

11. Manikyam R. et al. Comparing the effectiveness of commercial obfuscators against MATE attacks, *Proceedings of the 6th Workshop on Software Security, Protection, and Reverse Engineering*, 2016.
12. Schrittwieser S., Katzenbeisser S., Kinder J., Merzdovnik G., Weippl E. Protecting software through obfuscation: Can it keep pace with progress in code analysis?, *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2016, Vol. 49, pp. 1-37.
13. Borisov P.D., Kosolapov Yu.V. Sposob kolichestvennogo sravneniya obfustsiruyushchikh preobrazovaniy [Method for quantitative comparison of obfuscating transformations], *Informatika i avtomatizatsiya* [Computer Science and Automation], 2024, Vol. 23, pp. 684-726.
14. Gulwani S., Polozov O., Singh R., others. Program synthesis, *Foundations and Trends® in Programming Languages*, 2017, Vol. 4, pp. 1-119.
15. Holder W., McDonald J.T., Andel T.R. Evaluating optimal phase ordering in obfuscation executives, *Proceedings of the 7th Software Security, Protection, and Reverse Engineering/Software Security and Protection Workshop*, 2017, pp. 1-12.
16. Borisov P.D., Kosolapov Y.V. On the Automatic Analysis of the Practical Resistance of Obfuscating Transformations, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2020, Vol. 54, pp. 619-629.
17. Borisov P.D., Kosolapov Y.V. On the Characteristics of Symbolic Execution in the Problem of Assessing the Quality of Obfuscating Transformations, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2022, Vol. 56, pp. 595-605.
18. Mohsen R., Pinto A. Evaluating Obfuscation Security: A Quantitative Approach October 2015.
19. Lekssays A., Falah B., Abufardeh S. A Novel Approach for Android Malware Detection and Classification using Convolutional Neural Networks, *ICSOFIT*, 2020, pp. 606-614.
20. Kiger J., Ho S.S., Heydari V. Malware binary image classification using convolutional neural networks, *International Conference on Cyber Warfare and Security*, 2022, Vol. 17, pp. 469-478.
21. Jiang H., Polsani H., Liu Y. DeepGray: Malware Classification Using Grayscale Images with Deep Learning, *The International FLAIRS Conference Proceedings*, 2024, Vol. 37.
22. Ben Abdel Ouahab I., Bouhorma M., Boudhir A.A., El Aachak L. Classification of grayscale malware images using the K-nearest neighbor algorithm, *Innovations in Smart Cities Applications Edition 3: The Proceedings of the 4th International Conference on Smart City Applications 4*, 2020, pp. 1038-1050.

**Борисов Петр Дмитриевич** – ФГАНУ НИИ "Спецвузавтоматика"; e-mail: borisovpetr@mail.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +7863201-2817; зав. лабораторией.

**Косолапов Юрий Владимирович** – Южный федеральный университет; e-mail: yvkosolapov@sfnedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +7863297-5111; кафедра алгебры и дискретной математики; к.т.н.; доцент.

**Borisov Petr Dmitrievich** – FSASE SRI "Specvuzavtomatika"; e-mail: borisovpetr@mail.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +78632012817; head of the laboratory.

**Kosolapov Yury Vladimirovich** – Southern Federal University; e-mail: yvkosolapov@sfnedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +78632975111; the Department of Algebra and Discrete Mathematics; cand. of eng. sc.; associate professor

УДК 629.735.015

DOI 10.18522/2311-3103-2025-3-273-284

**И.В. Борисов, А.С. Кузьменко, В.Е. Курьян, М.В. Курьян, Е.М. Левченко**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ КООРДИНАТ ЦЕЛИ ПРИ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

*Предлагается и развивается алгебраический метод для определения координат целей и их погрешностей в составе группы беспилотных летательных аппаратов. Обоснованы основные допущения разрабатываемой модели функционирования группы беспилотных летательных аппаратов: скорости летательных аппаратов не превышают скорости звука в воздухе, а скорости целей, – не превосходят первую космическую. Представлены качественные оценки времени приёма радиолокационного сигнала для заданной пространственной погрешности координат цели, оценены требования к кварцевому генератору с целью обеспечения стабильности частоты. Сформулированы условия по количеству летательных аппаратов в группе, повышающих точность опреде-*

ления местоположения цели в пространстве. Проанализированы различные виды погрешностей, возникающих при организации поиска целей скоординированной группой летательных аппаратов. Исследованы вопросы зависимости результирующей погрешности вычисления координат цели поиска от погрешности измерения расстояния между летательными аппаратами в группе и самой целью в зависимости от их взаимной пространственной ориентацией. Разработан алгоритм, проведены расчёты и анализ результатов для этой постановки задачи. Выполнено моделирование на основе предложенного алгоритма с учётом случайных координат цели в фиксированном секторе и с учётом случайных погрешностей в измеренном расстоянии между группой летательных аппаратов и объектом поиска. Представлены результаты моделирования влияния конфигурации группы беспилотных летательных аппаратов и расположения цели на погрешность определения её координат. Проведена оценка для определения координат целей и оценка погрешности развиваемого алгебраического подхода. Определены, в связи с этим, пути дальнейших исследований. Рассмотрены вопросы оценки объёма вычисления при большом числе целей. Определена область использования и эффективность предлагаемого алгоритма и метода решения задачи в целом.

Алгебраический метод; алгебраические уравнения; координаты цели; погрешности координат; погрешности радиосигнала; летательные аппараты; беспилотный летательный аппарат; группа беспилотных летательных аппаратов; математическое моделирование; сектор поиска.

