

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES

*Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-28889 от 12.07.2007*

*Федеральная служба по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций*

Научно-технический и прикладной журнал

Издается с 1995 года, до середины 2007 года под названием «Известия ТРТУ»

Подписной индекс 41970

№ 1 (218). 2021 г.

Тематический выпуск

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ И ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Редакционный совет

Каляев И.А. (гл. редактор); Курейчик В.В. (зам. гл. редактора); Курейчик В.М. (зам. гл. редактора); Бородянский И.М. (ученый секретарь); Абрамов С.М.; Агеев О.А.; Бабенко Л.К.; Веселов Г.Е.; Гонкальвес Ж.; Колесников А.А.; Коноплев Б.Г.; Левин И.И.; Макаревич О.Б.; Маркович И.И.; Микрин Е.А.; Никитов С.А.; Обуховец В.А.; Осипов Г.С.; Панатов Г.С.; Панич А.Е.; Петров В.В.; Петровский А.Б.; Пшихопов В.Х.; Редько В.Г.; Румянцев К.Е.; Саламах М.; Солдатов А.В.; Стемпковский А.Л.; Сухинов А.И.; Сысоев В.В.; Тарасов С.П.; Фрадков А.Л.; Хашемипур М.; Чаплыгин Ю.А.; Чередниченко Д.И.; Четверушкин Б.Н.; Чичков Б.Н.

Учредитель Южный федеральный университет.

Издатель Южный федеральный университет.

Ответственный за выпуск Косенко Е.Ю.

Технический редактор Ярошевич Н.В.

Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Дата выхода в свет 29.06.2021. Формат $70 \times 108 \frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 24,7. Уч.-изд. л. – 19,7.

Заказ № 8070. Тираж 250 экз.

Адрес издателя: 344091, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1. Тел. 8(863)2478051.

Адрес типографии: Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ. 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел (863) 247-80-51.

Адрес редакции: 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 22, ЮФУ, тел. +7 (928) 909-57-82, e-mail: iborodyanskiy@sfedu.ru, <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.

16+

Цена свободная

ISSN 1999-9429 (Print)

ISSN 2311-3103 (Online)

© Южный федеральный университет, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

А.В. Вазаев, К.Ю. Машков, В.П. Носков, И.В. Рубцов КЛАССИФИКАЦИЯ ЗОНЫ МАНЕВРИРОВАНИЯ РТК НА ОСНОВЕ ТАКТИЛЬНОЙ И ЗРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ.....	6
Г.П. Виноградов, А.С. Емцев, И.С. Федотов БЕСПРОВОДНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СЕТИ В ЗАЩИЩАЕМЫХ ЗОНАХ.....	19
А.М. Маевский, Р.О. Морозов, В.А. Рыжов, А.Е. Горелый РАЗРАБОТКА МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ АНПА В НЕИЗВЕСТНОЙ СРЕДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ.....	30
А.И. Наговицин, Б.Б. Молоткова ОПЕРАТИВНО-ТАКТИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ НАЗЕМНЫХ РТК ВН СРЕДСТВАМ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПОРАЖЕНИЯ (ПОДАВЛЕНИЯ) ПРОТИВНИКА.....	47
Н.А. Соколов, А.В. Рычков ПОВЫШЕНИЕ ПОИСКОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ	59
В.Д. Сытенский, И.И. Маркович, Е.Е. Завтур ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПАССИВНЫХ РЛС АМПЛИТУДНЫМ МЕТОДОМ.....	72
В.Ф. Филаретов, Д.А. Юхимец, А.В. Зуев, А.С. Губанков, Д.Д. Минаев ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И НАВИГАЦИИ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....	81
В.С. Быкова, А.И. Машошин, И.В. Пашкевич АЛГОРИТМ МАНЕВРИРОВАНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПРИ ПРОВОДКЕ СУДНА ЧЕРЕЗ ЗАМИНИРОВАННЫЙ РАЙОН	93
В.В. Косьянчук, В.В. Гласов, Е.Ю. Зыбин, Л. Тань ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ПОЛНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ.....	101
М.И. Мокрова ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЛОЖНЫХ УСЛОВИЙ ПОЖАРНОЙ ОБСТАНОВКИ НА КАЧЕСТВО НАБЛЮДЕНИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЁТА БЛА	112
И.О. Шальнев ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУППЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВИРТУАЛЬНОЙ МАШИНЫ.....	125

РАЗДЕЛ II. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

О.В. Кофнов, С.А. Потрясаев, Б.В. Соколов, П.М. Трефилов СПЕЦИАЛЬНОЕ МОДЕЛЬНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОВЫМ ПОВЕДЕНИЕМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ	138
А.А. Петунии, Е.Г. Полищук, С.С. Уколов НОВЫЙ АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ КРАТЧАЙШЕГО ПУТИ ОБХОДА КОНЕЧНОГО МНОЖЕСТВА НЕПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ КОНТУРОВ НА ПЛОСКОСТИ	149
А.В. Логунов, А.Л. Береснев ВОЗМОЖНОСТИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ДИАГНОСТИКИ ПОДВЕСКИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ	165

РАЗДЕЛ III. СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ, ПРИВОДНАЯ И ДАТЧИКОВАЯ АППАРАТУРА

- В.А. Костюков, М.Ю. Медведев, В.Х. Пшихопов, Е.Ю. Косенко**
ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМОЙ ПОДЗАРЯДКИ ГРУППЫ БЛА..... 175
- Н.К. Киселев, Л.А. Мартынова, И.В. Пашкевич**
ОРГАНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ
ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО
ПОДВОДНОГО АППАРАТА 189

РАЗДЕЛ IV. СВЯЗЬ, НАВИГАЦИЯ И НАВЕДЕНИЕ

- В.А. Костюков, Е.Ю. Косенко, М.В. Мамченко, М.Ю. Медведев,
В.Х. Пшихопов**
МЕТОД ОЦЕНКИ КООРДИНАТ БЛА ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЛОКАЛЬНЫМ
РАССТОЯНИЯМ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ ГРУППЫ..... 204
- Ю.Н. Кочеров, Д.В. Самойленко**
РАЗРАБОТКА НАДЕЖНОГО МЕТОДА СВЯЗИ РТК НА БАЗЕ ГРУППОВОГО
МЕТОДА РАЗДЕЛЕНИЯ ДАННЫХ, ОСНОВАННОГО НА СИСТЕМЕ
ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ..... 218
- С.М. Соколов, Н.Д. Беклемишев, А.А. Богуславский**
ОРГАНИЗАЦИЯ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОДВИЖНЫХ
СРЕДСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗРИТЕЛЬНЫХ ОРИЕНТИРОВ 235
- В.А. Бондаренко, П.А. Гессен, В.А. Павлова, М.В. Созинова,
В.А. Тупиков**
АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ
СИСТЕМ С ОБУЧЕНИЕМ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ..... 247

РАЗДЕЛ V. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ

- Н.А. Бочаров, А.Г. Зуев, О.А. Славин**
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ МИКРОПРОЦЕССОРА ЭЛЬБРУС-8СВ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ
ОГРАНИЧЕНИЙ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ 259
- А.М. Федулин, Д.М. Дрягин**
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КРУПНОРАЗМЕРНЫХ БПЛА
ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ КОМПЛЕКСНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ
ТЕРРИТОРИЙ 271

