.

Тогда

$$\begin{aligned} T_{\text{ср}} &= \frac{T_0}{h_0} [h_{00} + h_{10} + (h_{01} + h_{11})z + (h_{02} + h_{12})z^2]; \\ \sigma^2 &= \frac{T_0^2}{h_0^2} [h_{00}h_{20} - h_{10}^2 + \\ &\quad + (h_{00}h_{21} + h_{01}h_{20} - 2h_{10}h_{11})z + \\ &\quad + (h_{00}h_{22} + h_{01}h_{21} + h_{02}h_{20} - 2h_{10}h_{12} - h_{11}^2)z^2]. \end{aligned}$$

Обсуждение результатов. На рис. 3 представлены зависимости среднего времени обнаружения траектории цели, нормированного на T_0 , от отношения z при вероятности ложной тревоги (F) 10^{-4} и 10^{-6} .

Из кривых на рис. 3 видно, что среднее время обнаружения траектории ВЦ ($T_{\text{ср}}$) увеличивается при увеличении параметра z (при увеличении скорости ВЦ и, соответственно, ее удалении от РЛС за один временной интервал наблюдения). При этом наиболее существенным фактором, влияющим на $T_{\text{ср}}$, является отношение сиг-

нал/шум для принимаемого сигнала в начальный момент наблюдения Q_0 . Так, уменьшение Q_0 с 40 до 25 при вероятности ложной тревоги $F = 10^{-4}$ и увеличении параметра z от 0 до 0.07 приводит к увеличению среднего времени обнаружения траектории ВЦ от 0.15 до 0.17...0.22, а при $F = 10^{-6}$ – от 0.21 до 0.19...0.29. С уменьшением вероятности ложной тревоги до $F = 10^{-6}$ (рис. 3, б) эта величина возрастает при $Q_0 = 40$ от 0.13 до 0.15...0.2, а при $Q_0 = 25$ – от 0.19 до 0.17...0.27. Причем возрастание $T_{\text{ср}}$ при увеличении z растет с уменьшением угла θ между направлением движения ВЦ и ее радиусом-вектором в момент начального наблюдения. Последнее объясняется увеличением дальности ВЦ за временной интервал обзора, что приводит к уменьшению мощности отраженного от ВЦ сигнала, отношения сигнал/шум и уменьшению вероятности обнаружения ВЦ.

На рис. 4 представлены зависимости средне-квадратического отклонения (σ) относительно среднего времени обнаружения σ траектории цели, нормированного на T_0 , от отношения z при значениях вероятности ложной тревоги 10^{-4} и 10^{-6} .

Из рисунка следует, что СКО возрастает при увеличении параметра z . Оно также зависит от отношения сигнал/шум для принимаемого сигнала в начальный момент наблюдения Q_0 и вероятности ложной тревоги. Уменьшение Q_0 с 40 до 25 при вероятности ложной тревоги $F = 10^{-4}$ при увеличении параметра z (т. е. при возрастании скорости ВЦ) от 0 до 0.07 приводит к увеличению СКО от 0.14 до 0.15...0.18, а при $F = 10^{-6}$ – от

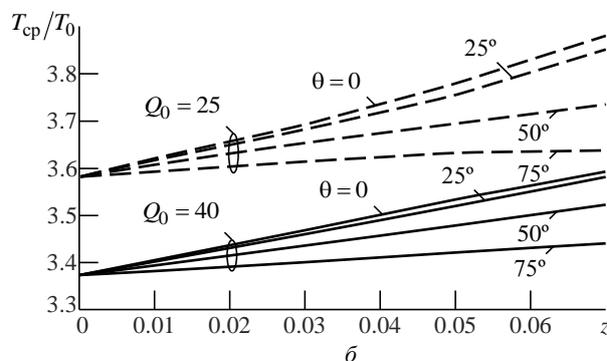
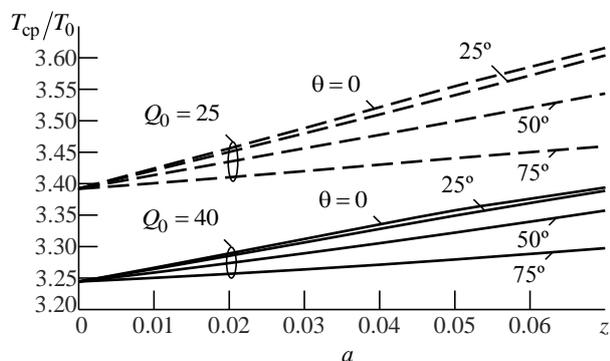


