



РАДИОСИСТЕМА НАВЕДЕНИЯ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОСАДКИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА САМОЛЕТНОГО ТИПА НА ДВИЖУЩЕЕСЯ ТРАНСПОРТНОЕ СРЕДСТВО

А.Ю. Гетманцев¹, ✉ А.И. Горох¹, Н.В. Тихомиров²

¹Филиал «Взлет» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» в г. Ахтубинске,
г. Ахтубинск, Россия

²Государственный летно-испытательный центр им. В.П. Чкалова Минобороны России,
г. Ахтубинск, Россия

✉ toma1mens1@mail.ru

Цитирование: Гетманцев А.Ю., Горох А.И., Тихомиров Н.В. Радиосистема наведения и автоматической посадки беспилотного летательного аппарата самолетного типа на движущееся транспортное средство // Труды МАИ: электрон. журнал. № 147. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188111>

Аннотация. В статье приведены результаты синтеза состава радиотехнической системы, обеспечивающей автоматическое наведение на конечном участке траектории и высокоточную посадку беспилотного летательного аппарата на высокоманевренное автономное роботизированное транспортное средство-носитель. Это позволяет, например, существенно расширить зону поиска в ходе проведения поисково-спасательных операций при возникновении чрезвычайных ситуаций за счет многократного использования одного и того же беспилотного летательного аппарата. Обосновывается важная роль интеграции функциональных возможностей наземных и воздушных роботизированных систем. Показано, что предварительное наведение беспилотного летательного

аппарата самолетного типа на подвижную цель, находящуюся на большом расстоянии, возможно на основе данных спутниковых навигационных систем решением стандартной штурманской задачи вывода самолета в заднюю полусферу движущейся цели. Рассмотрены классификации классических методов наведения и самонаведения летательных аппаратов, выполнен их сравнительный анализ. По его результатам сделан вывод о том, что только метод погони позволяет решить поставленную задачу полностью автоматической посадки при любом начальном ракурсе летательного аппарата относительно транспортной платформы. Показано, что на малых расстояниях погрешность спутниковой навигации превышает допустимые значения, поэтому используется второй, более точный на незначительных дистанциях уровень наведения – радиотехническая система ближнего наведения. Приведено обоснование и расчеты сложной составной антенной системы передатчика, а также показана структурная схема радиотехнической системы высокоточного наведения беспилотных летательных аппаратов самолетного типа для посадки на движущиеся высокоманевренные роботизированные автомобили. Изложены основные положения фазового метода пеленгации, позволяющего выполнить с требуемой точностью измерение направления в пространстве на транспорт-носитель.

В развитие данной темы проведен анализ перспективных методов посадки и удержания беспилотных летательных аппаратов на борту роботизированного транспорта-носителя после касания беспилотным летательным аппаратом посадочной платформы. Кроме того, приведено описание типовых функций, которые осуществляются на роботизированной платформе после удержания и фиксации беспилотного летательного аппарата.

Ключевые слова: система наведения; роботизированный автомобиль; беспилотный летательный аппарат самолетного типа.

RADIO-GUIDED AND AUTOMATIC LANDING SYSTEM FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES ON MOVING VEHICLES

A.Yu. Getmantsev¹, **A.I. Gorokh¹**, **N.V. Tikhomirov²**

¹Vzlet Branch of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“Moscow Aviation Institute (National Research University)” in Akhtubinsk,
Akhtubinsk, Russia

²State Flight Test Center V.P. Chkalova Ministry of Defense of Russia,
Akhtubinsk, Russia

✉ toma1mens1@mail.ru

Citation: Getmantsev A.Yu., Gorokh A.I., Tikhomirov N.V. Radio-guided and automatic landing system for unmanned aerial vehicles on moving vehicles // Trudy MAI. 2026. No. 147. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188111>

Abstract. The article presents the results of the synthesis of the composition of the radio engineering system, which provides automatic guidance at the final stage of the trajectory and a high-precision landing of an unmanned aerial vehicle on a highly maneuverable autonomous robotic carrier vehicle. This allows, for example, to significantly expand the search area during search and rescue operations in emergency situations by repeatedly using the same unmanned aerial vehicle. The article substantiates the importance of integrating the functionality of ground-based and aerial robotic systems. It is shown that the preliminary guidance of an unmanned aircraft-type vehicle to a moving target located at a long distance is possible on the basis of data from satellite navigation systems by solving the standard navigational problem of bringing the aircraft to the rear hemisphere of the moving target. The classifications of classical methods of guidance and homing of aircraft are considered, and their comparative analysis is performed. Based on the results, it is concluded that only the pursuit method allows for the complete automatic landing of the aircraft at any initial angle relative to the transport platform. It is shown that at short distances, the error of satellite navigation exceeds the permissible values, so a second, more accurate level of guidance is used at short distances – a radio-technical system of close guidance. The justification and calculations of a complex composite antenna system of the transmitter are given, and the block diagram of a radio-technical system of high-precision guidance of aircraft-type unmanned aerial vehicles for landing on moving highly maneuverable robotic vehicles is shown. The basic provisions of the phase method of direction finding are presented,

which allows the required accuracy to be achieved in measuring the direction in space to the carrier vehicle.

