

КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ИХ СИСТЕМ

УДК 621.396.96

ОПТИМИЗАЦИЯ РАДАРНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ-ШУМ

Абдулов Р.Н.^{1*}, Асадов Х.Г.^{2**}

¹ Научно-исследовательский институт Министерства оборонной промышленности Азербайджанской Республики, ул. Рахиба Мамедова, 25, Баку, AZ1123, Азербайджанская Республика

² Научно-исследовательский институт Аэрокосмической информатики, пр. Азадлыг, 159, Баку, AZ1106, Азербайджанская Республика

* e-mail: Rauf.abdulov@mail.ru

** e-mail: asadzade@rambler.ru

Рассматривается вопрос об оптимизации обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) радарными в условиях динамических изменений шумового сигнала. Сформирована новая постановка задачи обнаружения нескольких импульсов на входе радара при динамически изменяемом отношении сигнал/шум. Сформулирована и решена оптимизационная задача вычисления минимально допустимой интегрированной величины отношения сигнал/шум, обеспечивающей обнаружение серии импульсов на входе радара с заданной растущей последовательностью значений вероятности обнаружения.

Ключевые слова: вероятность обнаружения, система «БПЛА-радар», вероятность ложной тревоги, функционал цели, отношение сигнал-шум, критерий оптимизации.

Введение

Хорошо известно, что проблема защищенности беспилотных летательных аппаратов тесно связана с решением таких вопросов, как выбор оптимальной траектории полета, обеспечение визуальной скрытности, а также электромагнитной скрытности от радаров противника. Первая задача традиционно решается с учетом маневренности БПЛА [1–4], в том числе радиуса поворота, безопасной высоты полета, способности подъема, минимальной величины шага, потребления топлива и др. Как отме-

чается в [5, 6], для снижения вероятности обнаружения летательных аппаратов радиолокационными средствами используются специальные конструкции планеров и особые покрытия корпусов, поглощающее радиолокационное излучение. При этом скрытность летательных аппаратов (ЛА) также может быть обеспечена при использовании специальных траекторий в зонах обнаружения радиолокационной станции (РЛС). Согласно [7, 8], проблема обнаружения БПЛА может быть решена путем построения мультисенсорных комплексов, включающих

радары, акустические микрофоны, оптические камеры инфракрасного и видимого диапазонов, лидары. При этом сложность обнаружения и идентификации различного рода незаконных или наразрешенных беспилотных летательных аппаратов обусловлена малыми высотами полета, малыми размерами и высокой маневренностью ЛА [9–11]. Для решения указанной проблемы наиболее подходящими оказываются «пассивные радары», работающие на принципе регистрации акустических и электромагнитных волн, излучаемых БПЛА. При отсутствии больших и комплексных конструкций БПЛА идентификация малых летательных аппаратов оказывается возможной по той причине, что компоненты этих средств модулируют электромагнитную радиацию в масштабах, сравнимых с большими летательными аппаратами [12–14].

Визуальная скрытность БПЛА обеспечивается за счет нанесения на их поверхность специальных светящихся материалов с электронным управлением [15, 16]. Электромагнитная скрытность БПЛА от радаров обеспечивается специальными покрытиями с высоким коэффициентом поглощения, а также подсчетом вероятностей обнаружения ложной тревоги и пропуска при заданной величине отношения сигнал/шум.

Статья посвящена анализу взаимосвязанного оптимального выбора вероятностных показателей обнаружения в системе «БПЛА — радар», соответствующих минимальной величине отношения сигнал/шум на выходе приемной части радара, т.е. наихудшим условиям обнаружения БПЛА.

Состояние проблемы

Для решения вышеуказанной задачи воспользуемся некоторыми сведениями, приведенными в [17–18].

В современных системах противовоздушной обороны одним из основных средств обнаружения БПЛА являются радары, при этом вероятность обнаружения БПЛА радаром определяется по следующему алгоритму:

1. С учетом позиции точечной цели (т.е. БПЛА) и позиции антенны радара вычисляется угол наклона θ и определяется формула антенной решетки

$$F(\theta) = e^{-2,78\theta^2 / \theta_B}, \quad (1)$$

где θ_B — ширина луча в плотности подъема с ослаблением 3 дБ.