**I.V. Borisov, A.S. Kuzmenko, V.E. Kuryan, M.V. Kuryan, E.M. Levchenko**

#### **DETERMINATION OF TARGET COORDINATE ERRORS IN MULTI-POSITION RADAR USING GROUPS OF UNMANNED AIRCRAFT**

*The article proposes and develops an algebraic method for determining the coordinates of targets and their errors as part of a group of unmanned aerial vehicles. The main assumptions of the developed model of the functioning of a group of unmanned aerial vehicles: The speeds of aircraft do not exceed the speed of sound in the air, and the speeds of targets do not exceed the first space were justified. The main assumptions of the model of operation of a group of unmanned aerial vehicles: the UAV speeds do not exceed the speed of sound in the air, and the target speeds do not exceed the first space one, are justified in the article. Qualitative estimates of the radar signal reception time for a given spatial error of the target coordinates were presented. The conditions for the number of aircraft in the group are formulated, which increase the accuracy of determining the location of the target in space. The various types of errors that arise when organizing the search for targets by a group of aircraft are analyzed. The issues of dependence of the resulting error in calculating the coordinates of the search target on the error in measuring the distance between the aircraft in the group and the target itself, depending on their mutual spatial orientation, are investigated. An algorithm has been developed, calculations and analysis of the results for this task have been carried out. The simulation is based on the proposed algorithm, taking into account random coordinates of the target in a fixed sector and taking into account random errors in the measured distance between a group of aircraft and the search object. The results of modeling the influence of the configuration of a group of unmanned aerial vehicles and the location of the target on the error in determining its coordinates are presented. An assessment was carried out to determine the coordinates of the goals and an error estimate of the proposed algebraic approach. The ways of further research are determined. The issues of estimating the amount of calculation for a large number of goals are considered. The scope and effectiveness of the proposed algorithm and method for solving the problem as a whole are determined.*

*Algebraic method; algebraic equations; target coordinates; coordinate errors; radio signal errors; aircraft; unmanned aircraft; group of unmanned aircraft; mathematical simulation; search sector.*

**Введение.** Задачи обороны объектов от воздушно-космического нападения и угроз со стороны моря требуют организованного применения разнородных сил и средств. В этой связи возникает актуальная задача исследования путей оптимизации боевых действий. Не повторяя анализа, выводов и постановку задач в сфере разработок по беспилотным летательным аппаратам (БПЛА), отмеченных в работе [1], заметим следующее. Необходим поиск научно обоснованных путей обеспечения заданного уровня эффективности, при минимуме стоимости выполнения поставленной задачи [2]. К отмеченным задачам тесно примыкают задачи поиска объектов и подвижных средств террористов, а также поиск терпящих бедствие во всех средах [3].

Кроме того, актуальность предлагаемых мероприятий связана, прежде всего, с необходимостью контроля больших удалённых территорий, например, арктических с помощью летательных аппаратов (ЛА) [4]. Погрешность определения направления на цель в радиолокации определяется шириной диаграммы направленности антенны [5].

Современное состояние техники радионавигации и радиолокации, контроля космического пространства, а также радиоуправления привело к созданию многопозиционных радиотехнических комплексов.

Главным образом эти комплексы стационарного, наземного базирования: стационарные РЛС типа «Cobra Dane», «Pave Paws», «Дарьял», «Даугува», «Дон –2Н». Кроме того, созданы и эксплуатируются высокопотенциальные радиолокационные станции, базирующиеся и на плавучих платформах («Cobra Dudy») [6].

Все названные РЛС способны контролировать пространство до нескольких тысяч километров. Но всем им присущ главный недостаток – низкая живучесть и высокая стоимость [6].

Известные грунтовые, транспортируемые РЛС, например, «GBR-T», «Ground Master 403» имеют незначительную дальность обнаружения, – до 1000 км и 470 км соответственно. Их мобильность, а значит, и живучесть так же под вопросом, – они размещены на большом количестве, технически связанных, транспортных средств [6, 7].

В современных условиях развития высокоточного оружия и средств воздушно-космического нападения требуется высокая мобильность всей системы для обеспечения живучести.

В этой связи возникает задача создания многопозиционной радиолокационной системы, размещённой на БПЛА или группе БПЛА (ГБПЛА).

В интересах радиолокации в многопозиционных радиолокационных комплексах при контроле воздушно-космического пространства возможно применение как пассивных пеленгаторов в плоскости ГБПЛА, так и активных РЛС.

Однако, при пассивной локации с пространственно-разнесённой системой РЛС и с ростом скорости пеленгуемых целей, образуется только небольшая область пространства, где возможно пересечение диаграмм направленностей.

Несколько лучше обстоят дела в системе разнесённых активных РЛС на ГБПЛА. Но и здесь, с ростом скорости цели, существует аналогичная проблема. Высокоскоростная цель может и не попасть в область пересечения, например, трёх лучей диаграмм направленностей РЛС ГБПЛА, так как цель, переместившись на некоторое расстояние, может оказаться вне области пересечения. А повышение энергетического потенциала РЛС БПЛА вступает в противоречие с авиационным весом – увеличение массы и габаритов.

Поэтому существует граничное значение энергетического потенциала РЛС, при котором рассматриваемая мобильность и живучесть невозможна. Поэтому возможны следующие направления решения проблемы.

Первое, – исследование в направлении организации синхронного обзора воздушно-го пространства всеми РЛС группы и реализация при этом адаптивных процедур обнаружения целей в конечной области пространства.

Второе, – решение задачи подбора оптимальной конфигурации группировки ЛА (БПЛА) в зависимости от требуемой конечной погрешности, погрешности измерения прихода отраженного от цели радиолокационного импульса.

Второе направление связано с формированием боевого порядка группы.

Целью статьи является построение и анализ модели определения погрешностей координат цели при многопозиционной радиолокации с использованием группы беспилотных летательных аппаратов.

В работе ставится задача нахождения координат цели по измерению с четырёх БПЛА.

**Основная часть.** Для получения зависимости погрешности определения координат цели, от конфигурации группировки БПЛА и погрешности измерения времени, необходим алгоритм, расчеты по которому привели бы к минимальной погрешности определения координат цели с учётом конфигурации ГБПЛА [8, 9].

Для определения координат целей будем рассматривать систему, состоящую из: группировки беспилотных летательных аппаратов; наземных пунктов обслуживания беспилотных летательных аппаратов (БПЛА); наземной приемо-передающей аппаратуры. Часть аппаратуры может быть установлена, например, на кораблях, что существенно повысить качество и дальность сопровождения БПЛА [5]. Скорости летательных аппаратов не превосходят скорость звука в воздухе, а скорости целей, – не превосходят первую космическую скорость [4].