In the development of this topic, an analysis of promising methods for landing and holding unmanned aerial vehicles on board a robotic carrier vehicle after the unmanned aerial vehicle touches the landing platform is carried out. In addition, a description of typical functions that are performed on the robotic platform after the unmanned aerial vehicle is held and fixed is provided.

Keywords: guidance system; robotic car; and aircraft-type unmanned aerial vehicle.

Введение

С развитием автоматизации и роботизации все активнее становится вопрос интеграции новых роботизированных систем с уже существующими системами и комплексами различного назначения [2, 5, 12]. Это дает возможность получить новые свойства или значительно расширить область применения уже успевших хорошо себя зарекомендовать систем, комплексов и устройств [7-8, 10-11, 18].

Острым является вопрос объединения возможностей, которые дает беспилотный летательный аппарат (БЛА) или беспилотное воздушное судно [17], и достоинств подвижного транспортного средства (автомобиль, катер и т.д.), выступающего в качестве взлетно-посадочной платформы этого БЛА. Таким транспортным средством может быть, например, пожарный автомобиль, на который устанавливается БЛА для разведки пожарной обстановки и воздушного поиска пострадавших [7-8].

Другой пример – автомобиль наземной поисково-спасательной команды, на крыше кузова которого устанавливается платформа для обеспечения автоматического взлета и посадки поискового БЛА во время движения автомобиля, в том числе с максимальной скоростью.

БЛА самолетного типа отличаются примерно в 10 раз большей продолжительностью полета по сравнению с БЛА мультикоптерного типа аналогичной массы и запаса топлива. Посадку эти БЛА обычно осуществляют на парашюте, на взлетно-посадочную полосу или в улавливающую сетку.

Актуальным является вариант применения БЛА самолетного типа для решения задачи поиска людей, пострадавших, например, в авиационной катастрофе небольшого пилотируемого летательного аппарата в лесистой местности.

При этом необходимо обеспечивать доставку БЛА в район и из района поиска, многократно проводить автоматическую дозарядку (дозаправку) БЛА, исключив остановку поискового автомобиля и не затрачивая время на подбор приземлившегося БЛА. После этого БЛА должен будет продолжить поиск после самостоятельного взлета с взлетно-посадочной платформы.

Беспилотный летательный аппарат ввиду своих значительных массогабаритных и энергетических ограничений не может самостоятельно, без роботизированного наземного транспорта с мощным резервным энергетическим обеспечением, провести поиск пострадавших людей на заданных расстояниях (не менее 50-100 км) в течении всего светлого времени суток (не менее 8-12 часов), и при этом передавать широкополосный видеосигнал с заданной мощностью и требуемым качеством.

Современный уровень развития беспилотной авиации позволяет проводить запуск БЛА с мобильных носимых или стационарных устройств, при этом посадка БЛА проводится на выбранную точку земной поверхности в ручном или автоматическом режиме. И если пуск БЛА с подвижного транспортного средства возможен по аналогии с пуском со стационарного устройства, то автоматическое наведение и точная посадка БЛА на движущийся транспорт с целью перезарядки и его повторного использования мало проработан.

В данной статье исследуется вопрос формирования структуры комплексной радиосистемы управления (наведения) беспилотным летательным аппаратом как самолетного, так и вертолетного (квадрокоптерного) типа, на транспортно-носитель, а также определение функционала радиосистемы для автоматической посадки БЛА на площадку, располагаемую в верхней части движущегося высокоманевренного транспортного средства.

В соответствии с теорией, управление движением беспилотного летательного аппарата или транспортного средства разделяется на управление

перемещением центра масс объекта (управление полетом, управление передвижением транспорта) и управление поворотом БЛА и транспортного средства относительно своих центров масс (управление ориентацией) для придания им необходимой траекторной или взаимной ориентации в момент посадки БЛА на транспортное средство [1, 3, 6, 9, 14].