CONTENT

SECTION I. PROSPECTS FOR THE USE OF ROBOTIC SYSTEMS

A.V. Vazaev, K.Yu. Mashkov, V.P. Noskov, I.V. Rubtsov CONTACT AND VISUAL BASED ENVIRONMENT CLASSIFICATION FOR MOBILE ROBOTS	9
G.P. Vinogradov, A.S. Emtsev, I.S. Fedotov WIRELESS SENSOR NETWORKS IN PROTECTED AREAS	19
A.M. Maevskiy, R.O. Morozov, V.A. Ryzhov, A.E. Gorelyi DEVELOPMENT OF A HYBRID METHOD FOR PLANNING THE MOVEMENT OF A GROUP OF MARINE ROBOTIC COMPLEXES IN AN A PRIORI UNKNOWN ENVIRONMENT WITH OBSTACLES.....	31
A.I. Nagovitsin, B.B. Molotkova OPERATIONAL AND TACTICAL REQUIREMENTS FOR THE SYSTEM OF COUNTERING GROUND-BASED RTK VN MEANS OF ELECTRONIC DESTRUCTION (SUPPRESSION) OF THE ENEMY	48
N.A. Sokolov, A.V. Rychkov INCREASING THE SEARCH CAPABILITIES OF AUTONOMOUS UNINHABITED UNDERWATER VEHICLES THROUGH THE USE OF MULTI-CHANNEL MAGNETOMETRIC SYSTEMS	60
V.D. Sytenky, I.I. Markovich, E.E. Zavtur DETERMINATION OF THE COORDINATES OF RADIATION SOURCES IN PASSIVE RADARS BY THE AMPLITUDE METHOD	73
V.F. Filaretov, D.A. Yukhimets, A.V. Zuev, A.S. Gubankov, D.D. Minaev DIGITAL PLATFORM FOR THE CREATION OF DISTRIBUTED CONTROL AND NAVIGATION SYSTEMS FOR UNDERWATER VEHICLES.....	82
V.S. Bykova, A.I. Mashoshin, I.V. Pashkevich ALGORITHM FOR MANEUVERING AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE WHEN NAVIGATING A SHIP THROUGH A MINED AREA	94
V.V. Kosyanchuk, V.V. Glasov, E.Yu. Zybin, L. Tan AIRCRAFT FLIGHT PATH PREDICTION UNDER COMPLETE PARAMETRIC UNCERTAINTY	102
M.I. Mokrova INVESTIGATION OF THE IMPACT OF COMPLEX FIRE CONDITIONS ON THE QUALITY OF SURVEILLANCE AND FLIGHT SAFETY OF UAVS	113
I.O. Shalnev COMMUNICATION AND DATA TRANSFER IN DISTRIBUTED ROBOTICS SYSTEMS.....	125

SECTION II. CONTROL AND SIMULATION SYSTEMS

O.V. Kofnov, S.A. Potriasaev, B.V. Sokolov, P.M. Trefilov SPECIAL MODELS, ALGORITHMS AND SOFTWARE FOR PROACTIVE GROUP BEHAVIOR CONTROL OF ROBOTS	138
A.A. Petunin, E.G. Polishchuk, S.S. Ukolov A NEW ALGORITHM FOR CONSTRUCTING THE SHORTEST TOUR OF A FINITE SET OF DISJOINT CONTOURS ON A PLANE	150
A.V. Logunov, A.L. Beresnev CAPABILITIES OF VIBROACOUSTIC EXAMINATION AND DIAGNOSTICS OF VEHICLE SUSPENSION.....	166

SECTION III. POWER ENGINEERING SYSTEMS, DRIVE AND SENSOR EQUIPMENT

V.A. Kostjukov, M.Yu. Medvedev, V.Kh. Pshikhopov, E.Yu. Kosenko THE METHOD OF ESTIMATION POSITIONS OF THE UAVS BY MEASURING THE DISTANCES BETWEEN ELEMENTS OF THE GROUP	176
N.K. Kiselev, L.A. Martynova, I.V. Pashkevich ORGANIZATION OF THE ELECTRIC NETWORK OF THE HYBRID POWER SUPPLY SYSTEM OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE	190

SECTION IV. COMMUNICATION, NAVIGATION, AND HOVER

V.A. Kostjukov, E.Yu. Kosenko, M.Yu. Medvedev, V.Kh. Pshikhopov, THE METHOD OF ESTIMATION POSITIONS OF THE UAVS BY MEASURING THE DISTANCES BETWEEN ELEMENTS OF THE GROUP	205
Y.N. Kocherov, D.V. Samoylenko DEVELOPMENT OF A RELIABLE RTC COMMUNICATION METHOD BASED ON A GROUP DATA SEPARATION METHOD BASED ON A RESIDUAL CLASS SYSTEM	218
S.M. Sokolov, N.D. Beklemishev, A.A. Boguslavsky ORGANIZATION OF GOAL-DIRECTED MOVEMENTS OF VEHICLES USING VISUAL LANDMARKS	236
V.A. Bondarenko, P.A. Gessen, V.A. Pavlova, M.V. Sozinova, V.A. Tupikov OBJECT DETECTION ALGORITHM FOR OPTOELECTRONIC SYSTEMS WITH ONLINE LEARNING	248

SECTION V. TECHNICAL VISION

N.A. Bocharov, A.G. Zuev, O.A. Slavin PERFORMANCE OF THE ELBRUS-8SV MICROPROCESSOR FOR TECHNICAL VISION TASKS UNDER POWER CONSTRAINTS	259
A.M. Fedulin, D.M. Driagin PROSPECTS OF MALE-CLASS UAVS USING FOR THE HUGE TERRITORIES AERIAL SURVEY	272

Раздел IV. Связь, навигация и наведение

УДК 007.52:629.3.05

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-204-218

**В.А. Костюков, Е.Ю. Косенко, М.В. Мамченко, М.Ю. Медведев,
В.Х. Пшихопов**

МЕТОД ОЦЕНКИ КООРДИНАТ БЛА ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЛОКАЛЬНЫМ РАССТОЯНИЯМ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ ГРУППЫ*

В связи с развитием средств мобильной робототехники проблема корректного решения навигационных задач является одной из первостепенных, наряду с проблемами автоматического управления и обеспечения информационного канала связи заданных надежности, быстродействия и пропускной способности. Для осуществления навигации беспилотный летательный аппарат (БЛА) может использовать собственную инерциальную навигационную систему (ИНС), а также систему спутниковой навигации (СНС). Целью данной статьи является разработка метода уменьшения погрешностей работы инерциальной навигационной системы БЛА, вызванных наличием случайной и систематической погрешностей. При этом рассматривается случай монотонного возрастания систематической погрешности со временем. Навигационные данные, полученные со спутника, как правило, не содержат значительной систематической погрешности определения координат. Однако спутниковый сигнал может пропадать на время, значительно большее периода трансляции со спутника навигационных данных в обычном режиме. Вследствие этого возникает проблема увеличения точности данных, получаемых от инерциальной навигационной системы. Данная проблема особенно актуальна при групповом использовании БЛА. При решении задач группового управления возникает необходимость предотвращать столкновения аппаратов и возможные коллизии уже на стадии планирования движения. Кроме того, для решения целого ряда групповых задач, таких как мониторинг местности, проведение спасательных операций, поиск объектов на заданной территории, совместное транспортирование груза, отдельные объекты группы должны слаженно перемещаться в пространстве с большой точностью. Это накладывает еще более жесткие ограничения по точности отработки ИНС и частоте информационного обмена по СНС. В настоящей статье предлагается метод, позволяющий по данным, полученным от локальных систем, осуществляющих измерение взаимных расстояний между объектами группы, скорректировать оценки собственных координат таким образом, чтобы в результате уменьшить среднеквадратическое отклонение скорректированного набора точек от истинных положений объектов в данный момент времени. Также метод позволяет уменьшить максимальное значение соответствующего отклонения по сравнению с исходным набором оценок, полученных из навигационных данных ИНС. Метод демонстрируется на примере повышения точности определения глобальных координат в группе БЛА.

Группа БЛА; групповая навигация; автономная навигация; оценка положения.

* Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 16-1900001 П, реализуемого в Южном федеральном университете.

V.A. Kostjukov, E.Yu. Kosenko, M.Yu. Medvedev, V.Kh. Pshikhopov,

THE METHOD OF ESTIMATION POSITIONS OF THE UAVS BY MEASURING THE DISTANCES BETWEEN ELEMENTS OF THE GROUP

Important problems in the development of mobile robotics are the task of autonomous navigation, automatic movement control and providing a reliable communication channel. For navigation, an unmanned aerial vehicle can use its own inertial navigation system and a satellite navigation system. The purpose of this article is to develop a method for reducing errors in the operation of the inertial navigation system of UAVs caused by the presence of random and systematic errors. In this case, we consider the situation of a monotonous increase in the systematic error over time. Usually, navigation data obtained from the satellite does not contain a significant systematic error in determining the coordinates. However, the satellite signal may be lost for a time significantly longer than the period of transmission of navigation data from the satellite in normal mode. As a result, there is a problem of increasing the accuracy of the data received from the inertial navigation system. This problem is particularly relevant for group application of UAVs. When solving group control tasks, it becomes necessary to prevent vehicle collisions and possible collisions already at the stage of traffic planning. In addition, to solve a number of group tasks, such as monitoring the terrain, conducting rescue operations, searching for objects in a given area, and joint cargo transportation, individual objects of the group must move smoothly in space with great accuracy. This imposes more stringent restrictions on the accuracy of the inertial navigation systems processing and the frequency of information exchange. In this paper, we propose a method that allows, based on data obtained from local systems that measure the mutual distances between objects in a group. This information allows correct the estimates of their own coordinates in such a way as to reduce the standard deviation of the corrected set of points from the true positions of objects at a given time. The method also reduces the maximum value of the corresponding deviation in comparison with the original set of estimates obtained from the navigation data of the INS. The method is demonstrated by the example of increasing the accuracy of determining global coordinates in a group of UAVs.

UAVs group; group navigation; autonomous navigation; estimation of position.

