

Алгоритмы функционирования магнито-метрической системы обеспечения поисково-спасательных операций с применением беспилотных летательных аппаратов

Д.Е. Гуцевич¹, Г.М. Проскуряков¹, В. Н. Слонов², Д.П. Тетерин²,
Е.А. Титенко³ ✉, С.Н. Фролов³, Л.А. Лисицин³

¹ ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина»
ул. Политехническая, 77, г. Саратов, 410054, Российская Федерация

² АО «Авиаавтоматика» им. В.В. Тарасова,
ул. Запольная, 47, г. Курск, 305040, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: johntit@mail.ru

Резюме

Цель исследования – сокращение времени и повышение эффективности поиска и спасения терпящих бедствие экипажей сухопутной техники, воздушных, надводных и подводных судов. Комплексирования физических, информационных и геометрических параметров позволяет достоверно обнаруживать одиночные ферромагнитные тела за счет анализа дополнительной информации в рабочих алгоритмах.

Методы. Статья содержит практически значимый вариант построения поисковой системы, реализуемой на двух и большем числе беспилотных летательных аппаратов, двигающихся в районе поиска в согласованном строю на базовой дистанции. Система решения основана на использовании в качестве магнитометрической информации компонент магнитного поля без использования первичной градиентометрической информации. Эта особенность позволяет получить компактные и функционально полные алгоритмы. Вычисления по таким алгоритмам обеспечивают устойчивость беспилотного летательного аппарата в различных сочетаниях курса, крена и тангажа.

Результаты. В статье были построены алгоритмы функционирования магнитометрической системы поиска ферромагнитных тел на основе уравнений магнитостатики. Интеллектуальная система построена по схеме измерительно-вычислительного контура с разнесенными в пространстве векторными трехосными блоками магнитометров. Система способна решать весь комплекс задач поиска, обнаружения, пеленгации, локализации, позиционирования и идентификации металлических предметов, обладающих собственным магнитным полем.

Заключение. Основной результат исследования заключается в том, что рабочие алгоритмы обнаружения ферромагнитных тел комплексно учитывают характеристики воздушной среды, инструментальную погрешность блоков измерений физических величин и геометрические пропорции расположения измерительной аппаратуры на борту беспилотных и пилотируемых поисково-спасательных вертолетов. Полученные результаты исследований использованы при разработке аппаратно-программного комплекса с беспилотными летательными аппаратами вертолетного типа, предназначенного для обеспечения поисково-спасательных операций в условиях Арктики.

Ключевые слова: магнитометрия; магнитометрический поиск; дистанционная магнитометрическая поисковая система; алгоритмы поиска ферромагнитных тел.

© Гуцевич Д.Е., Проскуряков Г.М., Слонов В. Н., Тетерин Д.П., Титенко Е.А., Фролов С.Н., Лисицин Л.А., 2019

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Алгоритмы функционирования магнито-метрической системы обеспечения поисково-спасательных операций с применением беспилотных летательных аппаратов / Д.Е. Гуцевич, Г.М. Проскуряков, В. Н. Слонов, Д.П. Тетерин, Е.А. Титенко, С.Н. Фролов, Л.А. Лисицин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 210-224. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-210-224>.

Поступила в редакцию 31.10.2019

Подписана в печать 18.11.2019

Опубликована 23.12.2019

Algorithms for Functioning of the Magneto-Metric System to Provide Search and Rescue Operations Using Unmanned Flying Vehicles

Denis E. Gutsevich¹, German M. Proskuryakov¹, Vladimir N. Slonov¹,
Dmitry P. Teterin², Evgeny A. Titenko³, Sergey N. Frolov³, Leonid A. Lisitzin³

¹ Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarina
77 Polytechnic str., Saratov 410054, Russian Federation

² Joint Stock Company "Aviaavtomatika"
47 Zapol'nya str., Kursk 305040, Russian Federation

³ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: johntit@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Reducing the time and increasing the efficiency of search and rescue of crews of land vehicles, air, surface and underwater craft. Combining physical, informational, and geometric parameters allows reliable detection of single ferromagnetic bodies by analyzing additional information in working algorithms.

Methods. The paper contains a practically significant variant of building a search engine that is implemented on two or more unmanned flying vehicles moving in the search area in a coordinated formation at the basic distance. The solution system is based on using magnetic field components as magnetometric information without using primary gradient information. This feature allows us to get compact and functionally complete algorithms. Calculations using such algorithms ensure the stability of an unmanned flying vehicle in various combinations of vector, roll and pitch.

Results. Algorithms for the functioning of the magnetometric system for searching ferromagnetic bodies based on the magnetostatic equations have been constructed in the article. The intelligent system is based on the scheme of a measuring and computing circuit with staggered vector three-axis blocks of magnetometers in space. The system is able to solve the whole range of problems of search, detection, direction finding, localization, positioning and identification of metal objects that have their own magnetic field.

Conclusion. The main result of the study is that the working algorithms for detecting ferromagnetic bodies take into account the characteristics of the air environment, the instrumental error of measurement units of physical quantities and the geometric proportions of measuring equipment location on board the unmanned and manned search and rescue helicopters. The obtained research results have been used in the development of a hardware and software complex with helicopter-type unmanned flying vehicles designed to support search and rescue operations in the Arctic.

Keywords: magnetometry; magnetometric search; remote magnetometric search system; search algorithms for ferromagnetic bodies.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Gutsevich D. E., Proskuryakov G. M., Slonov V. N., Teterin D. P., Titenko E. A., Frolov S. N., Lisitzin L. A. Algorithms for Functioning of the Magneto-Metric System to Provide Search and Rescue Operations Using Unmanned Flying Vehicles. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 210-224 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-210-224>.