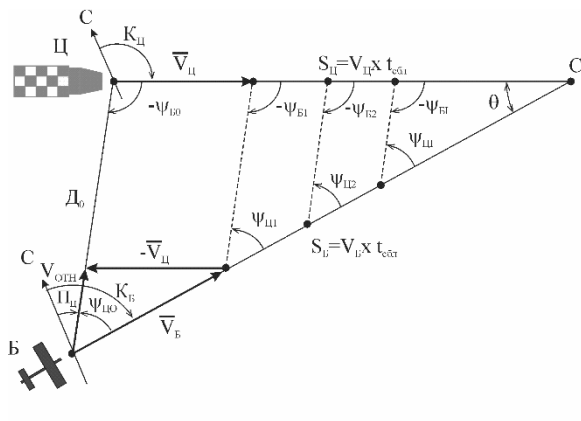
Безусловно, самым простым для анализа является следующий случай:

- БЛА управляется автоматически;
- предстоит посадка на автоматически управляемый транспорт-носитель, например, автомобиль (катер и т.п.);
- управление ими обоими осуществляется из одного пункта управления;
- ориентация автомобиля и БЛА не имеет значения (если БЛА мультикоптерного типа, и посадка происходит на круглую площадку).

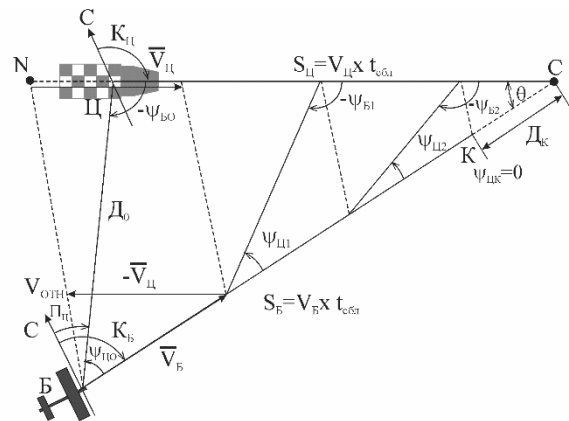
В этом случае алгоритм наведения должен включать следующие операции:

- определение текущих координат БЛА и транспортного средства;
- выбор одного из способов наведения (рисунок 1) БЛА и транспортного средства в одну точку («Параллельное сближение», «Прямое сближение», «Погоня», «Маневр» или «Трехточечный метод») [16];
- формирование вектора наведения в местной системе координат - задание скоростных параметров управляемого транспортного средства или определение фактических скоростных параметров движения неуправляемого транспортного средства;
- моделирование траектории движения БЛА по всем трем проекциям местной системы координат для каждого момента времени до момента посадки включительно;
- непрерывный контроль процесса наведения в ходе сближения и компенсация нештатных отклонений;
- фиксация момента фактического выполнения посадки.

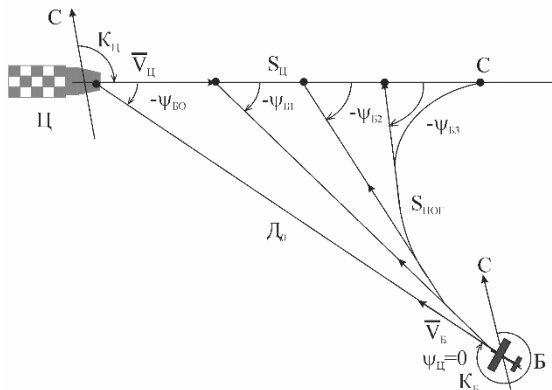
В случае отсутствия единого пункта управления вычислительное устройство БЛА самостоятельно осуществляет поиск и самонаведение на транспорт-носитель по одному из пяти вышеперечисленных методов на основе поступающей информации.