Введение. Для осуществления навигации беспилотный летательный аппарат (БЛА) может использовать собственную инерциальную навигационную систему (ИНС), являющуюся автономной, т.е. не требующей поступления внешних информационных сигналов [1]. Проблемой современных ИНС является наличие кроме случайной погрешности также и систематической, увеличивающейся с течением времени, что может привести к неприемлемым по точности оценкам положения и ориентации аппарата [2, 3]. Это вызвано, в свою очередь, неточностями применяемых моделей навигации и несовершенством используемых в ИНС аппаратных средств.

Например, среднеквадратическое отклонение оценки угла курса от его истинного значения для бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) ГЛ-80 [4], разрабатываемой ООО «Гиролаб» (г. Пермь), составляет порядка $\sigma_{\psi, \text{err}} = 0,5^\circ$. Систематическая погрешность ухода с течением времени оценки курса от истинного значения является в первом приближении линейной по времени с коэффициентом пропорциональности $k_{\psi, \text{err}, \text{sys}} = 0,2/3600$ (°/с).

Также БЛА может использовать систему спутниковой навигации (СНС). Навигационные данные по этому глобальному каналу транслируются с определенной частотой, причем период следования соответствующих сигналов определяется типов используемой спутниковой системы. Во-первых, эта частота может быть недостаточной для целевой точности работы БЛА. Во-вторых, спутниковый сигнал может пропадать на время, значительно большее периода трансляции со спутника навигационных данных в нормальном режиме [5, 6], что приводит к необходимости использовать на этом интервале времени данные с ИНС, обладающие монотонно возрастающей со временем погрешностью.

При решении задач группового управления, когда несколько БЛА выполняют единую миссию, требования к точности оценивания собственных координат каждым элементом такой группы возрастают по сравнению с одиночным БЛА. Это обусловлено тем, что, во-первых, появляется требование по препятствованию столкновения аппаратов, и, во-вторых, потому, что для решения ряда групповых задач, таких как мониторинг местности, проведение спасательных операций, поиск объектов, совместное транспортирование груза и проч., отдельные объекты группы должны слаженно перемещаться в пространстве, с большой точностью обрабатывая заданные траектории [7–10].

В этой связи проблема осуществления корректной навигации внутри группы взаимодействующих и выполняющих единую миссию БЛА является насущной для современной беспилотной техники.

Альтернативной или дополнительной возможностью добиться увеличения точности получаемых навигационных данных в условиях отсутствия глобальной навигации является задействование системы технического зрения (СТЗ) [11–14]. Так, например, данные, получаемые от видеокамер и/или лидаров СТЗ (видеосигналы, карты глубин, рельефа, проходимости) могут быть определенным образом комплексированы с данными ИНС таким образом, чтобы ощутимо снизить погрешность оценивания положения и ориентации аппарата.

В данной статье мы предлагаем методику комплексирования данных о взаимных расстояниях между объектами группы БЛА, полученных от их СТЗ, с навигационными данными ИНС каждого объекта, с целью значительного уточнения получаемых итоговых навигационных данных. При этом, как будет показано, удастся значительно уменьшить среднеквадратическое отклонение скорректированного набора точек от истинных положений объектов в данный момент времени, а также уменьшить максимальное значение соответствующего отклонения по сравнению с исходным набором оценок, полученных из навигационных данных ИНС.

Формальная постановка задачи. Пусть заданы истинные положения четырех БЛА в пространстве глобальной системы координат $OXYZ$ в некоторый момент времени: $M_i(x_i, y_i, z_i)$, $i=1,2,3,4$. Каждый БЛА осуществляет оценки своего положения и положений трех других БЛА группы в системе координат $OXYZ$: $\bar{M}_i(\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i)$ (рис. 1). Пусть максимальное отклонение каждой из оценок Δd_i , $i=1,2,3,4$, от соответствующего истинного значения есть Δd_{\max} : $\Delta d_i \leq \Delta d_{\max}$.

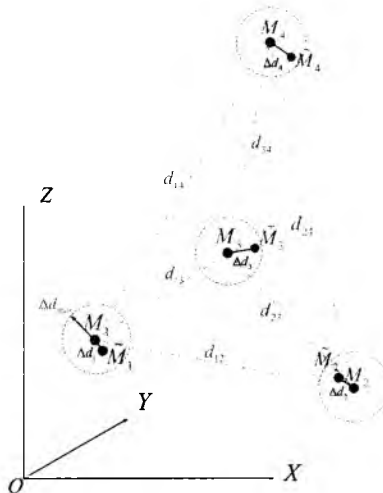


Рис. 1. Истинные и оценочные положения четырех БЛА в пространстве глобальной системы координат $OXYZ$

Предположим также, что каждый БЛА измеряет расстояния между каждой парой объектов в группе. Далее будем считать, что погрешность такого измерения гораздо меньше Δd_{\max} , поэтому будем использовать вместо оценок этих расстояний сами их истинные значения: $d_{12}, d_{13}, d_{14}, d_{23}, d_{34}$. Отметим, что данное предположение является общепринятым при решении указанного класса задач [15].

Требуется, зная расстояния $d_{12}, d_{13}, d_{14}, d_{23}, d_{34}$, разработать алгоритм коррекции оценок $\tilde{M}_i(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i, \tilde{z}_i)$, $i=1,2,3,4$, приближающий их к соответствующим значениям $M_i(x_i, y_i, z_i)$.

Процедура решения поставленной задачи. Рассмотрим тетраэдр, образованный БЛА группы и представленный на рис. 2. Для формирования такого тетраэдра в группе из произвольного числа БЛА можно использовать процедуру трехмерной триангуляции, например, триангуляцию Делоне [16, 17].

Можно показать, что произвольный тетраэдр в любой локальной системе координат, связанной с его ребрами, определяется полностью с точностью до одного зеркального отражения. Действительно, пусть дан тетраэдр $P_1P_2P_3P_4$, для которого известны расстояния между соответствующими вершинами $d_{12}, d_{13}, d_{14}, d_{23}, d_{34}$. Введем локальную систему координат $O'X'Y'Z'$ (рис. 2) так, что точка O' совпадает с P_1 , ось $O'X'$ (с ортом 1_x) направлена вдоль ребра P_1P_2 , ось $O'Z'$ перпендикулярна плоскости $P_1P_2P_3$, причем её орт определяется как $1_z = ([P_1P_2 \times P_1P_3])_n$, где операция $(\)_n$ здесь и далее означает нормировку по модулю. Для орта 1_y справедливо выражение: $1_y = [1_z \times 1_x]$. Точки P_1, P_2, P_3, P_4 в системе $O'X'Y'Z'$ будем описывать соответствующими радиус-векторами: r_1, r_2, r_3, r_4 . Координаты первых трех радиус-векторов легко получить:

$$r_1' = [0, 0, 0], r_2' = [d_{21}, 0, 0], r_3' = [d_{13} \cos \varphi_{23}, d_{13} \sin \varphi_{23}, 0]. \quad (1)$$

Координаты последнего радиус-вектора r_4' получаются как решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} x_4'^2 + y_4'^2 + z_4'^2 = d_{14}^2, \\ (x_4' - x_2')^2 + y_4'^2 + z_4'^2 = d_{24}^2, \\ (x_4' - x_3')^2 + (y_4' - y_3')^2 + z_4'^2 = d_{34}^2. \end{cases} \quad (2)$$

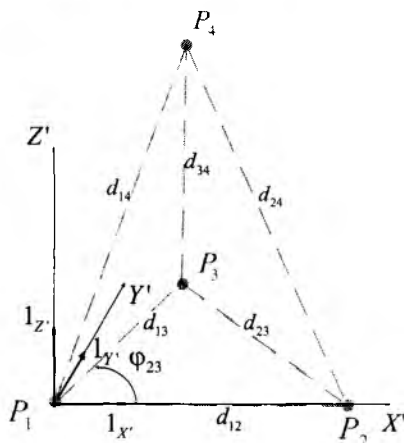


Рис. 2. Локальная система координат подвижного тетраэдра

Система (2) имеет два решения $P_4^{(1)}, P_4^{(2)}$, соответствующие двум разным тетраэдрам, каждый из которых может быть получен из другого зеркальным отражением относительно плоскости $O'X'Y'$:

$$\begin{cases} x'_4 = \frac{d_{14}^2 + d_{12}^2 - d_{24}^2}{2d_{12}}, \\ y'_4 = \frac{d_{14}^2 - d_{34}^2 + x_3^2 + y_3^2 - 2x_3x'_4}{2y_3}, \\ z'_4 = \pm \sqrt{d_{14}^2 - x_4'^2 - y_4'^2}. \end{cases} \quad (3)$$