Перемещением цели и группы беспилотных летательных аппаратов (ГБПЛА) за время прохождения радиолокационного импульса можно пренебречь. Для определения местоположения цели с погрешностью, не превосходящей  $\delta r$  необходимо измерять время приема радиолокационного импульса с погрешностью не больше  $\delta t = \delta r/c$ . Так при погрешности  $\delta r \sim 3$  м, погрешность измерения времени приема импульса не должна превышать  $10^{-8}$  с.

При дальности прямой видимости  $L_0 \sim 400$  км, имеем  $\Delta t = 2 \cdot 10^{-3}$  с. Для обеспечения погрешности измерения времени не больше  $\delta t$  в течение промежутка времени  $\Delta t$ , требуется иметь генератор со стабильностью частоты не хуже  $\Delta \omega/\omega = 5 \cdot 10^{-6}$  на интервале времени порядка нескольких миллисекунд, что легко достижимо использованием простого кварцевого генератора.

Для однозначного определения координат цели достаточно использовать один излучатель и 4 приемника радиолокационных сигналов. Приемники не должны лежать в одной плоскости [10]. Если приемников больше, чем 4, то точность определения местоположения цели возрастает [11].

Будем предполагать, что у нас имеется  $n$  приемников, например, по количеству БПЛА в группе [12]. Пусть в момент времени  $t$  координаты цели  $x_c, y_c, z_c$ , координаты  $i$ -го ( $i$  пробегает значения  $1, 2, 3, 4, \dots, n$ ) БПЛА  $x_i, y_i, z_i$ . Обозначим  $L_{ci}$  – расстояние между целью и  $i$ -ым БПЛА, а  $l_{ij}$  – расстояние между  $i$ -ым и  $j$ -ым БПЛА.

Для обнаружения цели  $j$ -ый БПЛА излучает локационный радиосигнал в момент времени  $t$ . На  $i$ -ом БПЛА он принимается в момент времени  $t_{0ji}$ . Отраженный от цели локационный сигнал принимается на  $i$ -ом БПЛА в момент времени  $t_{ci}$ . Тогда для расстояний и времен имеем следующее соотношение [4]:

$$L_{cj} + L_{ci} - L_{ij} = c(t_{ci} - t_{0ji}). \quad (1)$$

Здесь индекс  $i$  пробегает значения  $1, 2, 3, 4, \dots, n$ ,  $c$  – скорость света. Эти общие уравнения не зависят от выбора системы координат, и справедливы в любой координатной системе, хотя явный вид уравнений зависит от выбора системы координат. Для определения трех значений координат цели  $x_c, y_c, z_c$ , у нас есть как минимум четыре алгебраических уравнения.

Эта система уравнений имеет единственное решение. Следует отметить, что трех уравнения для однозначного определения местоположения цели недостаточно.

Если мы имеем три БПЛА, то соответствующая система из трех уравнений (1), с  $i=1, 2, 3$ , имеет два решения симметричных относительно плоскости, проходящих через три БПЛА. Для исключения этой неоднозначности требуется четвертый БПЛА и, соответственно, четвертое уравнение. Систему уравнений для определения координат цели можно записать и в инвариантной форме.

Предположим, что первый ЛА излучает и принимает отраженный от цели сигнал. В этом случае  $i=j=1$ ,  $l_{ij} = 0$ ,  $L_{ci} = L_{cj} = 2r_1$ , где  $r_1$  расстояние между целью и первым ЛА. Зная расстояние между целью и всеми ЛА, мы легко находим из системы (1) расстояния между вторым, третьим и четвертым ЛА. Таким образом, задача решения системы (1) сводится к определению положения цели по известным расстояниям до каждого из  $n$  ЛА координаты которых известны.

Систему уравнений (1) при известных расстояниях между ЛА и целью можно записать в декартовых координатах следующим образом:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = r_1^2. \quad (2)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = r_2^2. \quad (3)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = r_3^2. \quad (4)$$

$$(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 = r_4^2. \quad (5)$$

Для определения координат цели введём декартову систему координат следующим образом. Начало системы координат находится в точке нахождения опорного летательного аппарата 1. Ось X проходит от БПЛА 1 к БПЛА 2, ось Y перпендикулярно оси X так, что БПЛА 3 лежит в плоскости XY. Ось Z ортогональна осям X и Y и составляет с ними правую тройку координатных осей. При таком выборе системы координат имеем координаты БПЛА 1 (0,0,0), координаты БПЛА 2 (1<sub>12</sub>,0,0), координаты БПЛА 3 (x<sub>3</sub>, y<sub>3</sub>, 0), координаты БПЛА 4 (x<sub>4</sub>, y<sub>4</sub>, z<sub>4</sub>).

А значит, системы координат, уравнения (2-4), будут иметь вид:

$$x^2 + y^2 + z^2 = r_1^2. \quad (6)$$

$$(x - x_2)^2 + y^2 + z^2 = r_2^2. \quad (7)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + z^2 = r_3^2. \quad (8)$$

Вычитая из уравнения (6) уравнение (7) получаем

$$2x_2 \cdot x - x_2^2 = r_1^2 - r_2^2 \quad (9)$$

Вычитая из уравнения (6) уравнение (8) получаем

$$2x_3 \cdot x - x_3^2 + 2y_3 \cdot y - y_3^2 = r_1^2 - r_3^2 \quad (10)$$

Из (8)-(9) получаем возможные координаты цели (x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>, z<sub>0</sub>) и (x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>, -z<sub>0</sub>)

$$x_0 = \frac{x_2^2 + r_1^2 - r_2^2}{2x_2}. \quad (11)$$

$$y_0 = \frac{x_3^2 + y_3^2 + r_1^2 - r_3^2 - 2x_3^2}{2x_2}. \quad (12)$$

$$z_0 = \pm \sqrt{r_1^2 - x_0^2 + y_0^2}. \quad (13)$$

Заметим, что нахождение координат цели по измерению с трех БПЛА дают два возможных варианта симметричных относительно плоскости проходящей через эти три аппарата. Для устранения этой неоднозначности подставим значения, полученные из (11)-(13), в (5) и выберем из них те значения, при котором соотношение (5) является тождеством. Результаты моделирования представлены на рис. 1.