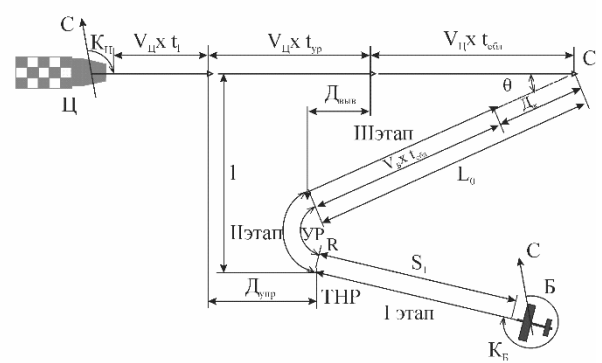
а) параллельное сближение



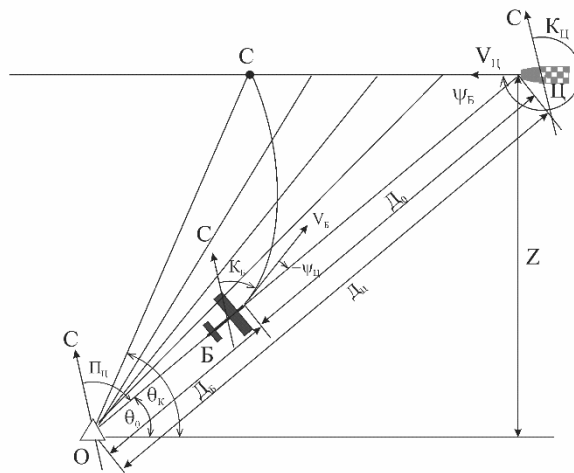
б) прямое сближение



в) погоня



г) маневр



д) трехточечный метод

Рисунок 1 – Методы наведения

Разрабатываемая система автоматического наведения использует самонаведение как основной способ управления (формирования посадочной траектории) БЛА. Самонаведением называется способ радиуправления, при котором команда управления формируется в вычислительном устройстве БЛА на основе информации (о взаимном положении и движении БЛА и транспорта-

носителя (цели)), содержащейся в сигнале, поступающем на вход приёмника БЛА [14, 19].

В зависимости от места расположения источника энергии, создающего сигналы, поступающие от цели в режиме самонаведения, различают три вида самонаведения – активное, полуактивное и пассивное. Пассивное самонаведение использует излучение самой цели – движущегося транспортного средства. Это соответствует актуальной задаче повышения автономности робототехнических средств. Они должны быть работоспособны в реальных условиях частичного или даже полного отсутствия информации об окружающей обстановке [9, 11] – помехи или сбой сигналов спутниковой навигационной системы, туман, задымленность и т.д. Разработка новых эффективных способов автоматического управления робототехническими комплексами, к которым также относятся БЛА, возможна только с использованием беспроводных каналов радиосвязи.

Реализация каналов автоматического управления и обмена данными между БЛА и транспортом-носителем невозможна на базе открытых стандартов связи (Wi-Fi, WiMax, Bluetooth, DVB-T и др.) ввиду их явных недостатков:

- низкая имитостойкость (неустойчивость к имитационным помехам, имеющим одинаковую с полезным сигналом структуру и параметры) ввиду большого количества абонентов, одновременно работающих на этих стандартах связи;

- низкая устойчивость к воздействию иных помех;

- отсутствие защищенных (скрытых) режимов работы;

- низкая надежность и пропадание радиосвязи в условиях пересеченной местности и городской застройки;

- низкая криптографическая стойкость (информационная безопасность), поскольку информация об этих открытых стандартах легкодоступна для злоумышленников;

- повышение мощности применяемого для обмена информацией передатчика приводит к подавлению сигналов других абонентов сети.

Типовые требования к беспроводным каналам управления и передачи данных между подвижными и высокоманевренными объектами, следующие:

- значительная асимметричность прямого канала (передачи данных с БЛА) и обратного канала (управления БЛА) по скорости передачи информации;
- достаточно высокая скорость передачи данных в прямом канале (до десятков и сотен Мбит/сек) требует применения несущих частот в несколько ГГц, что приводит к необходимости увеличения мощности передатчика БЛА в связи с ухудшением условий прохождения радиоволн с увеличением частоты (особенно в гигагерцовом диапазоне);
- необходимость автоматического изменения мощности передатчиков прямого и обратного каналов для обеспечения требуемого энергетического потенциала при увеличении (уменьшении) расстояния до БЛА либо при возрастании (уменьшении) мощности радиопомех;
- применение сложных широкополосных (шумоподобных) сигналов для повышения скрытности и электромагнитной совместимости;
- минимальные (не более 100 мкс) задержки в каналах для решения задачи активного управления системой наведения в режиме реального времени, особенно при значительном (многократном) различии скоростей движения БЛА и транспорта-носителя в процессе наведения и особенно в момент посадки;
- необходимость работы в сложной электромагнитной обстановке, при наличии естественных и преднамеренных помех, а также в условиях многолучевого распространения сигналов в гигагерцовом диапазоне частот;
- необходимость режимов адаптации по пропускной способности и частоте излучения в зависимости от помеховой обстановки и дальности радиоуправления;
- возможность оперативного переключения радиосистем в рамках нескольких частотных диапазонов [7];
- необходимость режимов псевдослучайной перестройки рабочей частоты, что обеспечит уменьшение вероятности временного контакта или взаимных помех от различных радиосистем [18];
- необходимость режимов многоабонентного обслуживания при наличии нескольких БЛА на борту одного транспорта-носителя или нескольких однотипных носителей с БЛА в данном регионе.

Для определения координат каждого из движущихся средств могут быть применены системы определения собственных или взаимных координат различных видов [2, 13]:

- спутниковая навигационная система;
- радиомаячно-пеленгационная навигационная система;
- радиолокационная система;
- радиотехническая навигационная система, например, приемо-передающая радиосистема наведения с дискретно-изменяемой диаграммой направленности широкополосной передающей антенны;
- оптико-электронная система наведения с распознаванием силуэта транспортного средства;
- лазерная система наведения.