Предположим, что расстояния между вершинами тетраэдра не меняются при различных преобразованиях последнего локальной системе координат, то есть тетраэдр ведет себя как абсолютно твердое тело. В этом случае для описания перемещений тетраэдра может быть применена матрица однородных преобразований следующего вида:

$$A = \begin{bmatrix} R & r_1 \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $r_1 = r_1(x, y, z)$ – радиус-вектор начала $P_1=O'$ локальной системы $O'X'Y'Z'$ относительно $OXYZ$;

$$R(\psi, \vartheta, \gamma) = \begin{bmatrix} c(\psi)c(\vartheta) & s(\psi)s(\gamma) - c(\psi)s\vartheta c(\gamma) & s(\psi)c(\gamma) + c(\psi)s(\vartheta)s(\gamma) \\ s(\vartheta) & c(\vartheta)c(\gamma) & -c(\vartheta)s(\gamma) \\ -s(\psi)c(\vartheta) & c(\psi)s(\gamma) + s(\psi)s(\vartheta)c(\gamma) & c(\psi)c(\gamma) - s(\psi)s(\vartheta)s(\gamma) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

матрица вращения, характеризующая взаимосвязь ортов систем координат $O'X'Y'Z'$ и $OXYZ$ [18, 19], ψ, ϑ, γ – углы Эйлера [20]. Для сокращения введены обозначения: $\cos(*) = c(*)$, $\sin(*) = s(*)$.

Таким образом, тетраэдр $P_1P_2P_3P_4$ имеет шесть степеней свободы, а его перемещения описываются набором независимых координат:

$$X = [x, y, z, \psi, \vartheta, \gamma]. \quad (6)$$

Поставим задачу приблизить подвижный тетраэдр $P_1P_2P_3P_4$ к набору точек-оценок $\tilde{M}_i(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i, \tilde{z}_i)$, $i=1,2,3,4$, в смысле некоторой меры. Наиболее естественно здесь может быть применен критерий минимизации суммы квадратов отклонений точек тетраэдра от соответствующих точек-оценок:

$$G(X) = \sum_{i=1}^4 |P_i \tilde{M}_i|^2 \rightarrow \min. \quad (7)$$

Поскольку оценки \tilde{M} даны в глобальной системе координат $OXYZ$, то выразим координаты радиус-векторов точек P_i тетраэдра в этой системе:

$$r'_i = \begin{cases} r(x, y, z), & \text{при } i = 1; \\ T_h [R(\psi, \vartheta, \lambda), r(x, y, z); r'_i], & \text{при } i = 2, 3, 4, \end{cases} \quad (8)$$

$$T_h [R, r; r'_i] = \text{extr} \left\{ \begin{bmatrix} R & r \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r'_i \\ 1 \end{bmatrix}, 3 \right\} = \text{extr} \left[A \begin{bmatrix} r'_i \\ 1 \end{bmatrix}, 3 \right]. \quad (9)$$

Выражение (9) описывает функционал, преобразующий координаты радиус-вектора одной и той же точки из локальной в глобальную систему координат. Здесь использована операция выделения первых s координат вектора:

$$\text{extr} [p(p_1, p_2, \dots, p_s, \dots, p_n)^T, s] \equiv p_s(p_1, p_2, \dots, p_s)^T. \quad (10)$$

Раскрывая функционал $G(X)$ в (7), получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} G(X) = & \sum_{i=2}^{n+4} |r'_i|^2 + \sum_{i=1}^{n+4} [(x - \tilde{x}_i)^2 + (y - \tilde{y}_i)^2 + (z - \tilde{z}_i)^2] + 2d_{12} [a_{11}(x - \tilde{x}_2) + a_{21}(y - \tilde{y}_2) + a_{31}(z - \tilde{z}_2)] + \\ & + 2[(a_{11}x'_3 + a_{12}y'_3)(x - \tilde{x}_3) + (a_{21}x'_3 + a_{22}y'_3)(y - \tilde{y}_3) + (a_{31}x'_3 + a_{32}y'_3)(z - \tilde{z}_3)] + \\ & + 2 \sum_{j=4}^{n+4} [(a_{11}x'_j + a_{12}y'_j + a_{13}z'_j)(x - \tilde{x}_j) + (a_{21}x'_j + a_{22}y'_j + a_{23}z'_j)(y - \tilde{y}_j) + (a_{31}x'_j + a_{32}y'_j + a_{33}z'_j)(z - \tilde{z}_j)], \end{aligned} \quad (11)$$

где введены обозначения:

$$a_{ij} = R_{ij}(\psi, \vartheta, \gamma), \quad i, j = 1, 2, 3, 4.$$

Дифференцируя функционал (11) последовательно по всем независимым переменным набора X , получим:

$$\partial_x G(X) = 2 \sum_{i=1}^{n=4} (x - \bar{x}_i) + 2(a_{11}x'_3 + a_{12}y'_3) + 2 \sum_{j=4}^{n=4} (a_{11}x'_j + a_{12}y'_j + a_{13}z'_j) + 2d_{12}a_{11}, \quad (12)$$

$$\partial_y G(X) = 2 \sum_{i=1}^{n=4} (y - \bar{y}_i) + 2(a_{21}x'_3 + a_{22}y'_3) + 2 \sum_{j=4}^{n=4} (a_{21}x'_j + a_{22}y'_j + a_{23}z'_j) + 2d_{12}a_{21}, \quad (13)$$

$$\partial_z G(X) = 2 \sum_{i=1}^{n=4} (z - \bar{z}_i) + 2(a_{31}x'_3 + a_{32}y'_3) + 2 \sum_{j=4}^{n=4} (a_{31}x'_j + a_{32}y'_j + a_{33}z'_j) + 2d_{12}a_{31}, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \partial_\psi G(X) &= 2d_{12} [\partial_\psi a_{11} (x - \bar{x}_2) + \partial_\psi a_{21} (y - \bar{y}_2) + \partial_\psi a_{31} (z - \bar{z}_2)] + \\ &+ 2 [A_{1\psi}(r_3')(x - \bar{x}_3) + A_{2\psi}(r_3')(y - \bar{y}_3) + A_{3\psi}(r_3')(z - \bar{z}_3)] + \\ &+ 2 \sum_{j=4}^{n=4} [B_{1\psi}(r_j')(x - \bar{x}_j) + B_{2\psi}(r_j')(y - \bar{y}_j) + B_{3\psi}(r_j')(z - \bar{z}_j)], \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \partial_\vartheta G(X) &= 2d_{12} [\partial_\vartheta a_{11} (x - \bar{x}_2) + \partial_\vartheta a_{21} (y - \bar{y}_2) + \partial_\vartheta a_{31} (z - \bar{z}_2)] + \\ &+ 2 [A_{1\vartheta}(r_3')(x - \bar{x}_3) + A_{2\vartheta}(r_3')(y - \bar{y}_3) + A_{3\vartheta}(r_3')(z - \bar{z}_3)] + \\ &+ 2 \sum_{j=4}^{n=4} [B_{1\vartheta}(r_j')(x - \bar{x}_j) + B_{2\vartheta}(r_j')(y - \bar{y}_j) + B_{3\vartheta}(r_j')(z - \bar{z}_j)], \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \partial_\gamma G(X) &= 2d_{12} [\partial_\gamma a_{11} (x - \bar{x}_2) + \partial_\gamma a_{21} (y - \bar{y}_2) + \partial_\gamma a_{31} (z - \bar{z}_2)] + \\ &+ 2 [A_{1\gamma}(r_3')(x - \bar{x}_3) + A_{2\gamma}(r_3')(y - \bar{y}_3) + A_{3\gamma}(r_3')(z - \bar{z}_3)] + \\ &+ 2 \sum_{j=4}^{n=4} [B_{1\gamma}(r_j')(x - \bar{x}_j) + B_{2\gamma}(r_j')(y - \bar{y}_j) + B_{3\gamma}(r_j')(z - \bar{z}_j)]. \end{aligned} \quad (17)$$

Здесь введены обозначения:

$$A_{1\sigma}(r_3') = \partial_\sigma a_{11} x'_3 + \partial_\sigma a_{12} y'_3, \quad A_{2\sigma}(r_3') = \partial_\sigma a_{21} x'_3 + \partial_\sigma a_{22} y'_3, \quad A_{3\sigma}(r_3') = \partial_\sigma a_{31} x'_3 + \partial_\sigma a_{32} y'_3;$$

$$B_{1\sigma}(r_j') = \partial_\sigma a_{11} x'_j + \partial_\sigma a_{12} y'_j + \partial_\sigma a_{13} z'_j, \quad B_{2\sigma}(r_j') = \partial_\sigma a_{21} x'_j + \partial_\sigma a_{22} y'_j + \partial_\sigma a_{23} z'_j,$$

$$B_{3\sigma}(r_j') = \partial_\sigma a_{31} x'_j + \partial_\sigma a_{32} y'_j + \partial_\sigma a_{33} z'_j, \quad r_j' = r_j'(x'_j, y'_j, z'_j), \quad j = 4, 5, \dots, n; \quad \sigma = \{\psi, \vartheta, \gamma\}.$$

Производные $\partial_\psi a_{ij}$, $\partial_\vartheta a_{ij}$, $\partial_\gamma a_{ij}$, $i, j = 1, 2, 3$ находятся с использованием выражения (5).