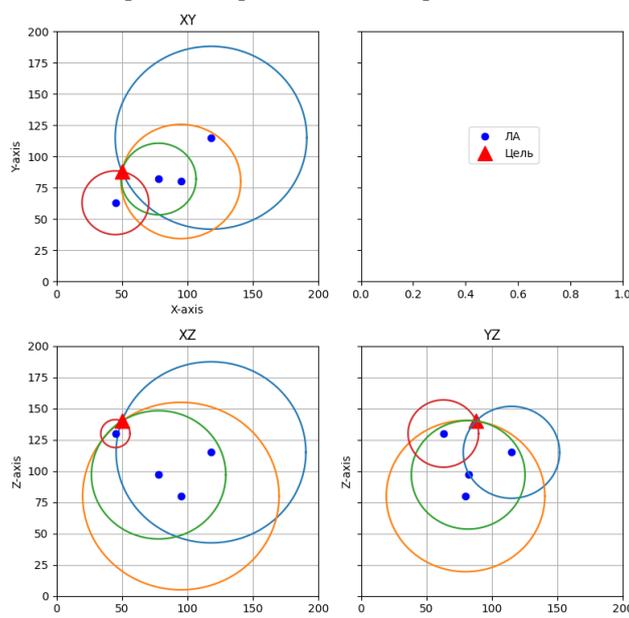


Рис. 1. Результаты моделирования взаимного положения цели и ГБПЛА

На данном рисунке изображены: цель (синяя точка), четыре БПЛА (красные точки), проекции на плоскость сферы радиусов  $r_1 - r_4$  в километрах, с центрами в месте расположения БПЛА. Цель находится на пересечении всех четырех сфер.

Поскольку при всех измерениях возникают погрешности, то времена прихода сигналов на БПЛА фиксируются также с погрешностью, что эквивалентно погрешности измерения величин  $r_1 - r_4$ . Этот неоспоримый факт приводит к тому, что координаты цели рассчитываются с определенной погрешностью.

Погрешность определения координат цели зависит как от погрешности измерения времени прихода сигнала, так и от погрешности измерения собственных координат БПЛА, от пространственного положения боевого порядка группировки БПЛА, и от координат цели соответственно.

Далее, исследуем, как зависит результирующая погрешность вычисления координат цели от погрешности измерения расстояния между БПЛА и целью в зависимости от конфигурации ГБПЛА. Используя эти результаты, можно определить оптимальную конфигурацию группировки, её боевой порядок, при заданных погрешностях измерений и ограничении на высоты и удаление БПЛА между собой для обеспечения минимальной погрешности определения координат цели.

Для получения зависимости погрешности определения координат цели, от конфигурации группировки БПЛА и погрешности измерения времени, проводились расчеты по следующему алгоритму.

Задавались координаты БПЛА, на различных удалениях друг от друга, случайным образом задавались координаты цели в фиксированном секторе поиска, в результате измерения расстояний между БПЛА и целью вносилась случайная погрешность, после этого вычислялись координаты цели и сравнивались с истинными значениями. Результат моделирования приведен на рис. 2.

По горизонтальной оси отложена погрешность измерения времени прихода сигнала, умноженная на скорость света, по вертикальной оси отложена погрешность определения координат цели (все моделируемые параметры представлены в метрах). Расстояние между БПЛА в горизонтальной плоскости 100 км, в вертикальной плоскости один из них находился на высоте на 5 км выше остальных, максимальное расстояние от цели до ближайшего БПЛА 100 км.

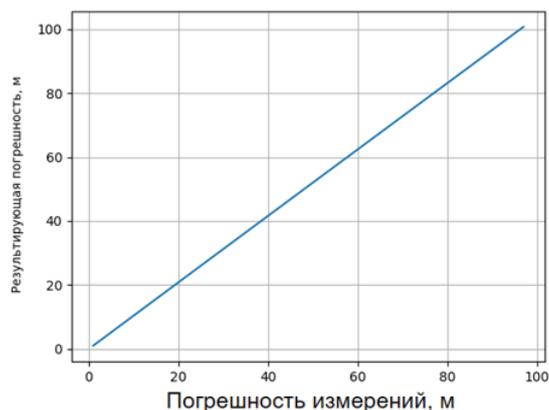


Рис. 2. Зависимость погрешности определения координат цели от погрешности измерения времени прихода сигнала

Влияние конфигурации ГБПЛА и расположения цели на погрешность определения координат с учетом задания фиксированной погрешности прихода импульса для различных расположений цели показывает зависимость на рис. 3.

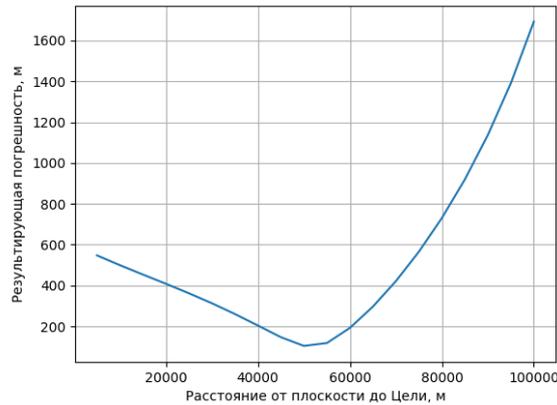


Рис. 3. Зависимость погрешности определения координат цели от расстояния между целью и плоскостью, в которой расположены три БПЛА

Из рисунка видно, что зависимость погрешности определения координат цели не монотонна. Расстояние между первым и каждым из других БПЛА 100 км. Погрешность определения времени импульсов, умноженная на скорость света составляет 100 м. Моделирование зависимости погрешности определения координат цели от ее расположения представлены на рис. 4.

