



УДК 621.396.965

Г. С. Нахмансон, Б. П. Комягин
ВУНЦ ВВС "Военно-воздушная академия
им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина" (Воронеж)

Эффективность обнаружения траекторий движения воздушных целей при вторичной обработке радиолокационной информации

Рассматривается интервальная оценка временного интервала автозахвата траектории движения воздушных целей при вторичной обработке радиолокационной информации. Получены аналитические выражения для доверительных вероятностей, соответствующих заданным временным интервалам. Анализируются зависимости доверительных вероятностей от отношений "сигнал/шум" при приеме сигналов со случайными амплитудами и начальными фазами.

Автозахват траектории, среднее время автозахвата, дисперсия, доверительная вероятность

Одними из основных задач, решаемых на этапе вторичной (траекторной) обработки периодических радиолокационных наблюдений, являются обнаружение траекторий движения воздушных судов (ВС) и определение их параметров. Особенность вторичной обработки радиолокационных наблюдений в отличие от первичной обработки, при которой рассматривается только двухальтернативная ситуация: цель присутствует в элементе разрешения или отсутствует, состоит в том, что отметки, соответствующие движущимся целям в момент наблюдения в зоне контроля радиолокационной станции (РЛС) могут появляться и исчезать. Основными характеристиками процесса обнаружения траектории движения цели, под которой понимается отождествление результатов определения местоположения цели за несколько установленных заранее периодов обзора, являются вероятность обнаружения и среднее время захвата траектории [1], [2]. Однако среднее время автозахвата не дает исчерпывающей информации о времени ее обнаружения. Более полную информацию об обнаружении траектории дают доверительные вероятности автозахвата траектории на конкретных временных интервалах [3]–[5].

Целью настоящей статьи является получение аналитических выражений для доверительных вероятностей автозахвата траектории движения воздушной цели на задаваемых временных ин-

тервалах и анализ зависимостей этих вероятностей от характеристик принимаемых сигналов.

Обнаружение траектории движения цели осуществляется в два этапа. На первом этапе выносятся решение о завязке траектории при наличии двух отметок, характеризующих местоположение цели при радиолокационных измерениях ее координат в соседних периодах радиолокационного обзора. Критерием завязки траектории является наличие r меток в соседних периодах обзора. Если считать, что на всем временном интервале радиолокационного наблюдения вероятность появления метки в интервале радиолокационного обзора p имеет постоянное значение (что соответствует постоянному значению отношения "сигнал/шум"), то вероятность завязки траектории равна p^r .

На втором этапе обнаружения траектории решение о ее автозахвате выносится при регистрации метки в течение следующих после завязки траектории m периодов обзора. Тогда вероятность обнаружения траектории после ее завязки будет определяться при появлении метки в $(r+1)$ -м периоде обзора как $P_1^{(m)} = p^{r+1}$; при появлении метки во время $(r+2)$ -го периода обзора – как $P_2^{(m)} = p^{r+1}q$ ($q = 1 - p$ – вероятность отсутствия метки) и т. д. В общем случае при появлении тре-

твѣй метки во время $(r + m)$ -го периода обзора $P_m^{(m)} = p^{r+1} q^{m-1}$.

Тогда вероятность обнаружения траектории при появлении следующей метки в любом из m периодов обзора, следующих за завязкой, составляет

$$P^{(m)} = \sum_{k=1}^m P_k^{(m)} = \sum_{k=1}^m p^{r+1} q^{k-1} = p^{r+1} \frac{1-q^m}{1-q}. \quad (1)$$

В настоящее время наиболее широко используемым параметром, характеризующим автозахват траектории движения цели, является среднее время автозахвата [4], которое при радиолокационном наблюдении в течение m периодов обзора (после r периодов завязки траектории) определяется как

$$\begin{aligned} \langle T_{аз}^{(m)} \rangle &= \frac{T_0}{P^{(m)}} \sum_{k=1}^m (k+r) P_k^{(m)} = \\ &= T_0 r + \frac{T_0}{P^{(m)}} \sum_{k=1}^m k P_k^{(m)}, \end{aligned}$$

где T_0 – время радиолокационного наблюдения в течение одного обзора.