Уравнения (12)-(17) образуют систему относительно стационарной точки $X = X_{st}$ функционала (7).

После решения системы (12)-(17) по формуле (8) рассчитываются координаты всех точек подвижного тетраэдра, положение которого в данный момент времени в глобальной системе координат определяется условием $X=X_{st}$. Эти точки являются искомыми скорректированными оценками положений рассматриваемых четырех БЛА.

Рассмотрим теперь условия существования экстремума и фильтрация подходящих взаимных ориентаций БЛА в группе. Найдем матрицу Гессе для рассматриваемой задачи (7):

$$G_{ess}(X) = \left\{ \delta_{X_i, X_j}^2 G(X) \right\}, \quad i, j = \overline{1, 6}. \quad (18)$$

Достаточное условие существования минимума функционала (7) в стационарной точке $X = X_{st}$ имеет вид:

$$\Delta_{G_{ess, i}}(X_{st}) > 0, \quad i = \overline{1, 6}, \quad (19)$$

где $\Delta_{G_{ess, i}}(X)$ есть i -й главный минор матрицы Гессе, взятый в точке X .

Численный анализ показал, что условие (19) может не выполняться для некоторых взаимных расположений БЛА в группе, т.е. для некоторых наборов исходных точек $M_i(x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$, где n может быть более четырех.

Поэтому в реальной ситуации движения группы БЛА уточнение координат по вышеприведенной методике возможно только в те моменты времени, в которых текущая пространственная конфигурация заданной подгруппы БЛА удовлетворяет условию (19).

Для численного решения системы уравнений (12)–(17) относительно компонент стационарной точки $X_{st} = [x_{st}, y_{st}, z_{st}, \psi_{st}, \vartheta_{st}, \gamma_{st}]$ необходимо корректно задать начальное приближение. С этой целью рассмотрим случай, когда вершина P_1 подвижного тетраэдра $P_1P_2P_3P_4$ совмещена с точкой \bar{M}_1 , ребро P_1P_2 (и, соответственно, орт $1_{x'}$), направлено вдоль отрезка $\bar{M}_1\bar{M}_2$, а орт $1_{z'}$ находится из условия $1_{z'} = ([\bar{M}_1\bar{M}_2 \times \bar{M}_1\bar{M}_3])_n$ (рис. 3). Тогда матрица вращения, описывающая такую ориентацию осей системы $O'X'Y'Z'$ относительно $OXYZ$, дается выражением:

$$R_0 = [1_{x'} \quad 1_{y'} \quad 1_{z'}] \quad (20)$$

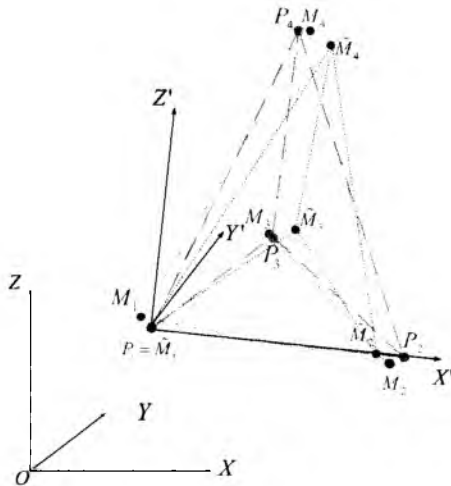


Рис. 3. Определение начального положения тетраэдра, соответствующего начальному приближению для решения оптимизационной задачи (7), по исходному набору точек-оценок

До сих пор тетраэдр оставался определенным с точностью до зеркального отражения относительно плоскости $O'X'Y'$. Для устранения этой неопределенности выберем такое значение координаты $z'_4 = \pm \sqrt{d_{14}^2 - x_4'^2 - y_4'^2}$ в (3), которое соответствует меньшему удалению от точки-оценки \bar{M}_4 :

$$z'_4 = \begin{cases} \sqrt{d_{14}^2 - x_4'^2 - y_4'^2}, & \text{если } |P_4^{(1)} M'_4| < |P_4^{(2)} M'_4|; \\ -\sqrt{d_{14}^2 - x_4'^2 - y_4'^2}, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (21)$$

Матрица однородного преобразования, соответствующая такому расположению тетраэдра, есть:

$$A_0 = \begin{bmatrix} R_0 & \tilde{r}_1 \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

а векторный набор параметров, характеризующих A_0 и, соответственно, рассматриваемое положение тетраэдра, суть:

$$X_0 = [\tilde{x}_1, \tilde{y}_1, \tilde{z}_1, \psi_0, \vartheta_0, \gamma_0], \quad (23)$$

где значения углов Эйлера $\psi_0, \vartheta_0, \gamma_0$ подлежат нахождению из системы уравнений:

$$\begin{cases} c(\psi_0) c(\vartheta_0) = R_{0,11}, \\ s(\vartheta_0) = R_{0,21}, \\ -s(\psi_0) c(\vartheta_0) = R_{0,31}, \\ s(\psi_0) s(\gamma_0) - c(\psi_0) s(\vartheta_0) c(\gamma_0) = R_{0,12}, \\ c(\vartheta_0) c(\gamma_0) = R_{0,22}, \\ c(\psi_0) s(\gamma_0) + s(\psi_0) s(\vartheta_0) c(\gamma_0) = R_{0,32}, \\ s(\psi_0) c(\gamma_0) + c(\psi_0) s(\vartheta_0) s(\gamma_0) = R_{0,13}, \\ -c(\vartheta_0) s(\gamma_0) = R_{0,23}, \\ c(\psi_0) c(\gamma_0) - s(\psi_0) s(\vartheta_0) s(\gamma_0) = R_{0,33}. \end{cases} \quad (24)$$

Превышение числа уравнений над числом неизвестных здесь должно быть использовано для выбора того решения, которое соответствует данной матрице вращения. Вначале могут быть найдены восемь кандидатов на решения системы (24) из решения, например, подсистемы:

$$\begin{cases} c(\psi_0) c(\vartheta_0) = R_{0,11}, \\ s(\vartheta_0) = R_{0,21}, \\ -s(\psi_0) c(\vartheta_0) = R_{0,31}, \\ c(\vartheta_0) c(\gamma_0) = R_{0,22}, \\ -c(\vartheta_0) s(\gamma_0) = R_{0,23}. \end{cases} \quad (25)$$

Указанные кандидаты на решения (24) находятся как комбинации между следующими возможными значениями углов Эйлера, согласно (25):

$$\begin{aligned} \vartheta_{01} &= \arcsin(R_{0,21}), \quad \vartheta_{02} = \begin{cases} -\vartheta_{01} + \pi, & \text{при } \vartheta_{01} \geq 0; \\ -\vartheta_{01} - \pi, & \text{при } \vartheta_{01} < 0; \end{cases} \\ \psi_{01} &= -\arctg(R_{0,31} / R_{0,11}), \quad \psi_{02} = \begin{cases} \psi_{01} - \pi, & \text{при } \psi_{01} \geq 0; \\ \psi_{01} + \pi, & \text{при } \psi_{01} < 0; \end{cases} \\ \gamma_{01} &= -\arctg(R_{0,23} / R_{0,22}), \quad \gamma_{02} = \begin{cases} \gamma_{01} - \pi, & \text{при } \gamma_{01} \geq 0; \\ \gamma_{01} + \pi, & \text{при } \gamma_{01} < 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (26)$$

Далее для каждого набора проверяются оставшиеся уравнения системы (24):

$$\begin{cases} s(\psi_0)s(\gamma_0) - c(\psi_0)s(\vartheta_0)c(\gamma_0) = R_{0,12}, \\ c(\psi_0)s(\gamma_0) + s(\psi_0)s(\vartheta_0)c(\gamma_0) = R_{0,32}, \\ s(\psi_0)c(\gamma_0) + c(\psi_0)s(\vartheta_0)s(\gamma_0) = R_{0,13}, \\ c(\psi_0)c(\gamma_0) - s(\psi_0)s(\vartheta_0)s(\gamma_0) = R_{0,33}. \end{cases} \quad (27)$$

В итоге остается один набор, удовлетворяющий всем уравнениям (24).