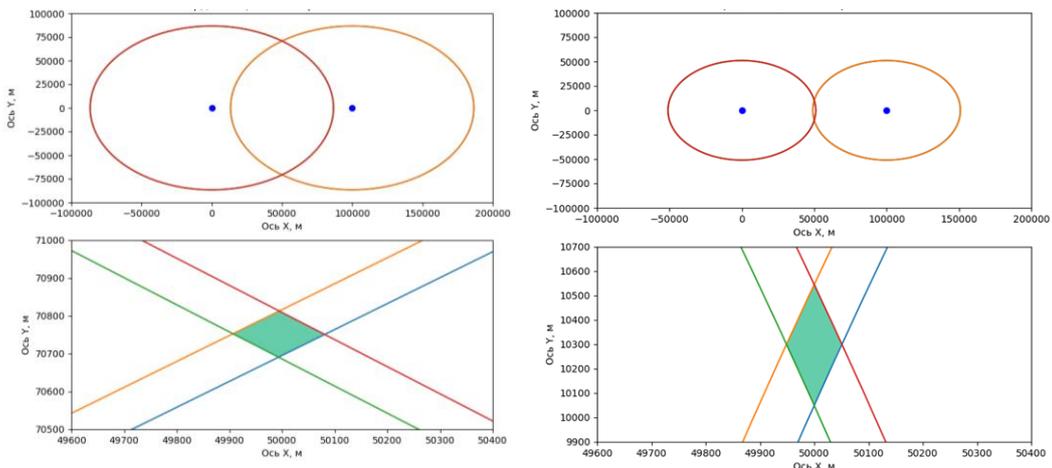


Рис. 4. Зависимости погрешности определения координат цели от ее расположения

Как видно из рис. 4, при различных удалениях цели от плоскости БПЛА угол пересечения окружностей, центры которых находятся в точках расположения ГБПЛА, а радиусы равны расстоянию между БПЛА и целью различны. Минимальная погрешность получается, как следует из анализа графиков, изображённых на рис. 4 и 5, когда угол пересечения окружностей близок к 90 градусам, а при малом угле погрешность будет заметно больше.

График зависимости погрешности определения координат цели от расстояния между ГБПЛА и погрешности измерения времени прихода импульса от цели показан на рис. 6.

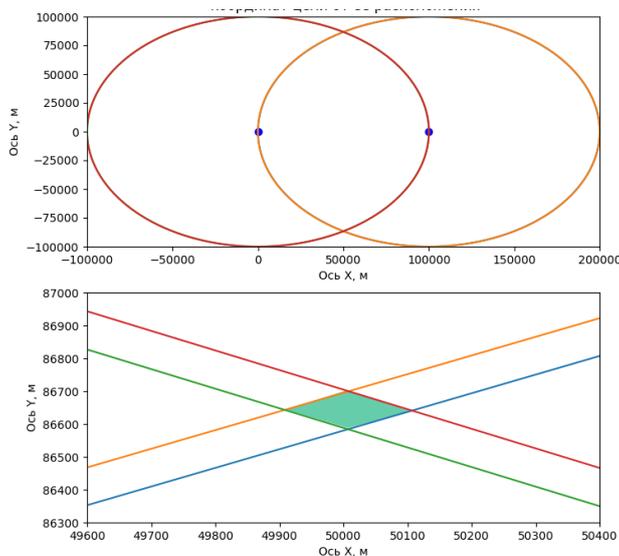


Рис. 5. Зависимости погрешности определения координат цели от ее расположения при углах пересечения окружностей близких к 90 градусам

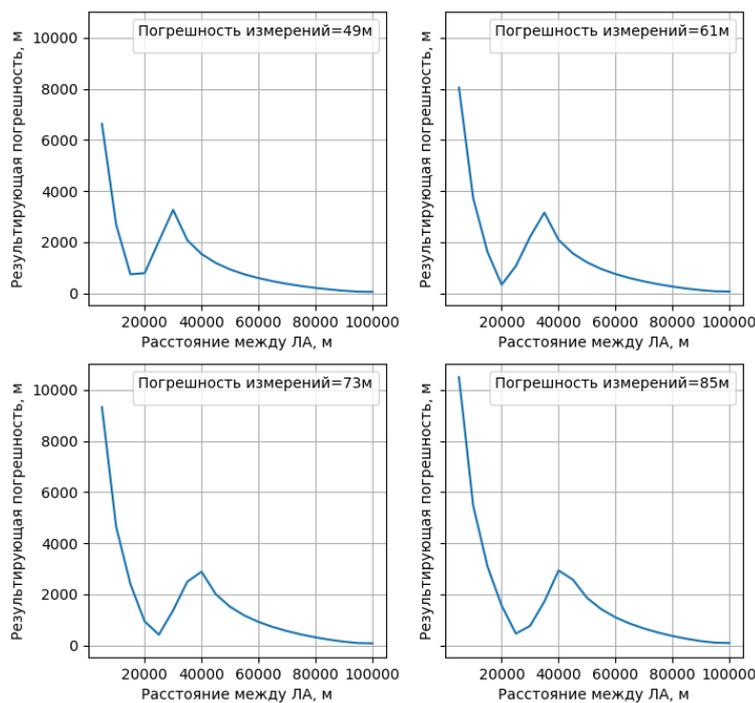


Рис. 6. График зависимости погрешности определения координат цели, в зависимости от погрешности измерений времени прихода импульсов и расстояниями между ЛА (БПЛА)

Из рис. 6 видно, что для уменьшения погрешности определения координат цели желательно иметь большее число БПЛА, находящихся в различных положениях. При этом использование данных с большего числа БПЛА позволит уменьшить погрешность определения координат цели.

Полученные результаты, по порядку величины, совпадают с оценками ошибками измерения, в 50-60 метров, приведёнными в работе. При этом, заметим, что в указанной работе оценка проведена без учёта эффекта Доплера, который вызовет несколько большую ошибку и сравняется с нашим результатом. Для уменьшения влияния эффекта Доплера на ошибку измерения на практике прибегают к увеличению девиации частоты при одновременном увеличении полосы пропускания фильтров. В этом случае соответствующая максимальная оценка сократится, по порядку величины, до полученных нами результатов [25].

Задаче подбора оптимальной конфигурации группировки ЛА (БПЛА) в зависимости от требуемой конечной погрешности, погрешности измерения прихода отраженного от цели радиолокационного импульса будут посвящены последующие работы.