Системы самонаведения различают также по виду энергии или диапазону длин волн, несущих информацию:

- тепловые (инфракрасные);
- радиотехнические (радиолокационные);
- оптические системы.

Каждый из перечисленных видов систем наведения (навигации) имеет как свои достоинства, так и недостатки.

Так, для высокоточного определения координат спутниковой навигационной системе (СНС) необходим дифференциальный режим работы, что требует наличия дополнительного радиоканала для обмена непрерывно уточняемыми координатами движущихся БЛА и транспортного средства. Поэтому СНС целесообразно использовать при больших удалениях (более 1000 м) до транспорта-носителя для грубого наведения БЛА в зону работы высокоточной системы наведения.

Радиомаячно-пеленгационная система для повышения скрытности требует применения специальных сложных широкополосных сигналов, а также наличия на борту БЛА нескольких приемных каналов либо сложной составной антенной решетки с блоком управления сканирующим лучом и блоком анализа получаемой информации.

Оптико-электронная или лазерная системы наведения имеют большие ограничения при движении наземного транспортного средства в условиях отсутствия прямой видимости: в условиях городской застройки (под мостами и т.д.), в условиях бездорожья в пыли, в дожде или в тумане, в лесу или в горах.

Кроме того, оптическая система для работы в автоматическом режиме требует наличия на борту БЛА дорогостоящего и сложного вычислительного устройства, реализующего функцию распознавания образов. Это либо многократно увеличивает стоимость видеосистемы и программно-математического обеспечения каждого БЛА, либо требует наличия дополнительного высокоскоростного передатчика видеопотока на пункт управления.

Инфракрасные (тепловизионные системы) имеют плохую видимость в сложных метеоусловиях. Кроме того, сложно обеспечить скрытную работу системы в ночных условиях (требуется установка энергоемкого подсвечивающего инфракрасного прожектора для определения параметров движения холодного транспорта-носителя).

Применение радиотехнической навигационной системы на расстоянии до нескольких километров является более предпочтительным по сравнению с другими системами [15]. Так, эта система лишена недостатков оптических и лазерных систем, поскольку используется радиоканал, на который не влияют осадки, пыль или туман, лес или городская застройка. Многолучевость, возникающая вследствие переотражения радиоволн от металлических и неметаллических поверхностей крыш, фасадов зданий и т.п. компенсируется дискретным изменением несущей частоты, поскольку замирания вследствие противофазного сложения прямой и переотраженной радиоволны возникают на одной и отсутствуют на другой несущей частоте. Эта радиосистема проще по исполнению, чем радиомаячно-пеленгационная система, поскольку могут использоваться достаточно простые методы, например, моноимпульсный фазовый метод определения направления на источник излучения [15, 20].

При выборе данного метода возможны два варианта передающей антенны, расположенной на наземном подвижном транспорте-носителе: спиральная

антенна с однолепестковой диаграммой направленности или крестообразное расположение 4-х антенн, различных по частоте и фазе (как в курсоглиссальной системе). Предпочтение следует отдать спиральной передающей антенне как более компактной. Данная антенна будет располагаться на крыше транспортного носителя непосредственно возле площадки для посадки и фиксации БЛА. Расчеты показывают, что при работе на несущей частоте 2-2,5 ГГц антенна будет иметь следующие конструктивные характеристики:

- диаметр антенны 100 мм;
- толщина проводника спирали 1 мм;
- количество витков спирали – 3;
- диаметр экранирующего металлического зеркала в плоскости опоры антенны – 360 мм;
- интервал между витками спирали – 10 мм;
- общая толщина антенны около 30 мм;
- возможность установки спиральной антенны на поворотной платформе с углом ее отклонения от вертикали в двух плоскостях до 60 град.

При изменении несущей частоты антенны до 4-6,5 ГГц некоторые из перечисленных конструктивных характеристик изменятся до следующих значений:

- диаметр антенны 20 мм;
- диаметр экранирующего металлического зеркала в плоскости опоры антенны – 160 мм.

Внешний вид антенны с металлическим зеркалом и поворотным основанием приведен на рисунке 2а, трехмерный вид диаграмм направленности (ДН) – на рисунке 2б, сечение ДН – на рисунке 2в. Расчеты были выполнены с помощью пакета Antenna Toolbox системы MATLAB.