2. Максимальное расстояние обнаружения радара R_{\max} и расстояние от точечной цели до центра радара $R(\theta)$ связаны следующим соотношением:

$$R(\theta) = R_{\max} \cdot \sqrt{F(\theta)}. \quad (2)$$

3. В соответствии с уравнением радара между основными параметрами процесса электромагнитной радиолокации имеется следующее соотношение:

$$R_{\max} = 4 \sqrt{\frac{P_{av} \cdot G^2 \cdot T_m \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot k T_0 \cdot F_n \cdot t \cdot B[S/N]_{\min} \cdot L}}, \quad (3)$$

где P_{av} — средняя величина переданной мощности;

G — усиление антенны;

λ — длина волны;

σ — поперечное сечение радара;

k — постоянная Больцмана;

T_m — период повтора импульсов;

t — длительность импульса;

T_0 — абсолютная температура, К;

F_n — коэффициент шума приемника;

B — ширина полосы шумов;

L — коэффициент потерь системы;

$[S/N]_{\min}$ — минимальная величина отношения сигнал/шум при обнаружении одного импульса.

Согласно [17–19] имеет место следующее равенство:

$$\left[\frac{S}{N} \right]_{\min} = A + 0,12A \cdot B + 1,7B. \quad (4)$$

Здесь

$$A = \ln \left(\frac{0,62}{P_f} \right); \quad (5)$$

$$B = \ln \left(\frac{P_d}{1 - P_d} \right), \quad (6)$$

где P_d — вероятность обнаружения;

P_f — вероятность ложной тревоги.

На рис. 1 приведены графики вероятности обнаружения синусоидального сигнала в смеси с шумом в качестве функции отношения сигнал/шум и вероятности ложной тревоги.

Как отмечается в [20], в формуле (4) отношение сигнал/шум оценивается в обычных числах (не в дБ). Формула (4) верна для P_f в диапазоне $10^{-3} \dots 10^{-7}$; для P_d — в диапазоне $0,1 \dots 0,9$. При этом формула (4) верна для случая обнаружения одного импульса.

Рассмотрим случай обнаружения нескольких импульсов. Согласно [17], если радар осуществля-