**Заключение.** Подходы, применяемые для малоразмерных БПЛА [13] не могут быть автоматически перенесены на полноразмерные ЛА, применяемые в составе группы [14]. Применение искусственного интеллекта [15] не решает всех проблем поиска, автономного полета, и навигации даже при низкой цене за полёт [16]. Потребуется ещё достаточно много времени и средств для изучения способов дистанционного и автономного управления БПЛА, хотя уже сейчас и сделаны прорывные шаги в области искусственного интеллекта по этим направлениям [17]. Поэтому ещё достаточно предстоит приложить усилий для создания роботизированных комплексов, способных в автономном полёте собирать информацию из окружающей среды и проводить обучение бортового искусственного интеллекта [18]. Для организации группового полёта и поиска, в этой связи, важны задачи, обозначенные в [19], а также способы решения больших задач, представленные в [20], и даже начальные, дилетантские, задачи [21], не говоря уже о применении искусственного интеллекта [22].

В этой связи, заметим, что актуальны принципы формирования модели оптимизации системы роботизированных авиационных средств [23], на ряду с вопросами обеспечения безопасности каналов управления и обмена информацией в ГБПЛА [24].

Но какие бы задачи организации полёта БПЛА не решались, всегда нужно иметь ввиду, что динамика полёта имеет существенно стохастический характер. Поэтому, следует отметить, что из-за наличия погрешностей в определении времен прихода радиолокационного импульса на БПЛА система уравнений (2)-(5), вообще говоря, несовместна. Поэтому вместо решения алгебраической задачи решения системы алгебраических уравнений необходимо решать задачу поиска экстремума функции суммы разности квадратов левых и правых частей соотношений (2)-(5), что потребует итерационных процедур и методов [4]. Эти вопросы также, как и вероятностный подход [3] будут исследованы в последующих работах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Евтодьева М.Г., Целицкий С.В.* Беспилотные летательные аппараты военного назначения: тенденции в сфере разработок и производства // Пути к миру и безопасности. – 2019. – № 2 (57). – С. 104-111.
2. *Абросимов В.К.* Групповое движение интеллектуальных летательных аппаратов в антагонистических средах. – М.: Наука, 2013. – 168 с.
3. *Антохов И.Н., Левченко Е.М.* Вероятностная модель обнаружения объектов, перемещаемых с нарушением таможенного законодательства // Академический вестник Ростовского филиала Российской таможенной академии. – 2024. – № 4 (57). – С. 19-22.
4. *Зайцев А.А., Курьян В.Е., Левченко Е.М., Родионов В.А.* Научно-методические аспекты группового управления беспилотными летательными аппаратами // «Фундаментальная наука – Военно-Морскому Флоту». Т. 3: Матер. круглого стола в рамках VIII Международного военно-морского салона (МВМС-2017). 27 июня 2017 г. – Тверь: НИИ «Центрпрограммсистем», 2018. – С. 180-187.
5. *Зайцев А.А., Курьян В.Е., Левченко Е.М., Соколов С.В.* Применение нейронных сетей в задачах исследования волновых явлений морской поверхности // Методологические основы создания и применения технологий и систем для военно-морской деятельности. Фундаментальная наука – Военно-Морскому Флоту: монография в двух томах. Т. 2. – СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2021. – 123 с.

6. *Леонов С.А.* Радиолокационные средства противовоздушной обороны. – М.: Военное издательство, 1988. – С. 122-133.
7. *Боев С.Ф.* Глаза и интеллект РКО. Высокотенциальные радиолокационные станции: прошлое, настоящее и будущее // Военный парад. – 2001. – № 5 (47). – С. 58.
8. *Литвинов В.В.* Системы ракетно-космической обороны – гарант безопасности страны // Военный парад. – 2001. – № 4 (46). – С. 88-89.
9. *Алешин Б.С., Суханов В.Л., Шибяев В.М., Шнырёв А.Г.* Состояние дел и перспективы развития комплексов с беспилотными летательными аппаратами в России // Деловая слава России. – 2014. – № 3 (46). – С. 32-37.
10. *Бабушкин И.Н., Котков А.С., Растимешин Г.Д.* Интеллект группы БПЛА: анализ последних достижений и текущее развитие // Вестник новой ЭРЫ: Сб. статей. – 2024. – С. 285-299.
11. *Гончаренко В.И., Лебедев Г.Н., Канададзе С.С. [и др.]*. Задача целераспределения движущихся объектов при их наблюдении группой беспилотных летательных аппаратов // Нейрокомпьютеры и их применение: Сб. тезисов XXI Всероссийской научной конференции (Москва, 28 марта 2023 г.). – 2023. – С. 55-57.
12. *Воронов Е., Репкин А., Куся А., Сычёв С.* Комплексный алгоритм обнаружения, идентификации и целераспределения для группы управляемых объектов // Norwegian Journal of Development of the International Science. – 2024. – № 126. – С. 41-50.
13. *Ступницкий М.М., Мырова Л.О., Королев П.С.* Рой БПЛА – новая парадигма применения мало-размерных БПЛА // Электросвязь. – 2023. – № 4. – С. 2-10.
14. *Беляев П.Ю., Зикратов И.А., Зикратова Т.В., Неверов Е.А.* Использование пчелиного алгоритма для управления роями БПЛА при мониторинге местности // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023): Сб. научных статей. XII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция (Санкт-Петербург, 28 февраля – 01 марта 2023 г.). – 2023. – Т. 1. – С. 153-158.
15. *Li C.* Artificial Intelligence Technology in UAV Equipment // 2021 IEEE/ACIS 20th International Fall Conference on Computer and Information Science (ICIS Fall). – Xi'an, China, 2021. – P. 299-302. – DOI: 10.1109/ICISFall51598.2021.9627359.
16. *Varatharasan V., Rao A.S.S., Toutounji, E., et al.* Target Detection, Tracking and Avoidance System for Low-cost UAVs using AI-Based Approaches // 2019 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED UAS). – Cranfield, UK, 2019. – P. 142-147. – DOI: 10.1109/REDUAS47371.2019.8999683.
17. *Zheng L., Ai P., and Wu Y.* Building Recognition of UAV Remote Sensing Images by Deep Learning // IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Waikoloa, HI, USA, 2020. – P. 1185-1188. – DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323322.
18. *Zhang Y., McCalmon J., Peake A., et al.* A Symbolic-AI Approach for UAV Exploration Tasks // 2021 7th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA). – Prague, Czech Republic, 2021. – P. 101-105. – DOI: 10.1109/ICARA51699.2021.9376403.
19. *Wang Y., Su Z., Zhang N., and Benslimane A.* Learning in the Air: Secure Federated Learning for UAV-Assisted Crowdsensing // in IEEE Transactions on Network Science and Engineering. – April-June 2021. – Vol. 8, No. 2. – P. 1055-1069. – DOI: 10.1109/TNSE.2020.3014385.
20. *Kusyk J., Uyar M.U., Ma K., et al.* AI and Game Theory based Autonomous UAV Swarm for Cybersecurity // 2019 IEEE Military Communications Conference (MILCOM). – Norfolk, VA, USA, 2019. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/MILCOM47813.2019.9020811.
21. *Molina-Padrón N., Cabrera-Almeida F., Araña V., et al.* Monitoring in Near-Real Time for Amateur UAVs Using the AIS // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 33380-33390. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2973503.
22. *Zhang S., Wu X., Zhang G., et al.* Analysis of intelligent inspection program for UAV grid based on AI // 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). – Xi'an, China, 2020. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279634.
23. *Кутахов В.П., Мещеряков Р.В.* Принципы формирования модели оптимизации системы роботизированных авиационных средств // Сб. трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. – С. 1211-1214.
24. *Жарко Е.Ф., Промыслов В.Г., Исакова А.Ю. и др.* Кибербезопасность беспилотных транспортных средств. Архитектура. Методы проектирования. – М.: Радиотехника, 2021. – 160 с.
25. Радиолокационные устройства / под ред. В.В. Григорина-Рябова. – М.: Советское радио, 1970. – 231 с.