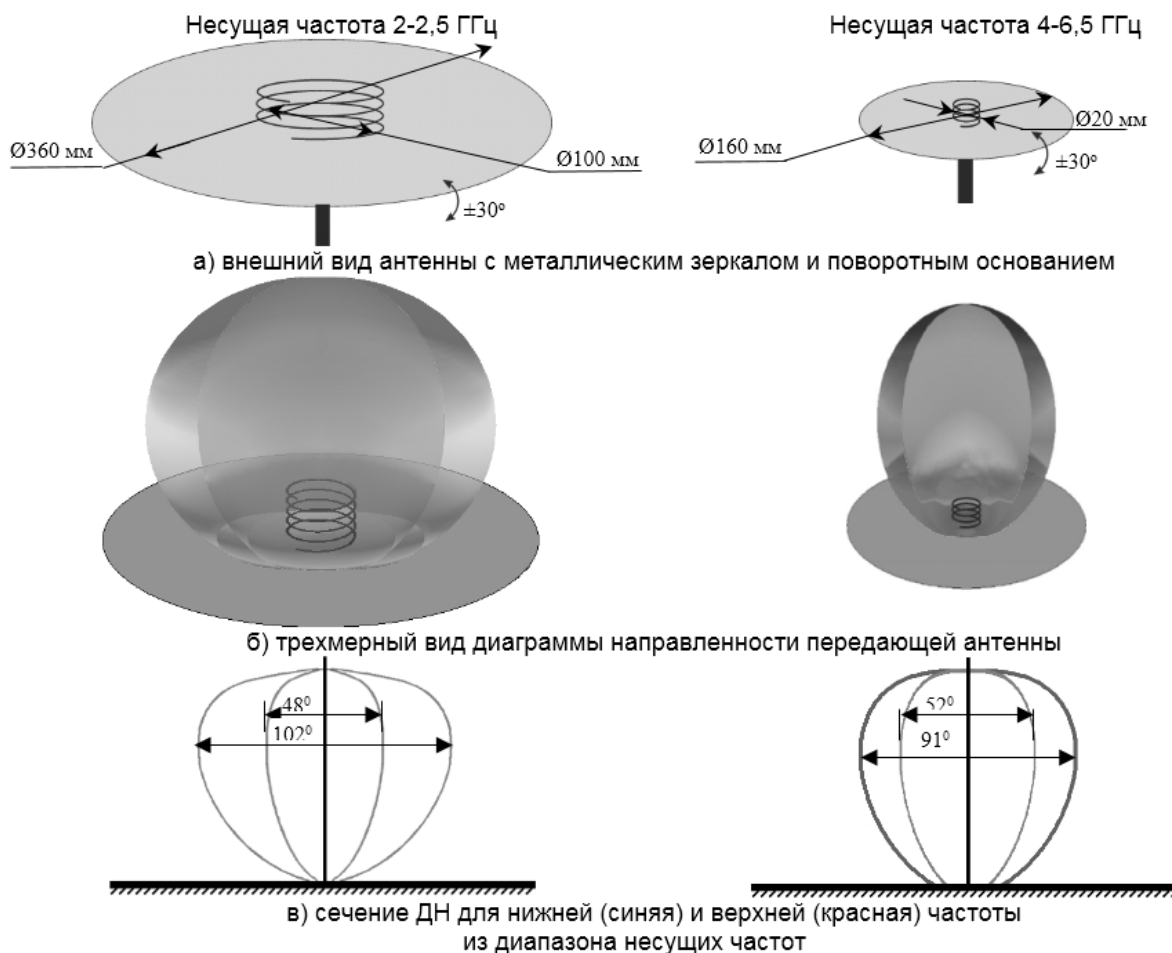


Рисунок 2 – Параметры передающей антенны

Рассмотрим далее первый вариант антенны при несущей частоте передатчика 2-2,5 ГГц.

Спиральная антенна для качественного наведения должна иметь дискретно меняющуюся ДН для рабочих частот в указанном диапазоне, шаг изменения частоты 100 МГц, скорость изменения – не менее 10 полных циклов за одну секунду. Расчеты показали, что ширина основного лепестка диаграммы направленности антенны на несущей частоте 2 ГГц по уровню 0,7 составляет 102°, на несущей частоте 2,5 ГГц – всего 48°.

Второй вариант антенны при несущей частоте передатчика 4-6,5 ГГц, по выполненным расчетам имеет следующие характеристики диаграммы направленности:

- на несущей частоте 4 ГГц ширина ДН по уровню 0,7 равна 91 градусу;
- на несущей частоте 6,5 ГГц ширина ДН равна 52 градуса.

Примененный тип спиральной антенны с отражающим зеркалом имеет весьма незначительный уровень боковых лепестков в диаграмме направленности антенны, поэтому ими в дальнейшем можно пренебречь [4].

Наклон антенны вместе с зеркалом в направлении ожидаемого местоположения БЛА в диапазоне $\pm 60^\circ$ позволяет устранить «мертвую зону» на околонулевых углах относительно вертикально расположенной антенны.