Received 31.10.2019

Accepted 18.11.2019

Published 23.12.2019

Введение

Научно-техническая задача разработки комплексов с беспилотными летательными аппаратами (БЛА), робототехнических комплексов, предназначенных для выполнения поисково-спасательных операций, в настоящее время является актуальной, в климатически сложных погодных условиях и высокой степени неопределенности исходных данных [1]. Успешное решение задачи во многом зависит от возможностей бортовых аппаратных и программных средств по обнаружению разнородных металлических предметов на поверхности воды и почвы в условиях отсутствия прямой видимости и при неблагоприятных погодных условиях [2 – 6]. Использование известных методов и средств (ферромагнитные искатели, магнитные пеленгаторы и обнаружители, детекторы и идентификаторы магнитных аномалий и т.д.) поиска и обнаружения ферромагнитных тел (ФМТ) в магнитометрических и градиентометрических каналах измерений обычно не приводит к полным положительным результатам [6 – 11]. Поэтому целью проведенных исследований является разработка алгоритмов магнитометрической системы обеспечения поисково-спасательных операций (МСОПСО).

Алгоритмы МСОПСО предполагается реализовать с помощью программного обеспечения вычислительной части системы, устанавливаемой на беспилотных и пилотируемых поисково-спасательных вертолетах (БПСВ) [12].

Материалы и методы

Схема пространственно-информационного взаимодействия ФМТ и МСОПСО, устанавливаемой на борту БПСВ, представлена на рис. 1. При движении поисковых вертолетов БПСВ-1 и БПСВ-2 по соответствующим траекториям O_1B_1 и O_2B_2 с помощью трехосных блоков магнитометров ТБМ-1 и ТБМ-2, установленных на вертолетах, в МСОПСО формируются две совокупности компонентных магнитограмм, имеющих типовые формы сигнатур (рис. 2). В геометрии и формах магнитограмм $T_{xi}(l)$, $T_{yi}(l)$, $T_{zi}(l)$, $i = \overline{1,2}$, i – порядковый номер БПСВ, отражается полная информация о магнитных свойствах ФМТ, формирующего локальное магнитное поле диполя, его локализации, позиционировании и ориентации относительно поисковых систем координат. Здесь $T_{xi}(l)$, $T_{yi}(l)$, $T_{zi}(l)$ – зависимости проекций векторов \vec{T}_i напряженностей результирующего магнитного поля на оси связанных трехгранников

X_i, Y_i, Z_i БПСВ от удаления l . Аргумент l характеризует удаление блоков ТБМ-1 и ТБМ-2 от соответствующих точек пересечения траекторий O_1B_1 и O_2B_2 полета вертолетов с линиями траверсы – 1, 2 (AC_1 и AC_2). Причем, линии траверс перпендикулярны линиям траекторий БПСВ ($AC_1 \perp O_1B_1$) и ($AC_2 \perp O_2B_2$). Точки и оси симметрии магнитограмм соответствуют моментам прохождения вертолетами БПСВ-1 и БПСВ-2 соответствующих точек C_1 и C_2 на траверсах, характеризуемых наименьшими удалениями их от центра магнитного диполя искомого ФМТ.

С учетом этого рабочие алгоритмы должны обеспечить преобразование первичной магнитометрической информации во вторичную информацию о параметрах позиционирования, ориентации и намагниченности ФМТ.

Показания блоков магнитометров ТБМ-1 и ТБМ-2 в приборных базисах $p_i = X_i Y_i Z_i, i = \overline{1,2}$ формируются в соответствии с уравнениями Пуассона [8, 11]:

$$\bar{T}_i = [T_{x_i} \ T_{y_i} \ T_{z_i}]^T = B_i \cdot M_i \cdot [(S_i + E) \cdot A_i \cdot \bar{T}_{мпз_i} + [P_i \ Q_i \ R_i]^T], \quad (i = \overline{1,2}), \quad (1)$$

где \bar{T}_i – векторы напряженности результирующих магнитных полей, наблюдаемых с помощью ТБМ на i -ых объектах;

$$B_i = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_x^i & -\beta_x^i \\ -\alpha_y^i & 1 & \beta_y^i \\ \beta_z^i & -\alpha_z^i & 1 \end{bmatrix} - \text{матрицы}$$

геометрических погрешностей сборки трехосных блоков магнитометров, акселерометров и гироскопов на i -м объекте;