## REFERENCES

1. *Evtod'eva M.G., Tselitskiy S.V.* Bepilotnye letatel'nye apparaty voennogo naznacheniya: tendentsii v sfere razrabotok i proizvodstva [Unmanned aerial vehicles for military purposes: trends in the field of development and production], *Puti k miru i bezopasnosti* [Paths to Peace and Security], 2019, No. 2 (57), pp. 104-111.
2. *Abrosimov V.K.* Gruppovoe dvizhenie intellektual'nykh letatel'nykh apparatov v antagonisticheskikh sredakh [Group movement of intelligent aircraft in antagonistic environments]. M.: Nauka, 2013, 168 p.
3. *Antyukhov I.N., Levchenko E.M.* Veroyatnostnaya model' obnaruzheniya ob'ektov, peremeshchaemykh s narusheniem tamozhennogo zakonodatel'stva [Probabilistic model for detecting objects moved in violation of customs legislation], *Akademicheskii vestnik Rostovskogo filiala Rossiyskoy tamozhennoy akademii* [Academic Bulletin of the Rostov branch of the Russian Customs Academy], 2024, No. 4 (57), pp. 19-22.
4. *Zaytsev A.A., Kur'yan V.E., Levchenko E.M., Rodionov V.A.* Nauchno-metodicheskie aspekty gruppovogo upravleniya bepilotnymi letatel'nymi apparatami [Scientific and methodological aspects of group control of unmanned aerial vehicles], «Fundamental'naya nauka – Voенно-Morskому Flotu». T. 3: Mater. kruglogo stola v ramkakh VIII Mezhdunarodnogo voенно-morskogo salona (MVMS-2017). 27 iyunya 2017 g. [“Fundamental science - Naval 3. Materials of the round table within the framework of the VIII International Naval Salon (MVMS-2017). June 27, 2017]. Tver': NII «Tsentrogrammsistem», 2018, pp. 180-187.
5. *Zaytsev A.A., Kur'yan V.E., Levchenko E.M., Sokolov S.V.* Primenenie neyronnykh setey v zadachakh issledovaniya volnovykh yavleniy morskoy poverkhnosti [Application of neural networks in the tasks of studying wave phenomena of the sea surface], *Metodologicheskie osnovy sozdaniya i primeneniya tekhnologii i sistem dlya voенно-morskoy deyatel'nosti. Fundamental'naya nauka – Voенно-Morskому Flotu: monografiya v dvukh tomakh* [Methodological foundations of the creation and application of technologies and systems for naval activities. Fundamental Science to the Navy: A monograph in two volumes]. Vol. 2. Saint Petersburg: Izd-vo SPbGEU, 2021, 123 p.
6. *Leonov S.A.* Radiolokatsionnye sredstva protivovozdushnoy oborony [Radar anti-aircraft defense systems]. Moscow: Voенное izdatel'stvo, 1988, pp. 122-133.
7. *Boev S.F.* Glaza i intellekt RKO. Vysokopotsentsial'nye radiolokatsionnye stantsii: proshloe, nastoyashchee i budushchee [Eyes and intelligence of the Red Army. High-potential radar stations: past, present and future], *Voенный parad* [Military Parade], 2001, No. 5 (47), pp. 58.
8. *Litvinov V.V.* Sistemy raketno-kosmicheskoy oborony – garant bezopasnosti strany [Rocket and space defense systems are the guarantor of the country's security], *Voенный parad* [Military Parade], 2001, No. 4 (46), pp. 88-89.
9. *Aleshin B.S., Sukhanov V.L., Shibaev V.M., Shnyrev A.G.* Sostoyanie del i perspektivy razvitiya kompleksov s bepilotnymi letatel'nymi apparatami v Rossii [The state of affairs and prospects for the development of complexes with unmanned aerial vehicles in Russia], *Delovaya slava Rossii* [Business glory of Russia], 2014, No. 3 (46), pp. 32-37.
10. *Babushkin I.N., Kotkov A.S., Rastimeshin G.D.* Intellekt gruppy BPLA: analiz poslednykh dostizheniy i tekushchee razvitiye [Intelligence of the UAV group: analysis of recent achievements and current development], *Vestnik novoy ERY: Sb. statey* [Bulletin of the new ERA: Collection of articles], 2024, pp. 285-299.
11. *Goncharenko V.I., Lebedev G.N., Kananadze S.S. [i dr.].* Zadacha tseleraspredeleniya dvizhushchikhsya ob'ektov pri ikh nablyudenii gruppy bepilotnykh letatel'nykh apparatov [The task of target distribution of moving objects during their observation by a group of unmanned aerial vehicles], *Neyrokomp'yutery i ikh primeneniye: Sb. tezisov XXI Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii (Moskva, 28 marta 2023 g.)* [Neurocomputers and their application. Collection of abstracts of the XXI All-Russian Scientific Conference (Moscow, March 28, 2023)], 2023, pp. 55-57.
12. *Voronov E., Repkin A., Kuslya A., Sychev S.* Kompleksnyy algoritm obnaruzheniya, identifikatsii i tseleraspredeleniya dlya gruppy upravlyaemykh ob'ektov [Complex algorithm of detection, identification and target allocation for a group of controlled objects], *Norwegian Journal of Development of the International Science*, 2024, No. 126, pp. 41-50.
13. *Stupniitskiy M.M., Myrova L.O., Korolev P.S.* Roy BPLA – novaya paradigma primeneniya malorazmernykh BPLA [Swarm of UAVs – a new paradigm for the use of small-sized UAVs], *Elektrosvyaz'* [Telecommunications], 2023, No. 4, pp. 2-10.
14. *Belyaev P.Yu., Zikratov I.A., Zikratova T.V., Neverov E.A.* Ispol'zovanie pchelinoogo algoritma dlya upravleniya royami BPLA pri monitoringe mestnosti [The use of a bee algorithm for controlling swarms of UAVs when monitoring terrain], *Aktual'nye problemy infotelekkommunikatsiy v nauke i obrazovanii (APINO 2023): Sb. nauchnykh statey. XII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya i nauchno-metodicheskaya konferentsiya (Sankt-Peterburg, 28 fevralya – 01 marta 2023 g.)* [Actual problems of infotelecommunications in science and education (APINO 2023). Collection of scientific articles. XII International Scientific, Technical and Scientific-methodological Conference (St. Petersburg, February 28 – March 01, 2023), 2023, Vol. 1, pp. 153-158.