Рис. 3. Среднее время обнаружения траектории воздушной цели

Fig. 3. Average time of detection of the trajectory of an air target:

$a - F = 10^{-4}$; $b - F = 10^{-6}$

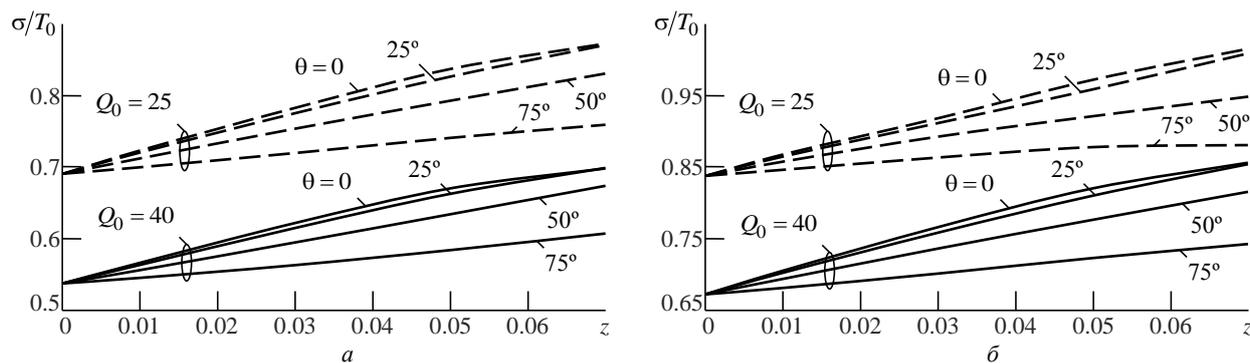


Рис. 4. Среднеквадратическое отклонение времени обнаружения траектории относительно ее среднего значения

Fig. 4. Root mean square deviation of trajectory detection time relative to its average value:

$$a - F = 10^{-4}; \quad b - F = 10^{-6}$$

0.14 до 0.15...0.16. Причем изменение СКО σ с ростом z увеличивается с уменьшением угла θ между направлением движения ВЦ и ее радиусом-вектором в момент начального наблюдения, поскольку уменьшение угла приводит к увеличению приращения дальности ВЦ за временной интервал обзора и, соответственно, к уменьшению мощности отраженного от ВЦ сигнала, отношения сигнал/шум и уменьшению вероятности обнаружения ВЦ.

Моменты оценки времени обнаружения траектории движения ВЦ (среднее время обнаружения (T_{cp}) и СКО (σ)) являются интегральными характеристиками, при нахождении которых используется усреднение с учетом вероятностей обнаружения ВЦ на отводимых для обнаружения траектории движения временных интервалах обзора. Наряду с упомянутыми моментами дополнительную информацию дают изменения вероятности обнаружения траектории движения ВЦ на конкретных временных интервалах радиолокационного наблюдения (формирования третьей метки) по отношению к вероятности ее обнаружения на всех отводимых для этого временных интервалах. Эти изменения характеризуются параметрами

$$P_{23} = \frac{P_2 + P_3}{\sum_{k=2}^5 P_k}; \quad P_{24} = \frac{P_2 + P_3 + P_4}{\sum_{k=2}^5 P_k},$$

отражающими изменения вероятности при последовательных обнаружениях траектории ВЦ на втором и третьем и на втором и четвертом временных интервалах обзора соответственно.

На рис. 5 представлены зависимости изменения отношений P_{23} , P_{24} от отношения $z = vT_0/R_0$ при значениях вероятности ложной тревоги 10^{-4} и 10^{-6} .