При работе рассмотренной антенны должны быть выполнены мероприятия по электромагнитной совместимости с аппаратурой транспорта-носителя, работающей в данном диапазоне частот или на кратных им частотах.

Определение угловых координат направления на источник радиоизлучения проводится измерением амплитуды или фазы проходящих сигналов. Поэтому соответствующие методы радиопеленгации носят название амплитудных и фазовых методов [4, 15].

Фазовые методы основаны на измерении разности фаз электромагнитных колебаний, принимаемых двумя разнесёнными в пространстве антеннами (рисунок 3).



Рисунок 3 – Принцип работы фазовых методов пеленгации

Фазовый метод пеленгования объекта для двух ненаправленных приёмных антенн A_1 и A_2 состоит в следующем. Расстояние между антеннами (называемое базой) равно d , пеленгуемый объект удалён от центра базы на расстояние $D \gg d$. В этом случае направления прихода сигналов от объекта к антеннам A_1 и A_2 можно

считать параллельными. Разность расстояний, проходимых моноимпульсной радиоволной к каждой антенне, равна

$$\Delta D = D_2 - D_1 = d \cdot \sin \alpha ,$$

где α – угол между направлением на объект и нормалью к базе, проходящей через её середину.

Зная задержку прихода сигналов Δt между антеннами A_1 и A_2 , можно определить направление на передающую антенну.

$$\Delta D = \Delta t \cdot c.$$

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{\Delta D}{d} \right) = \arcsin \left(\frac{\Delta t \cdot c}{d} \right),$$

где c – скорость распространения радиоволн в воздушном пространстве ($3 \cdot 10^8$ м/с).

Если длина волны принимаемых колебаний равна $\lambda_{и}$ или их частота равна $f_{и}$, то разность фаз φ колебаний, возбуждаемых в антеннах A_1 и A_2 , будет равна:

$$\varphi = 2\pi \frac{\Delta t \cdot c}{\lambda_{и}} = 2\pi f_{и} \Delta t.$$

Если известна разность фаз (при условии $\varphi \leq 2\pi$), то направление на передающую антенну определяется по формуле:

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{\lambda_{и} \cdot \varphi}{2\pi \cdot d} \right).$$

Для реализации фазового метода пеленгации на приёмной стороне (т.е. на БЛА), необходимо расположить систему щелевых антенн, состоящую из 2 вертикальных и 2 горизонтальных четвертьволновых антенн. Каждая приемная антенна должна быть размером:

- а) 7,5 см для работы в полосе несущих частот от 2 до 2,5 ГГц;
- б) 3,75 см для работы в полосе несущих частот от 4 до 6,5 ГГц.

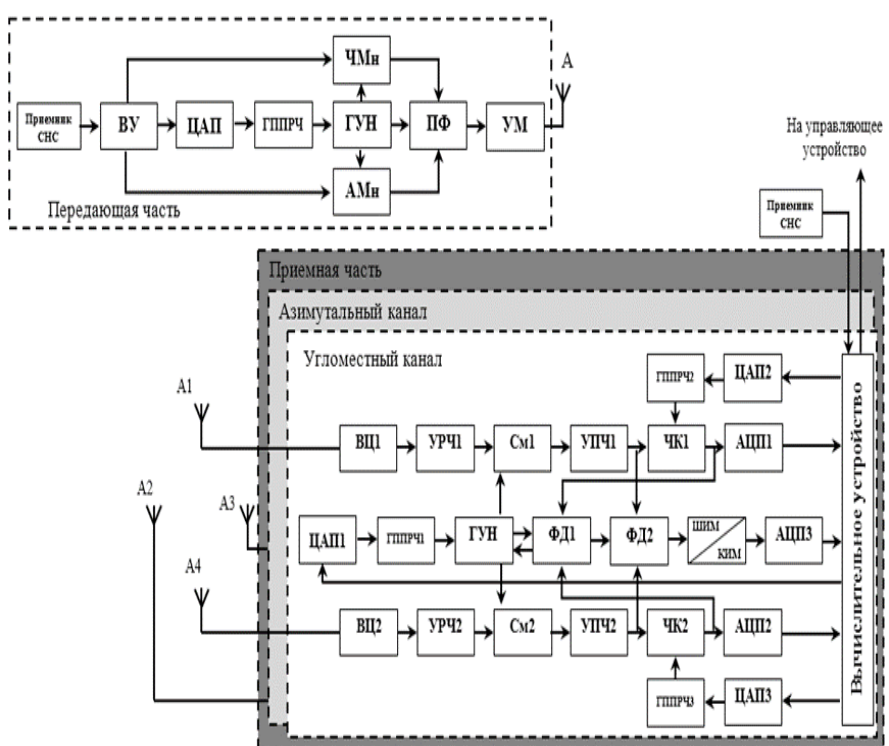
Ввиду особенностей фазового метода должна применяться частотная модуляция моноимпульсного радиосигнала, что также хорошо согласуется с дискретным изменением ДН передающей антенны.