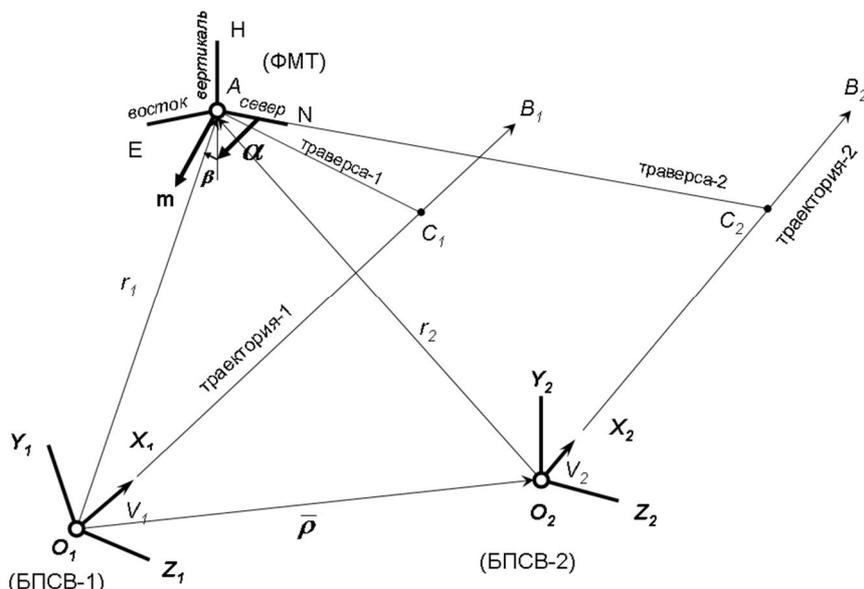


Рис. 1. Схема магнитометрического поиска ферромагнитных тел

Fig. 1. Scheme of magnetometric search for ferromagnetic objects

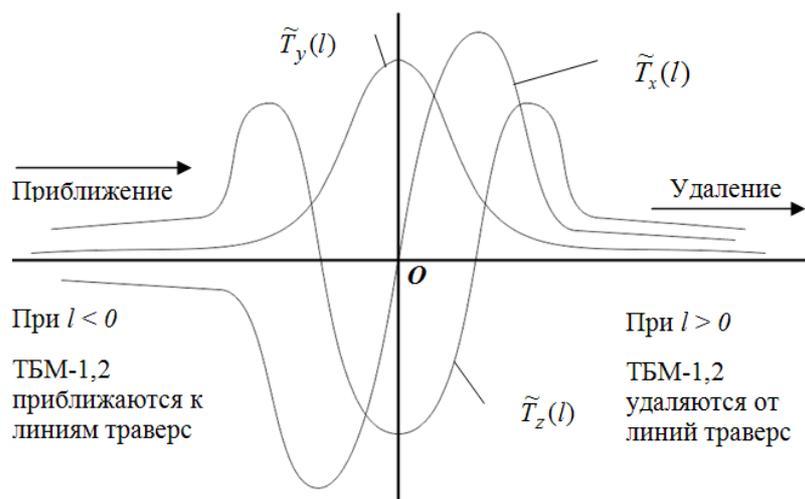


Рис. 2. Типовые графики магнитограмм для дипольного магнитного поля

Fig. 2. Typical graphs of magnetograms for a dipole magnetic field

$\alpha_{xk}^i, \alpha_{yk}^i, \alpha_{zk}^i, \beta_{xk}^i, \beta_{yk}^i, \beta_{zk}^i$ – величины геометрических погрешностей сборки трехосных блоков магнитометров ($k \leftrightarrow м$), акселерометров ($k \leftrightarrow а$) и гироскопов ($k \leftrightarrow г$) в связанных координатных осях X_i, Y_i, Z_i на i -м объекте;

$$M_i = \begin{bmatrix} 1 & \beta_i & -\alpha_i \\ -\beta_i & 1 & \sigma_i \\ \alpha_i & -\sigma_i & 1 \end{bmatrix} - \text{матрицы}$$

геометрических погрешностей монтажа модулей с трехосными блоками магнитометров, акселерометров и гироскопов на i -м объекте;

$\alpha_i, \beta_i, \sigma_i$ – значения величин геометрических погрешностей монтажа -го модуля, содержащего трехосные блоки магнитометров, акселерометров и гироскопов, на i -м объекте;

$$S_i = \begin{bmatrix} a_i & b_i & c_i \\ d_i & e_i & f_i \\ g_i & h_i & k_i \end{bmatrix} - \text{матрицы ко-}$$

эффициентов Пуассона i -го объекта для характеристики индуктивной намагниченности;

$a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i, g_i, h_i, k_i$ – коэффициенты Пуассона;

E – единичная матрица;

A_i – матрицы ориентации в пространстве i -го объекта;

$\bar{T}_{МПЗ_i} = [T_{N_i} \ T_{H_i} \ T_{E_i}]^T$ – векторы напряженностей магнитного поля Земли в точках текущего местоположения i -го объекта;

$T_{N_i}, T_{H_i}, T_{E_i}$ – компоненты этих векторов в географическом трехграннике $q = NHE$;

P_i, Q_i, R_i – значения составляющих вектора напряженности магнитного поля i -го объекта в связанных координатных осях X_i, Y_i, Z_i .

В соответствии с уравнением (1) видно, что в модель сигналообразования ТБМ-1 и ТБМ-2 входят различные параметры: технологические (B_i, M_i); объектовые (P_i, Q_i, R_i, S_i); геомагнитные ($\bar{T}_{МПЗ_i}$); эксплуатационные (A_i и навигационные параметры – $\varphi_i, \lambda_i, h_i$, со-

держающиеся в выражениях для компонент векторов $\bar{T}_{МПЗi}$ в соответствии с моделями МПЗ).

Косвенное представление о масштабах магнитного поиска ФМТ и параметрах режимов полета поисковых вертолетов дают данные табл. 1 [4, 9].

Таблица 1. Характеристики локальных магнитных аномалий промышленных источников на показания магнитометров

Table 1. The characteristics of local magnetic anomalies of industrial objects on the readings of magnetometers

Объект	Максимальная дальность влияния ЛМА (м) при пороге чувствительности магнитометров $\Delta B = 0.5 \text{ нТл}$	Предельная дальность влияния ЛМА (м) при пороге чувствительности магнитометров $\Delta B = 0.1 \text{ нТл}$	Предельная дальность влияния ЛМА (м) при пороге чувствительности магнитометров $\Delta B = 0.01 \text{ нТл}$
Судно массой 1000 т	315	540	1200
Легковой автомобиль массой 1 т	27	46	101
Легкий самолет (типа ЯК-12, ЯК-52)	22	30	66
Трубопровод диаметром 150 мм с толщиной стенки 6 мм	30	69	152
Трубопровод диаметром 1600 мм с толщиной стенки 10 мм	90	205	451

С учетом предварительно проведенных технологических (инструментальных и объектовых) калибровок становятся известными параметры матриц B_i, M_i, S_i и векторов напряженности магнитного поля объектов $[P_i \ Q_i \ R_i]^T = \bar{T}_{МПОi}, i = \overline{1, 2}$. Это позволяет в дальнейшем производить на борту поисковых вертолетов операции приведения текущих показаний ТБМ-1 и ТБМ-2 к ортонормированным приборным базисам $p_i = X_i \ Y_i \ Z_i$ с учетом измеренных углов крена γ_i и тангажа ϑ_i :

$$\tilde{\bar{T}}_i = [\tilde{T}_{xi} \ \tilde{T}_{yi} \ \tilde{T}_{zi}]^T = A_{\vartheta_i}^T \cdot A_{\gamma_i}^T \cdot (S_i + E)^{-1} (M_i^{-1} \cdot B_i^{-1} \cdot \bar{T}_i - \bar{T}_{МПОi}) \quad (2)$$

$i=1-2$

где $\tilde{\bar{T}}_i$ – векторы скорректированных показаний ТБМ i -ых объектов с учётом выполнения операций приведения к базисам $X_i \ Y_i \ Z_i$;

$\tilde{T}_{xi}, \tilde{T}_{yi}, \tilde{T}_{zi}$ – компоненты векторов $\tilde{\bar{T}}_i$ в проекциях на оси приборных базисов $p_i = X_i \ Y_i \ Z_i$;

$A_{\vartheta_i}^T, A_{\gamma_i}^T$ – транспонированные матрицы ориентации i -ых объектов по углам тангажа и крена, соответственно.