Как следует из хода кривых, зависимости изменения вероятностей обнаружения траектории движения целей, удаляющихся по прямолинейной траектории ВЦ от РЛС, уменьшаются при увеличении параметра z (увеличении скорости ВЦ и, соответственно, ее удаления от местоположения РЛС за один интервал наблюдения, приводящих к уменьшению вероятности обнаружения ВЦ). При этом существенное влияние на значение вероятности обнаружения траектории ВЦ оказывает временной интервал ее наблюдения. Действительно, увеличение P_{24} по сравнению с P_{23} при вероятности ложной тревоги $F = 10^{-4}$, отношении сигнал/шум при начальном радиолокационном наблюдении $Q_0 = 40$ и увеличении параметра z от 0 до 0.07 составляет от 0.03 до 0.04...0.07, а при $Q_0 = 25$ – 0.06 до 0.08...0.11. С уменьшением вероятности ложной тревоги до $F = 10^{-6}$ это изменение при $Q_0 = 40$ составляет от 0.06 до 0.07...0.11, а при $Q_0 = 25$ – от 0.1 до 0.11...0.17. Причем возрастание изменения вероятности обнаружения траектории движения ВЦ на отводимых временных интервалах обзора при увеличении z растет с уменьшением угла между направлением движения ВЦ и ее радиусом-вектором в момент начального наблюдения, что связано с увеличением дальности ВЦ за временной интервал обзора и, соответственно, с уменьшением мощности отраженного от ВЦ сигнала, отношения сигнал/шум и уменьшением вероятности обнаружения ВЦ.

Отметим, что при малых интервалах наблюдения на вероятность обнаружения траектории движения ВЦ на отводимых временных интервалах обзора существенно влияет отношение сигнал/шум в начальный момент наблюдения, зависящее от даль-

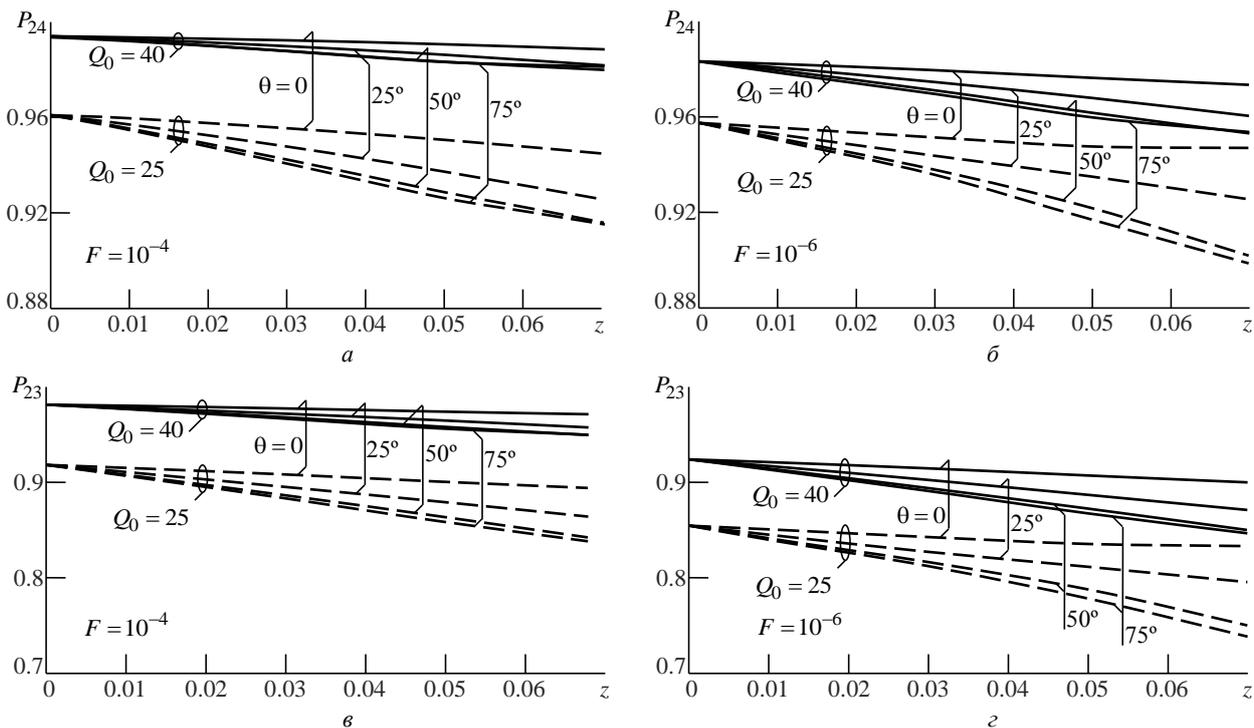


Рис. 5. Изменение вероятности обнаружения траектории воздушной цели на двух временных интервалах при формировании третьей метки

Fig. 5. The change in the probability of detecting the trajectory of an air target at two time intervals during the formation of the third mark:

$$a - P_{24}, F = 10^{-4}; \quad б - P_{24}, F = 10^{-6}; \quad в - P_{23}, F = 10^{-4}; \quad г - P_{23}, F = 10^{-6}$$

ности цели и вероятности ложной тревоги. Как следует из рис. 5, изменение вероятности P_{23} , соответствующее второму и третьему интервалам наблюдения, при $F = 10^{-4}$ и изменении Q_0 от 25 до 40 увеличивается в среднем на 0.04, а P_{24} изменяется не более чем на 0.01...0.03.