Важно отметить, что рассмотренную методику можно применить и для числа БЛА, более четырех. В этом случае в выражениях (12)–(17) необходимо суммировать до соответствующего значения $n > 4$, а координаты точек подвижного многогранника с вершинами P_1, P_2, \dots, P_n в его собственной локальной системе находятся: для точек P_1, P_2, P_3 по формулам (1), а координаты точек P_4, P_5, \dots, P_n находятся по формуле, аналогичной (3), которая получается заменой индекса «4» во всех величинах, содержащих этот индекс, на «j». Правило отбора корректного решения для выбора начального приближения определяется формулой (21), если в последней произвести ту же замену индекса.

Результаты численных экспериментов. Рассмотрим несколько примеров нахождения скорректированного набора оценок по указанному методу оптимизации.

На рис. 4–6 представлены результаты расчетов для случая четырех, пяти и восьми подвижных объектов при условии соблюдения достаточного условия существования решения задачи оптимизации на данный момент времени. На рисунках слева приводятся пространственные истинные положения этих объектов (красные точки), оценочные положения объектов по навигационным данным группы (синие точки), скорректированные по разработанной методике оценочные положения объектов (зеленые точки). На рисунках справа даны зависимости абсолютных погрешностей оценивания координат для оценочного набора точек, полученного по навигационным данным (синие кривые), и скорректированного по разработанной методике (зеленые кривые), от номера объекта группы. Также приведены соответствующие значения среднеквадратического отклонения исходных оценочных значений и скорректированных по предлагаемой методике значений от истинных положений объектов (σ_1 и σ_2).

Из графиков, приведенных на рис. 4–6 справа, видно, что для всех трех рассмотренных случаев исходных наборов истинных положений БЛА и их оценок, полученных на основе ИНС, выполнено условие $\sigma_2 < \sigma_1$, причем максимальное уменьшение СКО имеет место для первого случая и составляет 41 %, а минимальное – для третьего случая и равно 17 %. Как показала проверка, во всех этих случаях выполнены достаточные условия существования экстремума (19) функционала (7). Также видно, что максимальное отклонение точки-оценки от своего истинного положения существенно снижается в степени, совпадающей по порядку с соответствующей степенью снижения СКО, что является общим свойством развиваемой методики.

На рис. 7 и 8 приведены результаты расчетов для случая четырех и пяти БЛА при условии несоблюдения достаточного условия существования решения задачи оптимизации на данный момент времени. Из графиков, приведенных на рис. 7 справа, видно, что погрешность оценивания истинных положений объектов возрастает, если применить разработанную методику уточнения координат при несоблюдении достаточного условия существования оптимума функционала (7). Также указаны соответствующие значения среднеквадратических отклонений σ_1 и σ_2 .

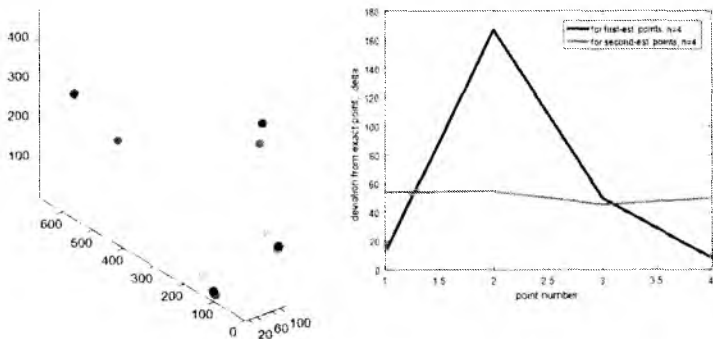


Рис. 4. Результаты уточнения координат для 4 БЛА $\sigma_1=87,4$ м, $\sigma_2=51,0$ м

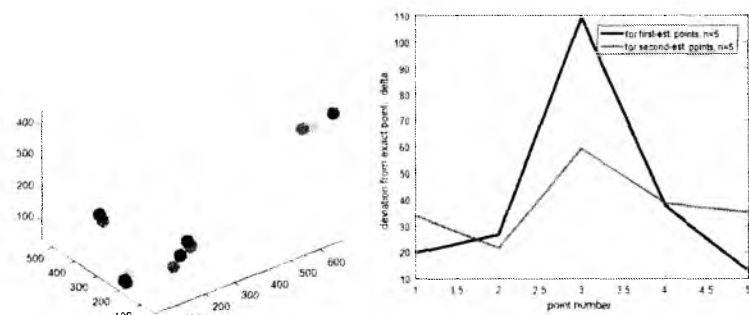


Рис. 5. Результаты уточнения координат для 5 БЛА $\sigma_1=63,4$ м, $\sigma_2=49,7$ м

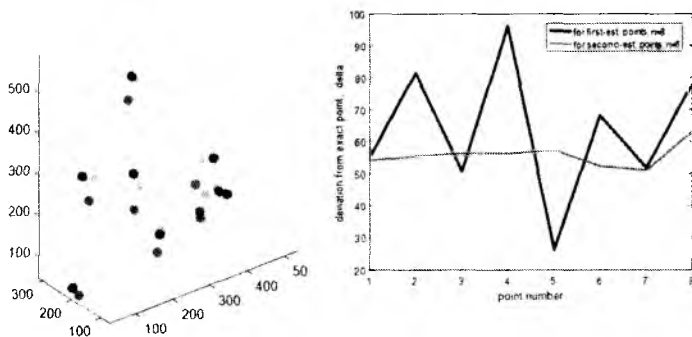


Рис. 6. Результаты уточнения координат для 8 БЛА $\sigma_1=66,6$ м, $\sigma_2=55,8$ м

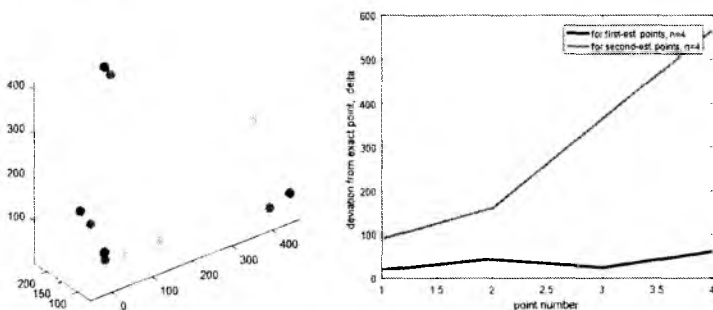


Рис. 7. Результаты уточнения координат для 4 БЛА при невыполнении достаточных условий (19) $\sigma_1=51,0$ м, $\sigma_2=87,3$ м

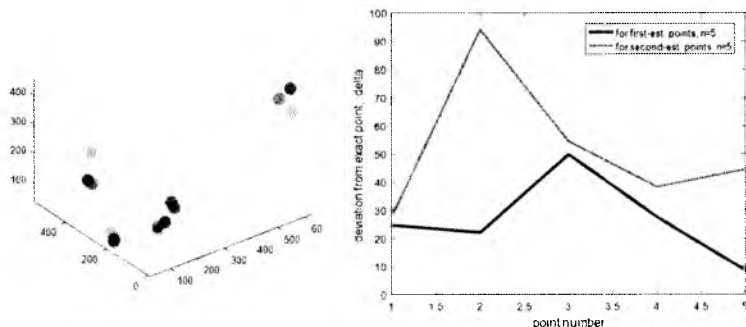


Рис. 8. Результаты уточнения координат для 5 БЛА при невыполнении достаточных условий (19) $\sigma_1=29,8$ м, $\sigma_2=56,7$ м

Могут быть случаи, когда при несоблюдении указанных достаточных условий стационарная точка (23) функционала (7) все же дает оптимум. Однако при проведении расчетов в режиме реального времени нецелесообразно рассматривать такие случаи, так как проверить тот факт, сработала или не сработала методика при несоблюдении достаточных условий (19) не представляется возможным, т.к. нет данных об истинных положениях объектов.

Заключение. Таким образом, в статье решена задача определения скорректированных положений четырех и более БЛА по критерию минимума суммы квадратов отклонений новых положений точек от их исходных положений при ограничениях на расстояния между каждой парой объектов в подгруппе БЛА, СТЗ которых используются в данный момент времени для точной оценки этих расстояний.

На каждом временном шаге вначале проверяются достаточные условия существования минимума (19) соответствующего функционала (7). Если они выполнены, находится стационарная точка (23) из решения системы уравнений (12)–(17). При этом при числе БЛА, большем четырех, необходимо в суммах, фигурирующих в этих уравнениях, брать в качестве верхнего предела суммирования соответствующее значение $n > 4$, а вместо формул (3) и (21) рассматривать измененные формулы с заменой индекса «4» на «j». Затем по формуле (8) находят координаты скорректированных положений БЛА в данный момент времени.