Графики магнитограмм (рис. 2) соответствуют приведенным показаниям блоков магнитометров \tilde{T}_i к осям ортонормированных базисов.

В материалах существующей литературы выполнение полных операций поиска, обнаружения, локализации, позиционирования и идентификации ФМТ строится на основе математического описания графиков магнитограмм (рис. 2), наблюдаемых на борту носителя [6, 11]. Однако в этом случае алгоритмы МСОПСО получаются громоздкими и склонными к потере устойчивости при определенных условиях. Для исключения этих недостатков в настоящей работе рабочие алгоритмы МСОПСО строятся на основе использования в качестве магнитометрической информации только показаний ТБМ-1 и ТБМ-2 по компонентам магнитного поля без использования первичной градиентометрической информации. Градиентометрическая информация в этом случае формируется на основе первичных компонентных магнитометрических измерений как результат вычислений с учетом измерений базы $\bar{\rho}$ (рис. 1). Магнитограммы (рис. 2) при этом могут быть также использованы в качестве прогнозирующих функций для вероятностного прогнозирования ФМТ.

Оценки параметров реального магнитного поля Земли (МПЗ) $\hat{T}_{МПЗ_i}$ в текущих точках местоположения поисковых вертолетов БПСВ-1 и БПСВ-2 на траекториях O_1B_1 и O_2B_2 (рис. 1) могут быть выполнены на основе вычисления

проекций $\hat{T}_{Ni}; \hat{T}_{Hi}; \hat{T}_{Ei}$ вектора $\hat{T}_{МПЗ_i}$ на оси географического трехгранника $q = NHE$ (N, E – направления на север и восток, H – вертикаль) с учетом использования приведенных показаний блоков $\tilde{T}_i, i = \overline{1, 2}$:

$$\begin{aligned} \hat{T}_{МПЗ_i} &= [\hat{T}_{Ni} \quad \hat{T}_{Hi} \quad \hat{T}_{Ei}]^T = \\ &= A_{\psi_i}^T \cdot \tilde{T}_i = A_{\psi_i}^T \cdot [\tilde{T}_{xi} \quad \tilde{T}_{yi} \quad \tilde{T}_{zi}]^T \quad (3) \\ & \quad i=1-2. \end{aligned}$$

где $A_i^T, A_{\psi_i}^T$ – транспонированные матрицы ориентации и курса i -го вертолета;

$\hat{T}_{Ni}, \hat{T}_{Hi}, \hat{T}_{Ei}$ – оценки северной, вертикальной и восточной составляющей МПЗ по показаниям i -го блока магнитометров.

Редуцированные показания блоков ТБМ-1 и ТБМ-2 могут быть вычислены по схемам перекрестного приведения к смежному трехграннику $p_i = X_i Y_i Z_i$ соседнего вертолета:

$$\begin{aligned} \langle \bar{T}_2 \rangle &= [\langle T_{x_2} \rangle \quad \langle T_{y_2} \rangle \quad \langle T_{z_2} \rangle]^T = \\ & A_{\psi_1} \cdot \hat{T}_{МПЗ_2}, \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \langle \bar{T}_1 \rangle &= [\langle T_{x_1} \rangle \quad \langle T_{y_1} \rangle \quad \langle T_{z_1} \rangle]^T = \\ & A_{\psi_2} \cdot \hat{T}_{МПЗ_1}, \quad (5) \end{aligned}$$

где $\langle \bar{T}_1 \rangle, \langle \bar{T}_2 \rangle$ – векторы редуцированных показаний блоков ТБМ-1 и ТБМ-2;

$\langle T_{x_1} \rangle, \langle T_{y_1} \rangle, \langle T_{z_1} \rangle, \langle T_{x_2} \rangle, \langle T_{y_2} \rangle, \langle T_{z_2} \rangle$ – проекции векторов $\langle \bar{T}_1 \rangle$ и $\langle \bar{T}_2 \rangle$ на оси смежных приборных трехгранников $p_i = X_i Y_i Z_i$;

A_{ψ_1}, A_{ψ_2} – ориентации i -го объекта по курсу ψ_i .

По показаниям спутниковых навигационных систем СНС-1 и СНС-2, установленных на БПСВ-1 и БПСВ-2,

соответственно, можно вычислить радиус-вектор $\bar{\rho}$ (дистанцию) положения поисковых вертолетов относительно друг друга (рис. 1).

В качестве условий обнаружения ФМТ по его дипольному магнитному полю с помощью системы разнесенных в пространстве ТБМ-1 и ТБМ-2 могут быть приняты следующие неравенства:

$$\Delta\hat{T}_{ij} = \left| \tilde{T}_i - A_{\psi_j} \cdot \bar{T}_{МПЗj}^H \right| = \left| \begin{bmatrix} \tilde{T}_{xi} & \tilde{T}_{yi} & \tilde{T}_{zi} \end{bmatrix}^T - A_{\psi_j} \cdot \begin{bmatrix} T_{Nj}^H & T_{Hj}^H & T_{Ej}^H \end{bmatrix}^T \right| = \left| \begin{bmatrix} \Delta\hat{T}_{xij} & \Delta\hat{T}_{yij} & \Delta\hat{T}_{zij} \end{bmatrix}^T \right| > 0, \quad (6)$$

$$\Delta\hat{T}_{ij} = \left| \tilde{T}_i - \langle \bar{T}_j \rangle \right| = \left| \begin{bmatrix} \Delta\hat{T}_{xij} & \Delta\hat{T}_{yij} & \Delta\hat{T}_{zij} \end{bmatrix}^T \right| > 0, \quad (7)$$

$i=1-2, j=1-2.$

Вектор нормального магнитного поля Земли (МПЗ) и его компоненты:

$$\bar{T}_{МПЗ}^H = [T_N^H \ T_E^H \ T_H^H]^T \quad (8)$$

вычисляются по модели IGRF (например, WMM, EMM, HDGM).