Заключение. Получены аналитические соотношения для вероятностей обнаружения движущейся прямолинейно ВЦ при ее последовательных наблюдениях и вероятности обнаружения траектории движения ВЦ на отводимых временных

интервалах обзора при вторичной обработке РЛИ. Выявлено уменьшение указанных вероятностей при изменении отношения расстояния, прошедшего целью за интервал обзора, к дальности цели в начальный момент ее наблюдения, отношения сигнал/шум в начальный момент наблюдения и временного интервала наблюдения. Показана целесообразность учета изменения вероятностей обнаружения прямолинейно движущихся целей при их последовательных радиолокационных наблюдениях и обнаружении их траекторий движений.

Список литературы

1. Радиолокационные системы: основы построения и теория / под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 806 с.
2. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / под ред. В. Н. Борисова. М.: Радио и связь, 2003. 640 с.
3. Киселев В. Ю., Монаков А. А. Оценка качества алгоритмов траекторной обработки в радиолокационных системах управления воздушным движением: обнаружение треков // Радиотехника. 2016. № 3. С. 28–36.
4. Wieneke M., Koch W. The PMHT: Solution for some of its problems // Proc. of SPIE. 2007. Vol. 6699. P. 1–12. doi: 10.1117/12.734388
5. Bar-Shalom Y., Blair W. D. Multitarget-Multisensor Tracking. Applications and Advances. Vol. 3. London: Artech House, 2000. 608 p.
6. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Pt. II: Ballistic Target Models // Proc. of SPIE Conf. on Signal and Data Processing of Small Targets. San Diego (USA), July-Aug. 2001. 23 p.
7. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Pt. III: Measurement Models // Proc. of SPIE

Conf. on Signal and Data Processing of Small Targets. San Diego (USA), July-Aug. 2001. 24 p.

8. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Pt. IV: Decision-Based Methods // Proc. of SPIE Conf. on Signal and Data Processing of Small Targets. Orlando (USA), Apr. 2002. 24 p.

9. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Pt. V: Multiple-Model Methods // IEEE Trans. on aerospace and electric systems. 2005. Vol. 41, № 4. P. 1255–1321.

10. Willett P., Ruan Y., Steit R. The PMHT: Its problems and some solutions // IEEE Trans. on aerospace and electric systems. 2002. Vol. 38, № 3. P. 738–754. doi: 10.1109/TAES.2002.1039396

11. Кузьмин С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев: КВЦ, 2000. 428 с.

12. Васильев К. К., Маттис А. В. Нелинейная траекторная фильтрация в связанных координатах // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXIV Междунар. науч.-техн. конф., Воронеж, 17–19 апр. 2018. Т. 3. С. 1–8.

13. Нахмансон Г. С., Комягин Б. П. Эффективность обнаружения траекторий движения воздушных целей при вторичной обработке радиолокационной информации // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 4. С. 52–55.

14. Нахмансон Г. С. Пространственная обработка широкополосных сигналов. М.: Радиотехника, 2015. 256 с.

Информация об авторах

Нахмансон Геннадий Симонович – доктор технических наук (1993), заслуженный работник высшей школы РФ (2000), профессор (1992) военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина" (г. Воронеж). Автор более 300 научных трудов. Сфера научных интересов – обработка широкополосных сигналов в радиотехнических системах в условиях внутренних шумов и внешних помех; оптическая обработка сигналов в реальном масштабе времени.

Адрес: Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, ул. Старых Большевиков, д. 54 А, Воронеж, 394064, Россия

E-mail: kig28@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7450-1890>

Акиншин Дмитрий Сергеевич – инженер по специальности "Специальные радиотехнические системы" (2012), Военный авиационный инженерный университет (г. Воронеж). Адъюнкт военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина" (г. Воронеж). Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – обнаружение траекторий движения воздушных объектов при вторичной обработке радиолокационной информации.