С учетом (1) выражение для $\langle T_{аз}^{(m)} \rangle$ принимает вид

$$\langle T_{аз}^{(m)} \rangle = T_0 \left(r + \frac{1}{1-q} - \frac{mq^m}{1-q^m} \right).$$

Более полную информацию о времени автозахвата траектории даст значение доверительного временного интервала, на котором осуществляется автозахват траектории с заданной вероятностью. Предполагая плотность распределения момента автозахвата нормальной, выражение для вероятности автозахвата на интервале от момента $T_\eta = \eta T_0$ до $T_\mu = \mu T_0$ ($r \leq \eta < \mu \leq r + m$), т. е. на интервале $(\mu - \eta) T_0$, можно представить следующим образом:

$$P_{\mu\eta}^{(m)} = \frac{k_{норм}}{\sigma^{(m)} \sqrt{2\pi}} \int_{\eta T_0}^{\mu T_0} e^{-\frac{(x - \langle T_{аз}^{(m)} \rangle)^2}{2[\sigma^{(m)}]^2}} dx, \quad (2)$$

где $k_{норм}$ – коэффициент нормировки;

$$\begin{aligned} \sigma^{(m)} &= \sqrt{\frac{T_0^2}{P^{(m)}} \sum_{k=1}^m (k+r)^2 P_k^{(m)} - \langle T_{аз}^{(m)} \rangle^2} = \\ &= T_0 \sqrt{\frac{q}{(1-q)^2} - \frac{m^2 q^m}{(1-q^m)^2}} \end{aligned}$$

– среднеквадратическое отклонение разброса моментов автозахвата траектории относительно

$\langle T_{аз}^{(m)} \rangle$; η и μ – границы интервала радиолокационного наблюдения.

Коэффициент нормировки определяется из условия

$$P_{mr}^{(m)} = \frac{k_{норм}}{\sigma^{(m)} \sqrt{2\pi}} \times \int_{rT_0}^{(r+m)T_0} e^{-\frac{(x - \langle T_{аз}^{(m)} \rangle)^2}{2[\sigma^{(m)}]^2}} dx = 1$$

и имеет вид

$$k_{норм} = \left[\frac{1}{\sigma^{(m)} \sqrt{2\pi}} \times \int_{rT_0}^{(r+m)T_0} e^{-\frac{(x - \langle T_{аз}^{(m)} \rangle)^2}{2[\sigma^{(m)}]^2}} dx \right]^{-1}.$$

С учетом приведенных выражений запишем (2) следующим образом:

$$P_{\mu\eta}^{(m)} = \frac{\operatorname{erf} \left[\frac{A_\mu^{(m)}}{\sigma^{(m)}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{A_\eta^{(m)}}{\sigma^{(m)}} \right]}{\operatorname{erf} \left[\frac{A_{m+r}^{(m)}}{\sigma^{(m)}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{A_r^{(m)}}{\sigma^{(m)}} \right]},$$

где $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ – интеграл ошибок [1];

$$A_k^{(m)} = \frac{k - r - \left[\frac{1}{1-q} \right] + mq^m / (1-q^m)}{\sqrt{2} \sqrt{q / (1-q)^2 - mq^m / (1-q^m)^2}}.$$

Полученные соотношения проиллюстрируем на примере обнаружения траектории движения воздушной цели при завязке траектории по двум меткам, наблюдаемым в соседних периодах обзора ($r = 2$), а обнаружение траектории (автозахват) осуществляется при появлении третьей метки в течение следующих трех ($m = 3$) или четырех ($m = 4$) последующих периодов. Кроме того, будем считать, что отраженные от цели сигналы имеют случайные амплитуды и начальные фазы, поэтому вероятность их обнаружения (получения метки) на отдельном периоде обзора РЛС определяется как [2]

$$P = F^1 / [1 + Q^2 / 2],$$

где F – вероятность ложной тревоги; $Q = 2E/N_0$ – отношение "сигнал/шум" ($E = \sigma_a^2 T$ – энергия принимаемого сигнала со случайными амплитудой и фазой; σ_a^2 и T – дисперсия и длительность при-