Проекция радиуса-вектора $\bar{\rho}$ на оси географического трехгранника $q = NHE$ равны (R – радиус Земли):

$$\left. \begin{aligned} \rho_N &= \Delta\varphi \cdot R = (\varphi_1 - \varphi_2) \cdot R, \\ \rho_H &= \Delta h = h_1 - h_2, \\ \rho_E &= \Delta\lambda \cdot R \cdot \cos\varphi_i = (\lambda_1 - \lambda_2) \cdot R \cdot \cos\varphi_i, \end{aligned} \right\} (9)$$

где $\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h$ – разности широт, долгот и высот для точек местоположения вертолетов, $i=1-2, j=1-2.$

Модуль дистанции между вертолетами представляется выражением:

$$\rho = (\rho_N^2 + \rho_E^2 + \rho_H^2)^{1/2}. \quad (10)$$

Проекция радиуса-вектора $\bar{\rho} = [\rho_N \ \rho_E \ \rho_H]^T$ относительного положения поисковых вертолетов на оси приборных трехгранников $p_i = X_i \ Y_i \ Z_i$ равны:

$$[\rho_{xi} \ \rho_{yi} \ \rho_{zi}]^T = A_{\psi} \cdot [\rho_N \ \rho_E \ \rho_H]^T. \quad (11)$$

С учетом выражения (11) тензор градиентов 1-го порядка, заданный в приборном базисе i -го поискового вертолёта, определяется как квадратная матрица $[G_i]$ (3×3) [8, 9, 11]:

$$[G_i] = \left[\frac{\partial \Delta\bar{T}_{kj}}{\partial \rho_i} \right] = \left[\frac{\partial \Delta\bar{T}_{kj}}{\partial \rho_{xi}} \quad \frac{\partial \Delta\bar{T}_{kj}}{\partial \rho_{yi}} \quad \frac{\partial \Delta\bar{T}_{kj}}{\partial \rho_{zi}} \right]^T \quad \begin{matrix} (i = 1,2) \\ (j; k = \overline{1,3}) \end{matrix} \quad (12)$$

$i=1-2, j,k=1-3$

Причём:

$$[G_i] = \begin{bmatrix} \nabla T_{xx}^i & \nabla T_{xy}^i & \nabla T_{xz}^i \\ \nabla T_{yx}^i & \nabla T_{yy}^i & \nabla T_{yz}^i \\ \nabla T_{zx}^i & \nabla T_{zy}^i & \nabla T_{zz}^i \end{bmatrix} \quad (13)$$

Компонентные градиенты (элементы тензоров $[G_i]$) вычисляются по формулам частных производных [13, 14]: с учетом известных проекций вектора дистанции $\bar{\rho}_i = [\rho_{xi} \ \rho_{yi} \ \rho_{zi}]^T$:

$$\left. \begin{aligned} \nabla T_{xx}^i &= \frac{\Delta T_{xij}}{\rho_{xi}}, \nabla T_{xy}^i = \frac{\Delta T_{xij}}{\rho_{yi}}, \nabla T_{xz}^i = \frac{\Delta T_{xij}}{\rho_{zi}}, \\ \nabla T_{yx}^i &= \frac{\Delta T_{yij}}{\rho_{xi}}, \nabla T_{yy}^i = \frac{\Delta T_{yij}}{\rho_{yi}}, \nabla T_{yz}^i = \frac{\Delta T_{yij}}{\rho_{zi}}, \\ \nabla T_{zx}^i &= \frac{\Delta T_{zij}}{\rho_{xi}}, \nabla T_{zy}^i = \frac{\Delta T_{zij}}{\rho_{yi}}, \nabla T_{zz}^i = \frac{\Delta T_{zij}}{\rho_{zi}}. \end{aligned} \right\} (14)$$

$i=1-2, j=1-2.$

С учетом оценок разностных векторов $\Delta\hat{T}_{ij}; \Delta\bar{T}_{ij}$ по формулам (6) – (8) и градиентов 1-го порядка по формулам (9) – (14) для каждого блока ТБМ можно составить векторно-матричные уравнения [7 – 9, 11]:

$$[G_i] \cdot \bar{r}_i = -3\Delta\hat{T}_{ij} \quad (15)$$

$$\Delta\hat{T}_{ij} = [\Delta\hat{T}_{xij} \ \Delta\hat{T}_{yij} \ \Delta\hat{T}_{zij}]^T = \frac{\mu\mu_0}{4\pi r_i^5} [R_i] [m_{xi} \ m_{yi} \ m_{zi}]^T \quad (16)$$

$$[R_i] = \begin{bmatrix} 3x_i^2 - r_i^2 & 3x_i y_i & 3x_i z_i \\ 3y_i x_i & 3y_i^2 - r_i^2 & 3y_i z_i \\ 3z_i x_i & 3z_i y_i & 3z_i^2 - r_i^2 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

где $[R_i]$ – геометрическая матрица (3×3) $i=1-2, j=2-1$;

\bar{r}_i – радиус-вектор, характеризующий положение искомого ФМТ относительно i -ого поискового вертолета ($i = 1,2$), (рис. 1), $\bar{r}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$;

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^2 \frac{\text{НТл} \cdot \text{м}}{\text{А}}$;

μ – относительная магнитная проницаемость среды (для воздуха и воды $\mu \approx 1$);

$m_{xi}; m_{yi}; m_{zi}$ – проекции вектора магнитного момента \bar{m} ФМТ (диполя) на оси i -го приборного трехгранника $p_i = X_i Y_i Z_i$ (рис. 1).