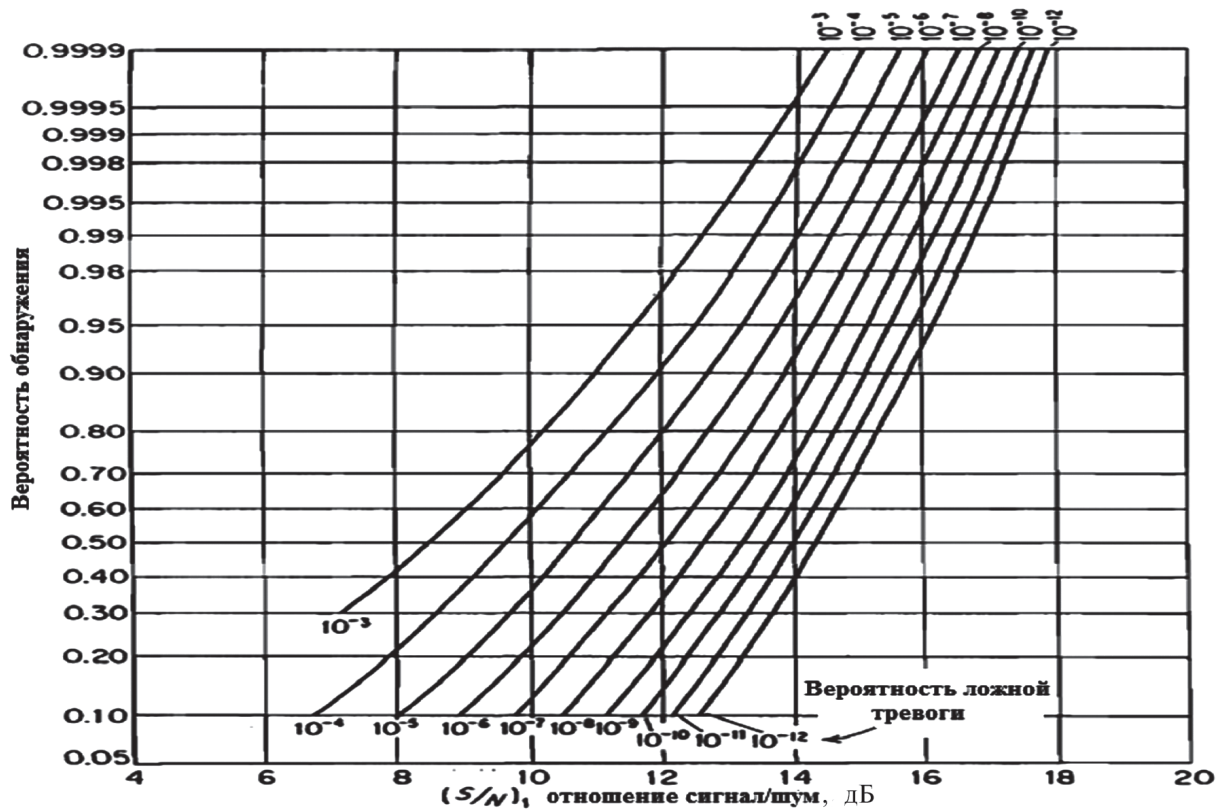


Рис. 1. Графики вероятности обнаружения зашумленного синусоидального сигнала в зависимости от отношения сигнал/шум и вероятности ложной тревоги

ет N сканов и M обнаружений, то вероятность обнаружения

$$P_d = \sum_{k=0}^N \frac{N!}{k!(N-k)!} \cdot p^k (1-p)^{N-k}. \quad (7)$$

Выражение (7) является нелинейным уравнением и сопряжено с определенными вычислительными трудностями.

Предлагаемое решение

Рассмотрим новую постановку задачи, связанную с обнаружением нескольких импульсов на входе приемника радара при динамически изменяемом отношении сигнал/шум.

Считаем, что вероятность P_d непрерывно растет во времени и допускаем, что интеграл суммы P_d и P_f равен некоторой константе, т.е.

$$\int_{P_{d \min}}^{P_{d \max}} (P_d + kP_f) dP_d = C_1, \quad (8)$$

где k — некоторая постоянная; $C_1 = \text{const}$.

Условие (8) формируется из следующих соображений. Допускаем, что вероятность правильного

обнаружения цели P_d , учитывая полную группу событий, можно представить в виде

$$P_d = 1 - P_f. \quad (9)$$

Из (9) имеем

$$P_d + P_f = 1. \quad (10)$$

При обнаружении единичного импульса P_d и P_f изменяются взаимноинверсно, что показано на рис. 2 [20].

Вместе с тем, в условиях динамически изменяемого отношения сигнал/шум, с учетом принятого

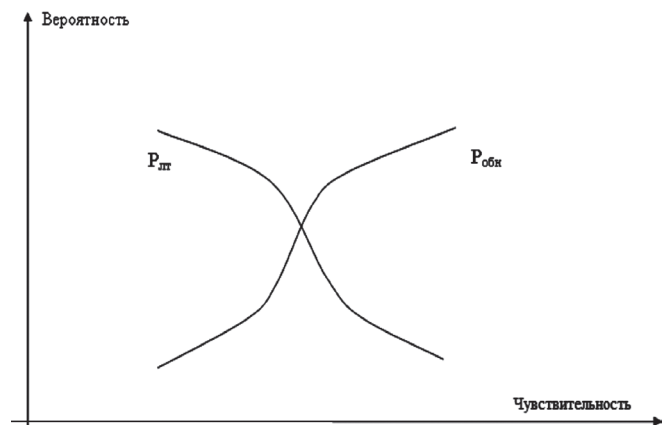


Рис. 2. Динамика изменения P_d и P_f в зависимости от чувствительности приемника радара

го условия (8), при сохранении взаимноинверсного по форме характера изменений P_d и P_f можно ставить задачу о вычислении оптимальной взаимосвязи значений P_d и P_f . Критерий оптимизации сформируем на базе выражения (4). С учетом (4)—(6), а также приняв

$$\psi = \left[\frac{S}{N} \right]_{\min}, \quad (11)$$

запишем

$$\psi = \ln \left(\frac{0,62}{P_f} \right) + 0,12 \ln \left(\frac{0,62}{P_f} \right) \cdot \ln \left(\frac{P_d}{1-P_d} \right) + 1,7 \ln \left(\frac{P_d}{1-P_d} \right). \quad (12)$$