Адрес: Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, ул. Старых Большевиков, д. 54 А, Воронеж, 394064, Россия

E-mail: ads199011@icloud.com

<https://orcid.org/0000-0003-3489-8579>

References

1. *Radiolokatsionnye sistemy: osnovy postroeniya i teoriiya* [Radar Systems: Fundamentals of Construction and Theory], ed. by Ya. D. Shirman. Moscow, *Radiotekhnika*, 2007, 806 p. (In Russ.)

2. *Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra signalov modulyatsiei nesushchei psevdosluchainoi posledovatel'nost'yu* [Interference Immunity of Radio Communication Systems with Expansion of the Spectrum of Signals by Modulation of the Carrier by a Pseudo-Random Sequence], ed. by V. N. Borisov. Moscow, *Radio i svyaz'*, 2003, 640 p. (In Russ.)

3. Kiselev V. Yu., Monakov A. A. Assessment of Trajectory Processing Algorithms in Air Traffic Control Radar Systems: Track Detection. *Radioengineering*. 2016, no. 3, pp. 28–36. (In Russ.)

4. Wieneke M., Koch W. The PMHT: Solution for some of its problems. *Proc. of SPIE*. 2007, vol. 6699, pp. 1–12. doi: 10.1117/12.734388

5. Bar-Shalom Y., Blair W. D. *Multitarget-Multisensor Tracking. Applications and Advances*. London, Artech House, 2000, vol. 3, 608 p.

6. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Part II: Ballistic Target Models. *Proc. of SPIE Conf. on Signal and Data Processing of Small Targets*. San Diego (USA), July-August 2001, 23 p.

7. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Part III: Measurement Models. *Proc. of SPIE Conf. on Signal and Data Processing of Small Targets*. San Diego (USA), July-August 2001, 24 p.

8. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Part IV: Decision-Based Methods. *Proc. of SPIE Conf. on Signal and Data Processing of Small Targets*. Orlando (USA), April 2002, 24 p.

9. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Part V: Multiple-Model Methods. *IEEE Trans. on aerospace and electric systems*. 2005, vol. 41, no. 4, pp. 1255–1321.

10. Willett P., Ruan Y., Steit R. The PMHT: Its problems and some solutions. IEEE Trans. on aerospace and electric systems. 2002, vol. 38, no. 3, pp. 738–754. doi: 10.1109/TAES.2002.1039396

11. Kuz'min S. Z. *Tsifrovaya radiolokatsiya. Vvedenie v teoriyu* [Digital Radar. Introduction to Theory]. Kiev, KVITS, 2000, 428 p. (In Russ.)

12. Vasil'ev K. K., Mattis A. V. *Nelineinaya traektor'naya fil'tratsiya v svyazannykh koordinatakh* [Nonlinear Trajectory Filtering in Linked Coordinates]. Radar, Navigation,

Communication. Proc. XXIV Intern. Scientific and Technical Conf. Voronezh, 17–19 April 2018, vol. 3, pp. 1–8. (In Russ.)

13. Nakhmanson G. S., Komyagin B. P. Efficiency of Air Target Motion Path Detecting in Case of Radar Data Secondary Processing. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2017, no. 4, pp. 52–55. (In Russ.)

14. Nakhmanson G. S. *Prostranstvennaya obrabotka shirokopolosnykh signalov* [Spatial Processing of Broadband Signals]. Moscow, Radiotekhnika, 2015, 256 p. (In Russ.)

Information about the authors

Gennady S. Nakhmanson, Dr. Sci. (Eng.) (1993), Distinguished Worker of the Higher School of the Russian Federation (2000), Professor (1992) of the Military Educational and Scientific Center of the Air Force "N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh). The author of more than 300 scientific publications. Area of expertise: the processing of broadband signals in radio systems in conditions of internal noise and external interference; optical processing of signals in real time.

Address: N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy, 54 A Starykh Bolsheviks Str., Voronezh 394064, Russia

E-mail: kig28@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7450-1890>

Dmitry S. Akinshin, Dipl. engineer on "Special Radio Technical Systems" (2012, the Military Aviation Engineering University (Voronezh)). Postgraduate student of the Military Educational and Scientific Center of the Air Force "N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh). The author of three scientific publications. Area of expertise: the detection of trajectories of air objects in the secondary processing of radar information.

Address: N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy, 54 A Starykh Bolsheviks Str., Voronezh 394064, Russia

E-mail: ads199011@icloud.com

<https://orcid.org/0000-0003-3489-8579>