Применение данной методики позволяет получить следующие эффекты.

1. Корректировка исходного набора точек-оценок позволяет уменьшить СКО, рассчитанное по девиации относительно истинных положений объектов, на 15–40 %.

2. Максимальное отклонение точки-оценки от своего истинного положения существенно снижается в степени, совпадающей по порядку с соответствующей степенью снижения СКО.

3. Уменьшение девиации для изначально плохо оцененных точек происходит ценой небольшого снижения точности оценивания тех точек, которые изначально были оценены наиболее точно.

Разработанная методика позволяет уменьшить среднеквадратическое отклонение скорректированного набора точек от истинного, а также уменьшить максимальное значение девиации по сравнению с исходным набором оценок, полученных из навигационных данных, и может быть эффективно применена для уточнения данных ИНС, в том числе в условиях значительного перебора со связью спутниковой навигационной системы.

В целом, представленная методика лежит в рамках методов корреляционно-экстремальной навигации. В ее рамках возможно использование других способов получения дополнительной информации, включая визуальную и радиотехническую навигацию [21–23].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Веремеенко К.К., Желтов С.Ю.* и др. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Себрякова. – М.: Физматлит, 2009. – 556 с. – ISBN 978-59221-1168-3.
2. *Layh T., Gebre-Egziabher D.* Design for graceful degradation and recovery from GNSS interruptions // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2017. – Vol. 32 (9). – P. 4-17.
3. *Савельев В.М., Антонов Д.А.* Выставка бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата на подвижном основании // Тр. МАИ. – 2011. – Вып. 45.
4. ГЛ-80 – малогабаритная облегчённая бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС) – гироскопас на базе волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) с замкнутым контуром. – URL: <http://gyrolab.ru/product/gl-80-voikonno-opticheskiy-gyroscope-inertsialnaya-navigatsionnaya-systema-ins/> (дата обращения: 02.03.2021).
5. *Михайлов Н.В., Чистяков В.В.* Опыт использования метода «SoftFlex» в аппаратуре потребителей спутниковой навигации // Гироскопия и навигация. – 2012. – № 4. – С. 105-114.
6. *Ferreira R., Gaspar J., Sebastião P. et al.* Effective GPS Jamming Techniques for UAVs Using Low-Cost SDR Platforms // Wireless Perspective Communication. – 2020. – Vol. 115. – P. 2705-2727. – <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07212-6>.
7. *Bingöl Ö., Güzey H.M.* Neuro sliding mode control of quadrotor UAVs carrying suspended payload // Advanced Robotics. – 2021. – Vol. 35 (3-4). – P. 255-266.
8. *Белоглазов Д.А., Гайдук А.Р., Косенко Е.Ю., Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х., Соловьев В.В., Тимов А.Е., Финаев В.И., Шаповалов И.О.* Групповое управление подвижными объектами в неопределённых средах / под ред. В.Х. Пшихопова. – М.: Физматлит, 2015. – 304 с. – ISBN 978-5-9221-1674-9.
9. *Kendoul F.* Survey of advances in guidance, navigation, and control of unmanned rotorcraft systems // Journal of Field Robotics. – 2012. – Vol. 29 (2). – P. 315-378. – Doi: 10.1002/rob.20414.
10. *Pshikhopov V., and Medvedev M.* Group control of autonomous robots motion in uncertain environment via unstable modes // SPIIRAS Proceedings. – 2018. – Vol. 60 (5). – P. 39-63.
11. *Sokolov S.M., Boguslavsky A.A., Vasilyev A.I., Trifonov O.V.* Development of software and hardware of entry-level vision systems for navigation tasks and measuring // Advances in Intelligent Systems and Computing (Springer). – 2013. – Vol. 208. – P. 463-476.
12. *Завалишин О.И.* Улучшение точности навигации и посадки с использованием GBASII/III категории // Информатизация и связь. – 2017. – № 2. – С. 18-21.
13. *Волощенко Е.В., Волощенко В.Ю.* Технологии комплексной навигации беспилотных гидросамолетов на акватории гидроаэродрома // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 6 (216). – С. 52-65.
14. *Поливанов А.Ю., Иванов Ю.В., Холин Д.В.* Методика преобразования координат системы технического зрения промышленного робота для операции лазерной сварки // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – Vol. 21 (3). – P. 166-173. – <https://doi.org/10.17587/mau.21.166-173>.
15. *Соколов С.М., Беклемишев Н.Д., Богуславский А.А.* Организация целенаправленных перемещений подвижных средств с использованием зрительных ориентиров // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 1.
16. *Mulzer W., Rote G.* Minimum-weight triangulation is NP-hard // Proc. of 22nd Annual Symposium on Computational Geometry. – 2006. – P. 1-10.
17. *Karkishchenko A.N., Pshikhopov V.Kh.* On finding the complexity of an environment for the operation of a mobile object on a plane // Automation and Remote Control. – 2019. – Vol. 80 (5). – P. 897-912.
18. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., Нейдорф Р.А., Беляев В.Е., Федоренко Р.В., Костюков В.А., Крухмалев В.А.* Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: математическая модель // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2013. – № 6. – С. 14-21.
19. *Бюшгенз Г.С., Студнев Р.В.* Динамика самолета. Пространственное движение. – М.: Машиностроение, 1983.
20. *Pshikhopov V., Medvedev M.* Multi-Loop Adaptive Control of Mobile Objects in Solving Trajectory Tracking Tasks // Automation and Remote Control. – 2020. – Vol. 81, No. 11. – P. 2078-2093.

21. Сизов А.В. и др. Методика формирования требований к системе коррекции инерциальной навигационной системы на основе решения многопараметрической оптимизационной задачи // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2018. – Т. 6, № 4. – С. 381-392.
22. Емельянцеv Г.И., Степанов А.П., Блажнов Б.А. О решении навигационной задачи для летательных аппаратов с использованием инерциального модуля на микромеханических датчиках и наземных радиоориентиров // Гироскопия и навигация. – 2017. – Т. 2. – С. 3-17.
23. Daftry Sh., Dey D., Sandhawalial H., Zeng S., Bagnell J.A., Hebert M. Semi-Dense Visual Odometry for Monocular Navigation in Cluttered Environment // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2015.

REFERENCES

1. Veremeenko K.K., Zheltov S.Yu. i dr. Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii v zadachakh navigatsii i navedeniya bespilotnykh manevrennykh letatel'nykh apparatov [Modern information technologies in the tasks of navigation and guidance of unmanned maneuverable aircraft], ed. by M.N. Krasil'shchikova, G.G. Sebyakova. Moscow: Fizmatlit, 2009, 556 p. ISBN 978-59221-1168-3.
2. Layh T., Gebre-Egziabher D. Design for graceful degradation and recovery from GNSS interruptions, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2017, Vol. 32 (9), pp. 4-17.
3. Savel'ev V.M., Antonov D.A. Vystavka besplatformennoy inertsiyal'noy navigatsionnoy sistemy bespilotnogo letatel'nogo apparata na podvizhnom osnovanii [Tuning of a free-form Inertial navigation System of an Unmanned aerial Vehicle on a Movable base], *Trudy MAI* [Transactions of MAI], 2011, Issue 45.
4. GL-80 – malogabaritnaya oblegchennaya besplatformennaya inertsiyal'naya navigatsionnaya sistema (BINS) – girokompas na baze volokonno-opticheskikh giroskopov (VOG) s zamknyutym konturom [GL-80-small-sized lightweight strapdown inertial navigation system (BINS) - gyrocompass based on fiber-optic gyroscopes (VOG) with a closed loop]. Available at: <http://gyrolab.ru/product/gl-80-volonkonno-opticheskiy-gyroscope-inertsiyalnaya-navigatsionnaya-sistema-ins/> (accessed 02 March 2021).
5. Mikhaylov N.V., Chistyakov V.V. Opyt ispol'zovaniya metoda «SoftFlex» v apparature potrebiteley sputnikovoy navigatsii [Experience of using the "SoftFlex" method in the equipment of satellite navigation consumers], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 2012, No. 4, pp. 105-114.
6. Ferreira R., Gaspar J., Sebastião P. et al. Effective GPS Jamming Techniques for UAVs Using Low-Cost SDR Platforms, *Wireless Perspective Communication*, 2020, Vol. 115, pp. 2705-2727. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07212-6>.
7. Bingöl Ö., Güzey H.M. Neuro sliding mode control of quadrotor UAVs carrying suspended payload, *Advanced Robotics*, 2021, Vol. 35 (3-4), pp. 255-266.
8. Beloglazov D.A., Gayduk A.R., Kosenko E.Yu., Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., Solov'ev V.V., Titov A.E., Finaev V.I., Shapovalov I.O. Gruppovoe upravlenie podvizhnymi ob"ektami v neopredelennykh sredakh [Group control of mobile objects in undefined environments], ed. by V.Kh. Pshikhopova. Moscow: Fizmatlit, 2015, 304 p. ISBN 978-5-9221-1674-9.
9. Kendoul F. Survey of advances in guidance, navigation, and control of unmanned rotorcraft systems, *Journal of Field Robotics*, 2012, Vol. 29 (2), pp. 315-378. Doi: 10.1002/rob.20414.
10. Pshikhopov V., and Medvedev M. Group control of autonomous robots motion in uncertain environment via unstable modes, *SPIIRAS Proceedings*, 2018, Vol. 60 (5), pp. 39-63.
11. Sokolov S.M., Boguslavsky A.A., Vasilyev A.I., Trifonov O.V. Development of software and hardware of entry-level vision systems for navigation tasks and measuring, *Advances in Intelligent Systems and Computing (Springer)*, 2013, Vol. 208, pp. 463-476.
12. Zavalishin O.I. Uluchshenie tochnosti navigatsii i posadki s ispol'zovaniem GBASII/III kategorii [Improved navigation and landing accuracy using GBAS Category II/III], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2017, No. 2, pp. 18-21.
13. Voloshchenko E.V., Voloshchenko V.Yu. Tekhnologii kompleksnoy navigatsii bespilotnykh gidrosamoletov na akvatorii gidroaerodroma [Technology integrated navigation of unmanned seaplane on the water with hydro-port], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 6 (216), pp. 52-65.