Интегрируя (12) по P_d , получим

$$\psi_{\text{int}} = \int_{P_{d\min}}^{P_{d\max}} \psi dP_d = \int_{P_{d\min}}^{P_{d\max}} \left[\ln \left(\frac{0,62}{P_f} \right) + 10,12 \ln \left(\frac{0,62}{P_f} \right) \ln \left(\frac{P_d}{1-P_d} \right) + 1,7 \ln \left(\frac{P_d}{1-P_d} \right) \right] dP_d.$$

Введя в рассмотрение искомую функцию связи

$$P_f = f(P_d), \quad (13)$$

на основе (8) и (12) сформируем задачу безусловной вариационной оптимизации:

$$\psi_{\text{int}} = \int_{P_{d\min}}^{P_{d\max}} \psi dP_d = \int_{P_{d\min}}^{P_{d\max}} \left[\ln \left(\frac{0,62}{P_f} \right) + 0,12 \ln \left(\frac{0,62}{P_f} \right) \cdot \ln \left(\frac{P_d}{1-P_d} \right) + 1,7 \ln \left(\frac{P_d}{1-P_d} \right) \right] dP_d + \lambda \int_{P_{d\min}}^{P_{d\max}} [P_d + kf(P_d)] dP_d, \quad (14)$$

где λ — множитель Лагранжа.

Смысл оптимизационной задачи (14) заключается в нахождении такой зависимости $P_f = f(P_d)$ в серии операций радарного обнаружения с возрастающим показателем P_d от $P_{d\min}$ до $P_{d\max}$, при которой достигается минимум интегрированной величины минимальных значений отношения сигнал/шум, обеспечивающих обнаружение точечных объектов в каждой из радарных операций.

Для упрощения математической записи, введя обозначения

$$\frac{P_d}{1-P_d} = \varphi(P_d); \quad (15)$$

$$\left(\frac{P_d}{1-P_d} \right)^{0,12} = \varphi_1(P_d), \quad (16)$$

выражение (14) запишем в следующем виде:

$$\psi_{\text{int}} = \int_{P_{d\min}}^{P_{d\max}} \psi dP_d = \int_{P_{d\min}}^{P_{d\max}} \left[\ln \left[\left(\frac{0,62}{P_f} \right) \varphi(P_d)^{1,7} \right] + \ln \left(\frac{0,62}{f(P_d)} \right) \ln \varphi_1(P_d) \right] dP_d + \lambda \int_{P_{d\min}}^{P_{d\max}} [P_d + k \cdot f(P_d)] dP_d. \quad (17)$$

Согласно уравнению Эйлера—Лагранжа решение задачи (17) должно удовлетворить условию

$$d \left\{ \begin{aligned} & \left[\ln \left[\left(\frac{0,62}{P_f} \right) \varphi(P_d)^{1,7} \right] + \right. \\ & \left. + \ln \left(\frac{0,62}{f(P_d)} \right) \ln \varphi_1(P_d) \right] + \lambda (P_d + kf(P_d)) \right\} \frac{dP_d}{df(P_d)} = 0. \quad (18) \end{aligned}$$

С учетом (18) получим

$$-\frac{1}{f(P_d)} - \frac{\ln \varphi_1(P_d)}{f(P_d)} + k\lambda = 0. \quad (19)$$

Из (19) находим

$$\varphi(P_d) = \frac{1 + \ln \varphi_1(P_d)}{k\lambda}. \quad (20)$$

С учетом (20) и (8) находим

$$\lambda = \frac{\int_{P_{d\min}}^{P_{d\max}} [1 + \ln \varphi_1(P_d)] dP_d}{k \left[C - \frac{(P_{d\max}^2 - P_{d\min}^2)}{2} \right]}. \quad (21)$$

Из (20) и (21) окончательно имеем

$$f(P_d) = \frac{k [1 + \ln \varphi_1(P_d)] \left[C - \frac{(P_{d\max}^2 - P_{d\min}^2)}{2} \right]}{\int_{P_{d\min}}^{P_{d\max}} [1 + \ln \varphi_1(P_d)] dP_d}. \quad (22)$$

Таким образом, как видно из выражения (22), рост P_d в оптимальном режиме должен сопровождаться уменьшением P_f .