Из уравнения (15) находим радиус-вектор положения обнаруженного ФМТ относительно i -ого поискового вертолета [8, 9, 11]:

$$\bar{r}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T = -3[G_i]^{-1} \cdot \Delta\hat{T}_{ij} \quad (18)$$

$i=1-2, j=1-2$.

Решения (18) существуют, если выполняются условия не вырожденности тензора градиентов 1-го порядка:

$$\det[G_i] \neq 0 \quad (19)$$

$i=1-2$.

Условия (19) нарушаются, когда скалярное произведение:

$$\bar{m} \cdot \bar{\rho}_i = 0, \text{ или } \bar{m} \perp \bar{\rho}_i \quad (20)$$

$i=1-2$.

Условие ортогональности векторов (19) выполняется всегда полностью или частично хотя бы для одного поискового вертолета даже в том случае, если выполняется условие ортогональности (20) для другого вертолета (рис. 1).

Пеленг χ_i обнаруженного и локализованного ФМТ, наблюдаемого с борта i -го вертолета, можно определить из геометрических соображений (рис. 1):

$$\left. \begin{aligned} \sin\chi_i &= \left(\frac{y_i^2}{x_i^2 + y_i^2} \right)^{\frac{1}{2}} \\ \cos\chi_i &= \left(\frac{x_i^2}{x_i^2 + y_i^2} \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$i=1-2$.

Путем обращения уравнения (16) получим алгоритм идентификации ФМТ в поисковом приборном базисе $p_i = X_i Y_i Z_i$:

$$\begin{aligned} \bar{m}_{pi} &= [m_{xi} \ m_{yi} \ m_{zi}]^T = \\ &= \frac{4\pi r_i^5}{\mu\mu_0} \cdot [R_i]^{-1} \cdot \Delta\hat{T}_{ij}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\det[R_i] \neq 0 \quad (23)$$

$i=1-2$.

В географическом базисе $q = NHE$ вектор магнитного момента идентифицируемого ФМТ, наблюдаемого с борта i -го носителя, равен (рис. 1):

$$\begin{aligned} \bar{m}_{qi} &= [m_{Ni} \ m_{Hi} \ m_{Ei}]^T = \\ &= A_{\psi_i}^T \cdot [m_{xi} \ m_{yi} \ m_{zi}]^T \end{aligned} \quad (24)$$

$i=1-2$.

Модуль магнитного момента идентифицируемого ФМТ равен:

$$m_i = \left(m_{x_i}^2 + m_{y_i}^2 + m_{z_i}^2\right)^{\frac{1}{2}} = \left(m_{N_i}^2 + m_{H_i}^2 + m_{E_i}^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

$i=1-2.$

Дальность r_0 обнаружения ФМТ с магнитным моментом диполя m для дифференциального магнитометрического обнаружителя-идентификатора типа МСОПСО с порогом чувствительности δT (нТл) и базой измерения ρ можно оценить по формуле [7]

$$r_0 \approx \left(\frac{300 \cdot m \cdot \rho}{\delta T}\right)^{\frac{1}{4}}. \quad (26)$$

Из формулы (26) видно, что чувствительность разработанных рабочих алгоритмов к обнаружению одиночных магнитных диполей определяется не только инструментальным порогом чувствительности (δT) блоков ТБМ, но и базой ρ между этими блоками (рис. 1).

При этом:

$$\begin{aligned} \bar{m}_q &= [m_N \ m_H \ m_E]^T = \\ &= A_\alpha \cdot A_\beta \cdot [m \ 0 \ 0]^T, \end{aligned} \quad (27)$$

где A_α, A_β – матрицы углов ориентации вектора \bar{m} ФМТ в горизонтальной и вертикальной плоскостях географического трехгранника $q = NHE$ (рис. 1).

На основе уравнения (27) из геометрических соображений находим углы азимута α и наклона β вектора \bar{m} ФМТ (рис. 1):

$$\begin{aligned} \sin \alpha &= \frac{m_E}{m \cdot \cos \beta}; \quad \cos \alpha = \frac{m_N}{m \cdot \cos \beta} \\ \sin \beta &= \frac{m_H}{m}; \quad \cos \beta = \left(\frac{m_N^2 + m_E^2}{m^2}\right)^{1/2}. \end{aligned} \quad (28)$$

Результаты и их обсуждение

Выражения (2) – (28) совместно определяют содержание алгоритмов обнаружения, локализации, позиционирования, пеленгации, идентификации и ориентации намагниченного ФМТ (табл. 2).

Таблица 2. Назначение и особенности алгоритмов обработки измерений ферромагнитных тел

Table 2. Purpose and features of processing algorithms for measuring ferromagnetic objects

№	Название алгоритма	Формулы, соотношения	Примечания
1	Алгоритмы обнаружения	(2) - (8)	Ограничения по порогам чувствительности ТБМ
2	Алгоритм локализации и позиционирования	(6) - (14) (17) - (20)	Проверка $\det[G_i] \neq 0$
3	Алгоритм пеленгации	(21)	Нормировка $\sin^2 \chi_i + \cos^2 \chi_i \equiv 1$
4	Алгоритм идентификации	(22) - (27)	Проверка $\det[R_i] \neq 0$
5	Алгоритм ориентации	(28)	Нормировка $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \equiv 1$ $\sin^2 \beta + \cos^2 \beta \equiv 1$

Выбор дистанции ρ между поисковыми вертолетами БПСВ-1 и БПСВ-2, задание высоты h и скоростей $v_i = v (i = 1, 2)$ их полета определяется косвенно по параметрам магнитного поля искомого ФМТ техногенного происхождения (табл. 1, рис. 1, 2, формула (26)). Особенность подхода к решению задачи дистанционного магнитометрического поиска и обнаружения ФМТ, предложенного в настоящей статье, заключается в том, что хотя в разработанных алгоритмах используются величины градиентов компонент магнитного поля, тем не менее, они определяются не путем градиентных измерений, а путем вычислений по измеренным компонентам на выбранной базе ρ .