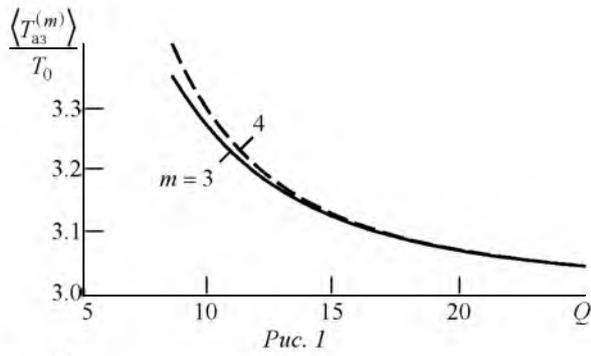


Рис. 1

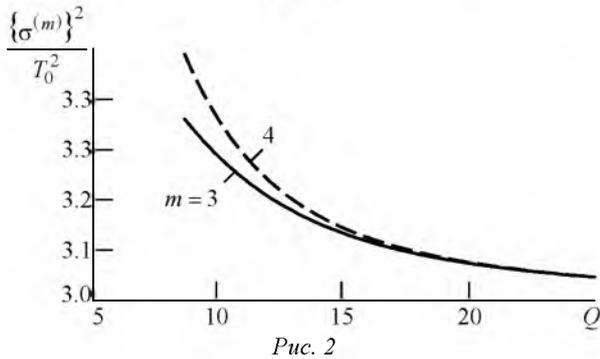


Рис. 2

нимаемого сигнала соответственно); N_0 – спектральная плотность внутренних шумов, на фоне которых осуществляется прием сигналов).

На рис. 1 и 2 приведены зависимости нормированных оценок среднего значения и дисперсии времени автозахвата траектории движения цели от отношения "сигнал/шум" Q при вероятности ложной тревоги $F = 10^{-8}$. Из зависимостей следует, что с увеличением отношения "сигнал/шум" принимаемых сигналов среднее значение времени автозахвата траектории $\langle T_{аз}^{(m)} \rangle$ стремится к $3T_0$, а дисперсии $\{\sigma^{(m)}\}^2$ – к 0.

При небольших отношениях "сигнал/шум" среднее значение и дисперсия оценки времени автозахвата возрастают с увеличением временного интервала (количества периодов обзора m), отводимого для обнаружения траектории.

На рис. 3 показаны зависимости вероятностей автозахвата траектории в течение двух ($\mu - \eta = 2$)

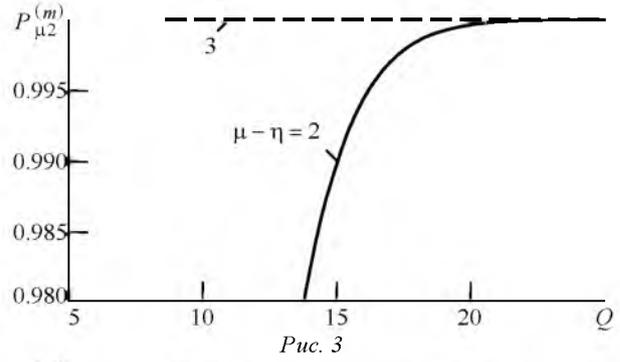


Рис. 3

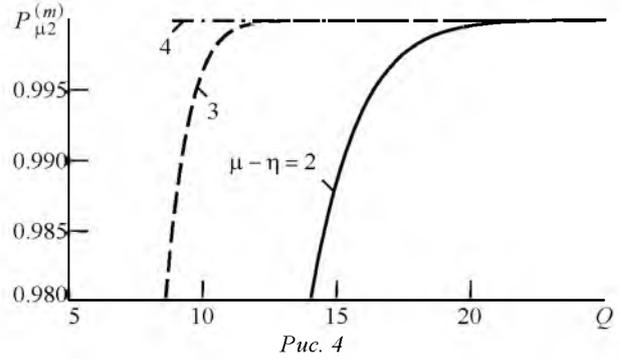


Рис. 4

и трех ($\mu - \eta = 3$) периодов радиолокационного наблюдения из общего количества периодов $m = 3$, а на рис. 4 – аналогичные зависимости для $m = 4$ при автозахвате в течение двух ($\mu - \eta = 2$), трех ($\mu - \eta = 3$) и четырех ($\mu - \eta = 4$) периодов от отношения "сигнал/шум". Как следует из хода кривых, вероятности автозахвата траекторий возрастают с увеличением Q . При этом возрастание увеличивается с уменьшением периодов обзора, отводимых для автозахвата траекторий движения цели m . Действительно, при уменьшении временного интервала, отводимого для автозахвата траектории движения цели, за счет нормировки увеличивается плотность распределения вероятности моментов автозахвата на фиксированном интервале, соответственно, вызывающая увеличение вероятности.