14. Polivanov A.Yu., Ivanov Yu.V., Kholin D.V. Metodika preobrazovaniya koordinat sistemy tekhnicheskogo zreniya promyshlennogo robota dlya operatsii lazernoy svarki [Method of transformation of coordinates of the industrial robot's vision system for laser welding operation], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2020, Vol. 21 (3), pp. 166-173. Available at: <https://doi.org/10.17587/mau.21.166-173>.
15. Sokolov S.M., Beklemishev N.D., Boguslavskiy A.A. Organizatsiya tselenapravlennykh peremeshcheniy podvizhnykh sredstv s ispol'zovaniem zritel'nykh orientirov [The organization of purposeful movements of mobile means with the use of visual orientations], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 1.
16. Mulzer W., Rote G. Minimum-weight triangulation is NP-hard, *Proc. of 22nd Annual Symposium on Computational Geometry*, 2006, pp. 1-10.
17. Karkishchenko A.N., Pshikhopov V.Kh. On finding the complexity of an environment for the operation of a mobile object on a plane, *Automation and Remote Control*, 2019, Vol. 80 (5), pp. 897-912.
18. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gayduk A.R., Neydorf R.A., Belyaev V.E., Fedorenko R.V., Kostyukov V.A., Krukhmalev V.A. Sistema pozitsionno-traektorogo upravleniya robotizirovannoy vozdukhoplavatel'noy platformoy: matematicheskaya model' [The system of positional-trajectory control of a robotic aeronautical platform: a mathematical model], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mechatronics, Automation and Control], 2013, No. 6, pp. 14-21.
19. Byushgens G.S., Studnev R.V. Dinamika samoleta. Prostranstvennoe dvizhenie [Dynamics of the aircraft. Spatial movement]. Moscow: Mashinostroenie, 1983.
20. Pshikhopov V., Medvedev M. Multi-Loop Adaptive Control of Mobile Objects in Solving Trajectory Tracking Tasks, *Automation and Remote Control*, 2020, Vol. 81, No. 11, pp. 2078-2093.
21. Sizov A.V. i dr. Metodika formirovaniya trebovaniy k sisteme korrektsii inertsiyal'noy navigatsionnoy sistemy na osnove resheniya mnogoparametricheskoy optimizatsionnoy zadachi [Methodology of forming requirements for the correction system of an inertial navigation system based on the solution of a multiparametric optimization problem], *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and Information Technologies], 2018, Vol. 6, No. 4, pp. 381-392.
22. Emel'yantsev G.I., Stepanov A.P., Blazhnov B.A. O reshenii navigatsionnoy zadachi dlya letatel'nykh apparatov s ispol'zovaniem inertsiyal'nogo modulya na mikromekhanicheskikh datchikakh i nazemnykh radioorientirov [On the solution of the navigation problem for aircraft using an inertial module on micromechanical sensors and ground-based radio orientators], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and Navigation], 2017, Vol. 2, pp. 3-17.
23. Daftry Sh., Dey D., Sandhawalia H., Zeng S., Bagnell J.A., Hebert M. Semi-Dense Visual Odometry for Monocular Navigation in Cluttered Environment, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2015.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Капустян.

Костюков Владимир Александрович – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: vakostukov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; к.т.н.; доцент; с.н.с.

Косенко Евгений Юрьевич – e-mail: ekosenko@sfedu.ru; к.т.н.; доцент; с.н.с.

Медведев Михаил Юрьевич – e-mail: medvmihal@sfedu.ru; д.т.н.; в.н.с.

Пшихопов Вячеслав Хасанович – e-mail: pshichop@rambler.ru; д.т.н.; профессор; директор.

Мамченко Марк Владиславович – Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук; e-mail: markmamcha@gmail.com; г. Москва, Россия; тел.: 84953348910; научный сотрудник.

Kostjukov Vladimir Aleksandrovich – R&D Institute of Robotics and Control Systems; e-mail: vakostukov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694; cand. of eng. sc.; associate professor; senior researcher.

Kosenko Evgeny Yurevich – e-mail: ekosenko@sfnedu.ru; cand. of eng. sc.; associate professor; senior researcher.

Medvedev Mikhail Yurjevich – e-mail: medvmihal@sfnedu.ru; dr. of eng. sc.; leading researcher.

Pshikhov Viacheslav Khasanovich – e-mail: pshichop@rambler.ru; dr. of eng. sc.; professor; director.

Mamchenko Mark Vladislavovich – V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; e-mail: markmamcha@gmail.com; Moscow, Russia; phone: +74953348910; researcher.

УДК 004

DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-218-235

Ю.Н. Кочеров, Д.В. Самойленко**РАЗРАБОТКА НАДЕЖНОГО МЕТОДА СВЯЗИ РТК НА БАЗЕ
ГРУППОВОГО МЕТОДА РАЗДЕЛЕНИЯ ДАННЫХ, ОСНОВАННОГО
НА СИСТЕМЕ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ**

В работе рассматривается надежный метод передачи данных в системах связи и управления роботехническими комплексами. В связи с тем, что изменение части закодированной информации передаваемой по каналам связи может привести к частичной или полной потере данных и, как следствие, привести к потере контроля над роботехническим комплексом. Следовательно, необходимо применять методы защиты данных, передаваемых по радиоканалам. Предлагаемый метод предназначается для обеспечения защиты информации в каналах связи роботехнических комплексов от доступа несанкционированных пользователей и подтверждения достоверности полученной информации. В статье исследуются методы защиты данных, предназначенных для защиты информации, циркулирующей в системах образованных несколькими взаимодействующими агентами. Рассматриваемый подход базируется на методах защиты информации и помехоустойчивого кодирования основанных на системе остаточных классов. Применяемые методы помехоустойчивого кодирования, основанные на системе остаточных классов, базируются на идее порогового разделения данных, в которых исходную информацию можно восстановить имея k из n частей исходной информации. Это связано с тем, что избыточная модулярная арифметика, или избыточная система остаточных классов, обладает уникальными свойствами относительно обнаружения и коррекции ошибок. Кроме того, система остаточных классов обладает таким преимуществом как низкая вычислительной сложность алгоритмов разделения данных. Для увеличения надежности связи роботехнических комплексов в мультиканальных системах связи в работе предложен метод защиты информации и помехоустойчивого кодирования, основанный на многоступенчатом пороговом разделении данных. В результате работы получена система помехоустойчивой передачи информации, обеспечивающая комплексную защиту роботехнических комплексов.

Система остаточных классов; надежность передачи данных; пороговое разделение данных; обеспечение надежной связи роботехнических комплексов.

Y.N. Kocherov, D.V. Samoylenko**DEVELOPMENT OF A RELIABLE RTC COMMUNICATION METHOD
BASED ON A GROUP DATA SEPARATION METHOD BASED
ON A RESIDUAL CLASS SYSTEM**

The paper considers a reliable method of data transmission in communication systems and control of robotic complexes. Due to the fact that a change in part of the encoded information transmitted through communication channels can lead to partial or complete loss of data and, as a consequence, lead to loss of control over the robotic complex. Therefore, it is necessary to ap-