Рабочие алгоритмы, сформированные в настоящей работе, характеризуются согласованностью комплексной обработки информационных и физических показателей (магнитные показатели), что позволяет автоматизировать на борту БПЛА процессы идентификации сигналов. Набор алгоритмов определяет облик МСОПСО и их элементов а также систематизирует требования к летательным аппаратам различного исполнения и назначения [10 – 16] в части разработ-

ки способов эксплуатации, идентификации данных.

Выводы

Алгоритмы поиска, обнаружения и идентификации ферромагнитных тел, разработанные в настоящей работе, используются для разработки ПО магнито-обнаружительно-поисковой системы с целью ее установки и использования на автономно-управляемых беспилотных летательных, плавающих и других аппаратах. Основным результатом исследования заключается в том, что рабочие алгоритмы обнаружения ферромагнитных тел учитывают в комплексе характеристики воздушной среды, инструментальную погрешность блоков измерений физических величин и геометрические пропорции расположения измерительной аппаратуры на борту беспилотных и пилотируемых поисково-спасательных вертолетов. Комплексный учет физических, информационных и геометрических параметров модели позволяет повысить эффективность процессов поиска за счет учета дополнительной информации в рабочих алгоритмах.

Список литературы

1. Модель и методы управления сложными техническим объектами на основе продукционной парадигмы вычислений / О.И. Атакищев, Е.А. Титенко, К.С. Скорняков, В.А. Заичко, А.П. Риос // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2012. №3. С. 181-187.
2. Богоева Е. М., Гарькушев А. Ю. Основы построения моделей интеллектуализации в системах безопасности // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2014. № 9-10. С. 22-27.
3. Анисимов В. Г., Ведерников Ю. В. Научно-методическое сопровождение интеграции высокотехнологичных инноваций в процессы разработки высокоточного ору-

жия // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2014. №3-4. С. 66-75.

4. Анисимов В. Г., Гарькушев А. Ю., Сазыкин А. М. Оптимизация внедрения новых технологий в перспективные образцы артиллерийского вооружения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2012. № 4. С. 39-44.

5. Бажин Д. А., Гарькушев А. Ю. Модель оценки эффективности информационного обеспечения применения высокоточного оружия в контртеррористических операциях // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2015. № 1-2. С. 44-53.

6. Крюков И. Н. Магнитометрические средства обнаружения: теория и практика построения / под ред. И. Н. Крюкова. М.: Радиотехника, 2013. 192 с.

7. Бондарев А. С., Челкак С. И. Определение источника дипольного типа по измерениям напряженности магнитного поля // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 1990. Т. 33. № 2. С. 33–38.

8. Ginzburg B., Sheinker A., Frumkis L. Investigation of advanced data processing technique in magnetic anomaly detection systems // Ist International conference of Sinsing Technology, November 21–23 2005. Palmerston North, New Zealand. 2005. P. 561– 566.

9. Семевский Р. Б., Аверкиев В. В., Яроцкий В. А. Специальная магнитометрия. СПб.: Наука, 2002. 228 с.

10. Ковадлин М. Ш., Сергушов И. В. Пилотажные комплексы и навигационные системы вертолетов. М.: Инновационное машиностроение, 2017. 368 с.

11. Быстров Л. Г., Дрогайцев В. С. Методы идентификации динамических характеристик стационарных элементов бортовых систем управления // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. Т. 4. № 1. С. 63–71.

12. Дрогайцев В. С., Писарев В. Н. Технология процесса комплексирования автоматизированных средств испытания бортовых систем летательных аппаратов // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2004. № 3. С. 53–76.

13. Батраева И. А., Тетерин Д. П. Алгоритм планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата при выполнении поисково-спасательных операций // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 6. С. 210–214.

14. Атакищев О. И., Батраева И. А. Матричный метод планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата переменной массы // Известия Института инженерной физики. 2018. № 4. С. 93–98.

15. Лоторев П.В., Курочкин А.Г., Гривачев А.В., Емельянов С.Г. Организация системы поддержки принятия решений для управления группой роботов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. № 3. С. 30-36.

16. Тетерин Д. П. Синтез требований к бортовому информационно-измерительному и моделирующему комплексу // Информационно-управляющие системы. 2009. № 1. С. 10-14.

References

1. Atakishchev O.I., Titenko E.A., Skornyakov K.S., Zaichko V.A., Rios A.P. Model' i metody upravleniya slozhnymi tekhnicheskimi ob'ektami na osnove produktsionnoi paradigmy vychislenii [A Model and control methods for a complex technical objects based on the production computing]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the South Federal University. Technical Science*, 2012, no.3, pp. 181-187 (In Russ.).
2. Bogoeva E. M., Garkushev A. Yu. Osnovy postroeniya modeli intellektualizatsii v sistemakh bezopasnosti [The basis of a building models of the intellectualization in security systems.]. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu = Issues of Defense Technology. Series 16: Counter Terrorism Techniques*, 2014, no. 9-10, pp. 22-27 (In Russ.).
3. Anisimov V.G., Vedernikov Yu.V. Nauchno-metodicheskoe soprovozhdenie integratsii vysokotekhnologichnykh innovatsii v protsessy razrabotki vysokotochnogo oruzhiya [A scientific and methodological support for the integration of high-tech innovations in the development of a high-precision weapons.]. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu = Issues of Defense Technology. Series 16: Counter Terrorism Techniques*, 2014, no. 3-4, pp. 66-75 (In Russ.).
4. Anisimov V. G., Garkushev A. Yu., Sazykin A. M. Optimizatsiya vnedreniya novykh tekhnologii v perspektivnye obraztsy artilleriiskogo vooruzheniya [An optimization of the new technologies in promising models of artillery weapons]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk = News of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences*, 2012, no. 4, pp. 39-44 (In Russ.).
5. Bazhin D. A., Garkushev A. Yu. Model' otsenki effektivnosti informatsionnogo obespecheniya primeneniya vysokotochnogo oruzhiya v kontrterroristicheskikh operatsiyakh [A Model for evaluating of the efficiency of information complex for the use of precision weapons in counter-terrorist operations.]. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu = Issues of Defense Technology. Series 16: Counter Terrorism Techniques*, 2015, no. 1-2, pp. 44-53 (In Russ.).
6. Kryukov I. N. *Magnitometricheskie sredstva obnaruzheniya: teoriya i praktika postroeniya* [Magnetometric means of a detection: theory and practice of a construction]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2013, 192 p. (In Russ.).
7. Bondarev A.S., Chelkak S.I. Opredelenie istochnika dipol'nogo tipa po izmereniyam napryazhennosti magnitnogo polya [Determination of a dipole type source from a measurements of magnetic field strength]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie. = News of the Higher Education. Instrumentation*, 1990, vol. 33, no. 2, pp. 33-38 (In Russ.).