Для выяснения типа экстремума функционала (17) достаточно вычислить вторую производную интегранта этого функционала и убедиться, что она всегда положительна, т.е. при условии (22) показатель Ψ_{int} достигает минимального значения.

На основе проведенного анализа можно заключить следующее: точечная цель в серии радарного обнаружения с вероятностью от $P_{d \min}$ до $P_{d \max}$ обнаруживалась при минимально достижимом показателе интегрированного отношения сигнал/шум на входе приемника радара, вероятность ложной тревоги должна иметь функциональную зависимость от P_d в виде выражения (22).

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности выработки требований к средствам обеспечения электромагнитной скрытности БПЛА, в частности к коэффициенту поглощения специальных покрытий или к различным генераторам шумового сигнала устройств радиомаскировки.

Выводы

1. Сформулирована новая постановка задачи обнаружения нескольких импульсов на входе радара при динамически изменяемом отношении сигнал/шум.

2. Сформулирована и решена оптимизационная задача вычисления минимально допустимой интегрированной величины отношения сигнал/шум, обеспечивающей обнаружение серии импульсов на входе радара с заданной растущей последовательностью значений вероятности обнаружения единичного импульса.

3. Проанализирована практическая значимость полученных результатов.

Библиографический список

1. Cao H., Brener N.E., Iyengar S.S. 3D large grid route planner for the autonomous underwater vehicles // International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics. 2009. Vol. 2. No.3, pp. 455-476.
2. Bell M.G.H. Hyperstar: a multi-path Astar algorithm for risk averse vehicle navigation // Transportation Research, part B: Methodological. 2009. Vol. 43. No. 1, pp. 97-107. DOI: 10.1016/j.trb.2008.05.010
3. Filippis L., Guglieri G., Quagliotti F. Path Planning Strategies for UAVS in 3D Environments / Journal of Intelligent Robotic Systems. 2012. Vol. 65. No. 1-4, pp. 247-264. DOI: 10.1007/s10846-011-9568-2
4. Jun M., D'Andrea R. Path planning for unmanned aerial vehicles in uncertain and adversarial environments

// Cooperative Control: Models, Applications and Algorithms. — Springer, New York, NY, USA. 2003. Vol. 1, pp. 95-110.

5. Курсанов А.П. Кинематические свойства траекторий скрытого движения летательного аппарата в зоне обнаружения бортовой доплеровской радиолокационной станции // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 4. С. 129-136.
6. Грумондз В.Т., Полищук М.А. Задача наведения беспилотного планирующего летательного аппарата на подвижную цель // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 4. С. 7-12.
7. Shi W., Arabadjis G., Bishop B., Hill P., Plasse R., Yoder J. Detecting, Tracking and identifying Airborne Threats with Netted Sensor Fence // Sensor Fusion — Foundation and Applications: Edited Volume / Edited by Ciza Thomas. — InTech, 2011. Chapter 8. DOI: 10.5772/17666
8. Kratky M., Fuxa L. Mini UAVs Detection by Radar // International Conference on Military Technologies (ICMT), 2015. DOI: 10.1109/MILTECHS.2015.7153647.
9. Poullin D. UAV Detection and Localization Using Passive DVB-T Radar MFN and SFN // Science and Technology Organization, 2016, 10 p. DOI: 10.14339/STO-MP-SET-231-18-PDF
10. Kuschel H. Approaching 80 years of passive radar // IEEE International Conference on Radar, Adelaide, Australia, 2013, pp. 213-217. DOI: 10.1109/RADAR.2013.6651987
11. Colone F., Falcone P., Bongioanni C., Lombardo P. WiFi-based passive bistatic radar: data processing schemes and experimental results // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (TAES), 2012. Vol. 48. No 2, pp. 1061-1079. DOI: 10.1109/TAES.2012.6178049
12. Moses A., Rutherford M.J., Valavanis K.P. Radar-based detection and identification for miniature air vehicles // IEEE International Conference on Control Applications (CCA), CO, USA, 2011, pp. 933-940. DOI: 10.1109/CCA.2011.6044363
13. Chen V., Miceli W., Himed B. Micro-doppler analysis in ISAR — review and perspectives // Radar Conference — Surveillance for a Safer World, Bordeaux, France, 2009, 1-6 p.
14. Zaugg E.C., Hudson D.L., Long D.G. The BYU mu SAR: A Small, Student-Built SAR for UAV Operation // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2006. DOI: 10.1109/IGARSS.2006.110
15. Абдулов П.Н., Абдуллаев Н.А., Асадов Х.Г. Обеспечение визуальной скрытности разведывательных беспилотных летательных аппаратов нижнего эшелона в условиях гомогенного и гетерогенного загрязнения атмосферы аэрозолем // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 4. С. 14-21.
16. Watson A., Ramirez C.V., Salud E. Predicting Visibility of Aircraft // PLoS One. 2009. Vol. 4. No. 5, pp.1-16. DOI: 10.1371/journal.pone.0005594