Полученные результаты показывают возможность оценивания эффективности автозахвата траекторий движения цели с помощью вероятностей за заданное количество обзоров радиолокационного наблюдения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиотехнические системы: учеб. для студентов вузов / под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Изд. центр "Академия", 2008. 592 с.
2. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справ. / под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
3. Студер Ф., Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей / пер. с англ. М.: Радио и связь, 1993. 319 с.

4. Кузьмин С. З. Цифровая обработка радиолокационной информации. М.: Сов. радио, 1967. 400 с.
5. Fast and Robust Track Initiation using Multiple Trees / J. Kubicka, A. W. Moore, A. Connolly, R. Jedicke // Carnegie Mellon University. Pittsburg, PN, 2004. URL <http://repository.cmu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1224&context=robotics> (дата обращения: 11.07.2017)

Статья поступила в редакцию 10 марта 2017 г.

Для цитирования: 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.

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

E-mail: kig28@mail.ru

Комягин Борис Петрович – кандидат технических наук (2005), доцент (2014) военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина" (Воронеж). Автор более 50 научных трудов. Сфера научных интересов – алгоритмизация и программирование систем обработки радиолокационной информации в задачах управления воздушным движением.

E-mail: kombors@gmail.com

G. S. Nakhmanson, B. P. Komyagin
AF MESC "N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)

Efficiency of Air Target Motion Path Detecting in Case of Radar Data Secondary Processing

Abstract. The article considers statistical descriptions of time interval estimation for air target motion trajectory automatic detection in radar information secondary processing. Analytical expressions for confidential probabilities of the air target motion trajectory automatic detection are obtained. It is supposed that the target location mark appearance is invariable within the whole observation time.

The confidential probability dependences are analyzed from the signal noise ratio for the received signals with random amplitudes and elementary phases. It is shown that the target motion trajectory determination probability increases with the increase of signal noise ratio and decrease of radar observation period number.

Key words: Trajectory Auto Capture, Average Time of Auto Capture, Dispersion, Confidential Probability

REFERENCES

1. Kazarinov Yu. M. *Radiotekhnicheskie sistemy: uchebnyk dlya stud. vyssh. ucheb. zavedenii* [Radio Engineering Systems]. Moscow, Akademiya, 2008, 592 p. (In Russian)
2. Shirman Ya. D. *Radioelektronnye sistemy: osnovy postroyeniya i teoriya* [Radio Electronic Systems: Fundamentals of Construction and Theory]. Moscow, Radiotekhnika, 2007, 512 p. (In Russian)
3. Studer F., Farina A. *Tsifrovaya obrabotka radiolokatsionnoi informatsii. Soprovozhdenie tselei* [Digital Processing of Radar Information]. Moscow, Radio i svyaz', 1993, 319 p. (In Russian)
4. Kuz'min S. Z. *Tsifrovaya obrabotka radiolokatsionnoi informatsii* [Digital Processing of Radar Information]. Moscow, Sov. radio, 1967, 400 p. (In Russian)
5. Kubicka J., Moore A. W., Connolly A., Jedicke R. Fast and Robust Track Initiation using Multiple Trees. Carnegie Mellon University, Pittsburg, PN, 2004. URL <http://repository.cmu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1224&context=robotics> (accessed date: 11.07.2017)

Received Mars, 10, 2017

For citation: Nakhmanson G. S., Komyagin B. P. Efficiency of Air Target Motion Path Detecting in Case of Radar Data Secondary Processing *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 4, pp. 52–55. (In Russian)

Gennady S. Nakhmanson – D.Sc. in Engineering (1993), Professor (1992) of the Military Educational and Scientific Center of Air Force "Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy" (Voronezh). The author of more than 300 scientific publications. Area of expertise: processing of broadband signals in multipurpose radio engineering systems; optical processing of signals in real time.

E-mail: kig28@mail.ru

Boris P. Komyagin – Ph.D. in Engineering (2005), Associate Professor (2014) of the Military Educational and Scientific Center of Air Force "Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy" (Voronezh). The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: algorithmization and programming of radar information processing systems in the tasks of air traffic control.

E-mail: kombors@gmail.com