8. Ginzburg B., Sheinker A., Frumkis L. Investigation of advanced data processing technique in magnetic anomaly detection systems. *Ist International conference of Sinsing Technology*, November 21–23 Palmerston North, New Zealand, 2005, pp. 561– 566.

9. Semevsky R. B., Averkiev V. V., Yarotsky V. A. *Spetsial'naya magnitometriya* [Special magnetometry]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2002, 228 p. (In Russ.).

10. Kovadlin M. Sh., Sergushov I.V. *Pilotazhnye komplekсы i navigatsionnye sistemy vertoletov* [Flight complexes and navigation systems of helicopters]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2017, 368 p. (In Russ.).

11. Bystrov L. G., Drogaytsev V. S. Metody identifikatsii dinamicheskikh kharakteristik statsionarnykh elementov bortovykh sistem upravleniya [Methods for the identification of dynamic characteristics of stationary elements of the onboard control systems]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of the Saratov State Technical University*, 2009, vol.4, no.1, pp. 63–71 (In Russ.).

12. Drogaytsev V.S., Pisarev V.N. Tekhnologiya protsessa kompleksirovaniya avtomatizirovannykh sredstv ispytaniya bortovykh sistem letatel'nykh apparatov [Technology of the integrating of the automated testing means for a onboard aircraft systems]. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve = Information Technologies in Design and Industry*, 2004, no. 3, pp. 53–76 (In Russ.).

13. Batraeva I.A., Teterin D.P. Algoritm planirovaniya traektorii dvizheniya bespilotnogo letatel'nogo apparata pri vypolnenii poiskovo-spasatel'nykh operatsii [An algorithm for planning of a trajectory of an unmanned aircraft vehicle for search and rescue operations]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2018, vol. 20, no. 6, pp. 210-214 (In Russ.).

14. Atakishchev O. I., Batraeva I. A. Matrichnyi metod planirovaniya traektorii dvizheniya bespilotnogo letatel'nogo apparata peremennoi massy [The matrix method of the trajectory planning for an unmanned aerial vehicle with a variable weight]. *Izvestiya Instituta inzhenernoi fiziki = News of the Institute of Engineering Physics*, 2018, no. 4, pp. 93–98 (In Russ.).

15. Lotorev P.V., Kurochkin A.G., Grivachev A.V., Emelyanov S.G. Organizatsiya sistemy podderzhki prinyatiya reshenii dlya upravleniya gruppoi robotov [A decision support system for the control of a robot group]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing engineering, Information science. Medical instruments engineering*, 2015, no. 3, pp. 30-36.

16. Teterin D.P. Sintez trebovaniy k bortovomu informatsionno-izmeritel'nomu i modeliruyushchemu kompleksu [Synthesis of requirements for an on-board information-measuring and modeling complex]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information-control Systems*, 2009, no. 1, pp. 10-14 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Гуцевич Денис Евгеньевич, аспирант, младший научный сотрудник кафедры «Лаборатория систем и технических средств автоматизи́ки», Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, Российская Федерация, e-mail: den2538i@yandex.ru

Проскуряков Герман Михайлович, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории технических средств и систем автоматизи́ки, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, Российская Федерация, e-mail: proskur.g.m@yandex.ru

Слонов Владимир Николаевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории технических средств и систем автоматизи́ки, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, Российская Федерация, e-mail: vnslonov@yandex.ru

Тетерин Дмитрий Павлович, доктор технических наук, первый заместитель генерального директора АО «Авиаавтоматика» им. В.В. Тарасова», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tdp@aviaavtomatika.ru

Титенко Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: johntit@mail.ru

Фролов Сергей Николаевич, кандидат технических наук, старший сотрудник научно-исследовательского института радиоэлектронных систем, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: snfrolov@bk.ru

Лисицин Леонид Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: leo_263@mail.ru

Denis E. Gutsevich, Post-Graduate Student, Junior Researcher, Laboratory of Systems and Engineering Automation Laboratory, Saratov State Technical University named after Yu. A. Gagarina, Saratov, Russian Federation, e-mail: den2538i@yandex.ru

German M. Proskuryakov, Cand. of Sci. (Engineering), Researcher, Laboratory of Systems and Engineering Automation Laboratory, Saratov State Technical University named after Yu. A. Gagarina, Saratov, Russian Federation, e-mail: proskur.g.m@yandex.ru

Vladimir N. Slonov, Cand. of Sci. (Engineering), Researcher, Laboratory of Systems and Engineering Automation Laboratory, Saratov State Technical University named after Yu. A. Gagarina, Saratov, Russian Federation, e-mail: vnslonov@yandex.ru

Dmitry P. Teterin, Dr. of Sci. (Engineering), First Deputy General Director of JSC «Aviaavtomatika named after V. V. Tarasova», Kursk, Russian Federation, e-mail: tdp@aviaavtomatika.ru

Evgeny A. Titenko, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, IT Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: johntit@mail.ru

Sergey N. Frolov, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher of the Research Institute of Radio Electronic Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: snfrolov@bk.ru

Leonid A. Lisitzin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, IT Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: leo_263@mail.ru