17. Zhan W., Wang W., Chen N., Wang Ch. Efficient UAV Path Planning with Multiconstraints in a 3D Large Battlefield Environment // *Mathematical Problems in Engineering*. 2014, 11 p. DOI: 10.1155/2014/597092
18. Skolnik M.I. Introduction to Radar systems. — McCraw-Hill Publishing Company Limited New Delhi. 2001. — 772 p.
19. Aubersheim W.J. A closed-form approximation of Robertson's detection characteristics // *Proceedings of the IEEE*. 1981. Vol. 69. No. 7, p. 839. DOI: 10.1109/PROC.1981.12082
20. KTSO.RU — Комплекс технических средств охраны. Нормативная документация, <http://www.ktso.ru/normdoc9/r78-36-030-2013/r78-36-030-2013>

OPTIMIZATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES DETECTION IN CONDITIONS OF SIGNAL-TO-NOISE RATIO VARIATION

Abdulov R.N.^{1*}, Asadov H.H.^{2}**

¹ *Research Institute of the Ministry of Defense Industry of Azerbaijan Republic,
25, Rahib Mammadov str., Baku, AZ1123, Republic of Azerbaijan*

² *Scientific and Research Institute of Aerospace Informatics,
159, Azadlig av., Baku, AZ1106, Republic of Azerbaijan*

* e-mail: Rauf.abdulov@mail.ru

** e-mail: asadzade@rambler.ru

Abstract

The problem of illegal unmanned aerial vehicles of various types' detection and identification consists in their low flight heights, small sizes and high maneuverability. The presented article analyses the interrelated optimal selection of detection probability figures in the "UAV-Radar" system, corresponding to the minimum value of the signal-to-noise ratio at the output of the radar receiving part, i.e. the worst conditions of the UAV detection. The authors suggest a new setting of the problem, associated with several pulses detection at the radar input while the signal-to-noise ratio changing dynamically. The article considers the situation when the detection probability grows with time, and the integral of the sum of detection probability and false alarm probability is equal to a certain constant. In conditions of dynamically changing signal-to-noise ratio with account for the accepted condition of constancy of the integral of the sum while preserving the mutually inverse by nature character changing of detection probability and the alarm probability the problem of optimal interrelation above said probabilities' values calculation the is being set. The optimization criterion was formulated in the form of the integral of the well-known expression, determining the interrelation between the signal-to-noise ratio minimum probabilities and false alarm. The gist of the formulated optimization problem consists in finding such probability dependence of false alarm from the detection probability in the series of operations of radar detection with growing detection probability, at which the minimum of the integrated value of minimum signal to noise ratios is reached,

ensuring detection of point objects at each radar operation. Based on the performed analysis the authors obtained the functional relationship of the false alarm probability from the detection probability for scenario, when a pinpoint target in the course of radar detection with growing detection probability is being detected at minimum achievable figure of integrated signal-to-noise ratio at the radar receiver input.

Keywords: detection probability, "radar-UAV system", false alarm probability, target functional, signal-to-noise ratio, optimization criterion.