15. Li C. Artificial Intelligence Technology in UAV Equipment, *2021 IEEE/ACIS 20th International Fall Conference on Computer and Information Science (ICIS Fall)*. Xi'an, China, 2021, P. 299-302. DOI: 10.1109/ICISFall51598.2021.9627359.
16. Varatharasan V., Rao A.S.S., Toutounji, E., et al. Target Detection, Tracking and Avoidance System for Low-cost UAVs using AI-Based Approaches, *2019 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED UAS)*. Cranfield, UK, 2019, pp. 142-147. DOI: 10.1109/REDUAS47371.2019.8999683.
17. Zheng L., Ai P., and Wu Y. Building Recognition of UAV Remote Sensing Images by Deep Learning, *IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Waikoloa, HI, USA, 2020, pp. 1185-1188. DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323322.
18. Zhang Y., McCalmon J., Peake A., et al. A Symbolic-AI Approach for UAV Exploration Tasks, *2021 7th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*. Prague, Czech Republic, 2021, pp. 101-105. DOI: 10.1109/ICARA51699.2021.9376403.
19. Wang Y., Su Z., Zhang N., and Benslimane A. Learning in the Air: Secure Federated Learning for UAV-Assisted Crowdsensing, in *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*. April-June 2021, Vol. 8, No. 2, pp. 1055-1069. DOI: 10.1109/TNSE.2020.3014385.
20. Kusykh J., Uyar M.U., Ma K., et al. AI and Game Theory based Autonomous UAV Swarm for Cybersecurity, *2019 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*. Norfolk, VA, USA, 2019, pp. 1-6. DOI: 10.1109/MILCOM47813.2019.9020811.
21. Molina-Padrón N., Cabrera-Almeida F., Araña V., et al. Monitoring in Near-Real Time for Amateur UAVs Using the AIS, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 33380-33390. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2973503.
22. Zhang S., Wu X., Zhang G., et al. Analysis of intelligent inspection program for UAV grid based on AI, *2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. Xi'an, China, 2020, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279634.
23. Kutakhov V.P., Meshcheryakov R.V. Printsipy formirovaniya modeli optimizatsii sistemy robotizirovannykh aviatsionnykh sredstv [Principles of forming a model for optimizing a system of robotic aviation facilities], *Sb. trudov XIII Vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya VSPU-2019* [Proceedings of the XIII All-Russian Meeting on management problems of VSPU–2019]. Moscow: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2019, pp. 1211-1214.
24. Zharko E.F., Promyslov V.G., Iskhakova A.Yu. i dr. Kiberbezopasnost' bespilotnykh transportnykh sredstv. Arkhitektura. Metody proektirovaniya [Cybersecurity of unmanned vehicles. Architecture. Design methods]. Moscow: Radiotekhnika, 2021, 160 p.
25. Radilokatsionnye ustroystva [Radar devices], ed. by V.V. Grigorina-Ryabova. Moscow: Sovetskoe radio, 1970, 231 p.

**Борисов Игорь Викторович** – Южный федеральный университет; e-mail: ivborisov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра летательных аппаратов; к.т.н.; доцент.

**Кузьменко Алла Сергеевна** – Южный федеральный университет; e-mail: akuzm@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79043437260; кафедра летательных аппаратов; к.т.н.; доцент.

**Курьян Виктор Евгеньевич** – Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем; e-mail: kuryan@phystech.edu; г. Москва, Россия; к.ф.м.н.; ведущий инженер.

**Курьян Михаил Викторович** – Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»; e-mail: mishavbsefg@icloud.com; г. Москва, Россия; студент.

**Левченко Евгений Михайлович** – Южный федеральный университет; e-mail: elevche@sfedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; к.т.н.; зав. кафедрой летательных аппаратов.

**Borisov Igor Viktorovich** – Southern Federal University; e-mail: ivborisov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Aircraft; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Kuzmenko Alla Sergeevna** – Southern Federal University; e-mail: akuzm@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79043437260; the Department of Aircraft; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Kuryan Viktor Evgenievich** – State Scientific Research Institute of Aviation Systems; e-mail: kuryan@phystech.edu; Moscow, Russia; cand. of phys. and math. sc; senior engineer.

**Kuryan Mikhail Viktorovich** – National Research University "Moscow Institute of Electronic Technology"; e-mail: mishavbsefg@icloud.com; Moscow, Russia; student.

**Levchenko Evgeny Mikhailovich** – Southern Federal University; e-mail: elevche@sfedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; cand. of eng. sc.; head of the Department of Flight Devices.