References

1. Cao H., Brener N.E., Iyengar S.S. 3D large grid route planner for the autonomous underwater vehicles. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 2009, vol. 2, no. 3, pp. 455-476.
2. Bell M.G.H. Hyperstar: a multi-path Astar algorithm for risk averse vehicle navigation. *Transportation Research, part B: Methodological*, 2009, vol. 43, no. 1, pp. 97-107. DOI: 10.1016/j.trb.2008.05.010
3. Filippis L., Guglieri G., Quagliotti F. Path Planning Strategies for UAVS in 3D Environments. *Journal of Intelligent Robotic Systems*, 2012, vol. 65, no. 1-4, pp. 247-264. DOI: 10.1007/s10846-011-9568-2
4. Jun M., D'Andrea R. Path planning for unmanned aerial vehicles in uncertain and adversarial environments. *Cooperative Control: Models, Applications and Algorithms*. Springer, New York, NY, USA. 2003, vol. 1, pp. 95-110.
5. Kirsanov A.P. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 129-136.

6. Grumondz V.T., Polishchuk M.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2014, vol. 21, no. 4, pp. 7-12.
7. Shi W., Arabadjis G., Bishop B., Hill P., Plasse R., Yoder J. Detecting, Tracking and identifying Airborne Threats with Netted Sensor Fence. *Sensor Fusion - Foundation and Applications: Edited Volume*. Edited by Ciza Thomas. InTech, 2011. Chapter 8. DOI: 10.5772/17666
8. Kratky M., Fuxa L. Mini UAVs Detection by Radar. *International Conference on Military Technologies (ICMT), 2015*. DOI: 10.1109/MILTECHS.2015.7153647
9. Poullin D. UAV Detection and Localization Using Passive DVB-T Radar MFN and SFN. *Science and Technology Organization, 2016*, 10 p. DOI: 10.14339/STO-MP-SET-231-18-PDF
10. Kuschel H. Approaching 80 years of passive radar. *IEEE International Conference on Radar, Adelaide, Australia, 2013*, pp. 213-217. DOI: 10.1109/RADAR.2013.6651987
11. Colone F., Falcone P., Bongioanni C., Lombardo P. WiFi-based passive bistatic radar: data processing schemes and experimental results. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (TAES)*, 2012, vol. 48, no. 2, pp. 1061-1079. DOI: 10.1109/TAES.2012.6178049
12. Moses A., Rutherford M.J., Valavanis K.P. Radar-based detection and identification for miniature air vehicles. *IEEE International Conference on Control Applications (CCA), CO, USA, 2011*, pp. 933-940. DOI: 10.1109/CCA.2011.6044363
13. Chen V., Miceli W., Himed B. Micro-doppler analysis in ISAR - review and perspectives. *Radar Conference – Surveillance for a Safer World, Bordeaux, France, 2009*, 1-6 p.
14. Zaugg E.C., Hudson D.L., Long D.G. The BYU mu SAR: A Small, Student-Built SAR for UAV Operation. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2006*. DOI: 10.1109/IGARSS.2006.110
15. Abdulov R.N., Abdullaev N.A., Asadov Kh.G. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli*, 2017, vol. 9, no. 4, pp. 14-21.
16. Watson A., Ramirez C.V., Salud E. Predicting Visibility of Aircraft. *PLoS One*, 2009, vol. 4, no. 5, pp.1-16. DOI: 10.1371/journal.pone.0005594
17. Zhan W., Wang W., Chen N., Wang Ch. Efficient UAV Path Planning with Multiconstraints in a 3D Large Battlefield Environment. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 11 p. DOI: 10.1155/2014/597092
18. Skolnik M.I. *Introduction to Radar systems*. McCraw-Hill Publishing Company Limited New Delhi. 2001, 772 p.
19. Aubersheim W.J. A closed-form approximation of Robertson's detection characteristics. *Proceedings of the IEEE*, 1981, vol. 69, no. 7, p. 839. DOI: 10.1109/PROC.1981.12082
20. KTSO.RU – Kompleks tekhnicheskikh sredstv okhrany. Normativnaya dokumentatsiya, <http://www.ktso.ru/normdoc9/r78-36-030-2013/r78-36-030-2013>