При необходимости с транспорта-носителя на борт БЛА с помощью децентрализованных протоколов маршрутизации [18] может передаваться дополнительная закодированная информация:

- а) адрес БЛА-получателя информации;
- б) сигнал опознавания «свой-чужой»;
- в) собственные значения скорости и координат транспорта-носителя;
- г) информация для согласования других параметров движения;
- д) собственный идентификатор транспорта-носителя;
- е) идентификатор предпочтительной посадочной платформы (при наличии нескольких);
- ж) текущее время сообщения.

Поэтому в дополнение к частотной модуляции попеременно следует использовать амплитудную манипуляцию с кадровой передачей вышеперечисленных данных, при этом могут использоваться те же спиральная передающая антенна и четвертьволновые щелевые приемные антенны.

Структурная схема многоуровневой архитектуры системы наведения и автоматической посадки БЛА на движущееся транспортное средство приведена на рисунок 4.



АМн – амплитудный модулятор (манипулятор);
 АЦП – аналогово-цифровой преобразователь;
 ВУ – вычислительное устройство;
 ВЦ – входная цепь;
 ГППРЧ – генератор псевдослучайно-перестраиваемой рабочей частоты;
 ГУН – генератор, управляемый напряжением;
 КИМ – кодово-импульсный модулятор;
 ПФ – полосовой фильтр;
 См – смеситель;
 СНС – спутниковая навигационная система;
 УМ – усилитель мощности;
 УПЧ – усилитель промежуточной частоты;
 УРЧ – усилитель радиочастоты;
 ФД – фазовый детектор;
 ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;
 ЧК – частотный коммутатор;
 ЧМн – частотный модулятор (манипулятор);
 ШИМ – широтно-импульсный модулятор.

Рисунок 4 – Структурная схема многоуровневой архитектуры системы наведения БЛА

Таким образом, приём сигнала будет делиться на три этапа: первый – приём амплитудно-манипулированного сигнала, направляемого для подстройки генератора приемника; второй – приём частотно-модулированного сигнала, направляемого в фазовые детекторы для определения пеленга на транспорт-носитель; третий – приём амплитудно-манипулированного сигнала, содержащего дополнительную закодированную информацию.

Безусловно, комбинация нескольких видов систем определения собственных или взаимных координат даст намного большую точность наведения и расширит радиус действия многоуровневой радиосистемы, чем предоставит по отдельности каждый вариант, но имеющиеся ограничения БЛА по массе, энергетике и фактическим условиям эксплуатации существенно снижают реальные возможности по комплексированию.

Вопросы определения параметров движения, алгоритма наведения по выбранному способу, расчета вектора движения и его проекций в местной для БЛА системе координат достаточно хорошо уже изучены (смотри, например, [13]), поэтому дальнейшее рассмотрение будет посвящено системе автоматической посадки БЛА на подвижный транспорт-носитель для значительного увеличения кратности применения БЛА.

После вывода БЛА в заданные координаты пространства с требуемой точностью и заданными значениями линейных и угловых скоростей, а также углов ориентации БЛА относительно транспорта-носителя, должны быть решены две задачи:

- 1) задача полного поглощения (гашения) остаточной кинетической энергии БЛА в момент посадки при сохранении его механической целостности;
- 2) жесткая фиксация БЛА на борту транспорта-носителя.

Основные способы посадки БЛА [19] могут быть сведены к следующим типовым схемам:

- а) посадка по-самолетному;
- б) посадка по-вертолетному;
- в) посадка с использованием парашюта;

г) посадка в улавливающее устройство (аэрофинишер, вертикальные или горизонтальные сети, посадочная «корзина» и т.д.).

Посадка на движущееся транспортное средство по-самолетному предполагает движение БЛА относительно транспорта-носителя по касательной траектории, с выравниванием их скоростей. При этом БЛА в непосредственной близости от объекта посадки может перейти в режим управляемого планирования по петле Жуковского для получения околонулевой скорости (меньшей, чем скорость устойчивого полета).

Способ посадки по-вертолетному обеспечивает выполнение посадки беспилотным мультикоптером, конвертопланом или вертолетом с околонулевой разностной скоростью на движущееся транспортное средство. Однако использование БЛА самолетной схемы является более предпочтительным из-за выигрыша в 7-10 раз по продолжительности и дальности полета, по массе перевозимого целевого оборудования (груза).

К существенным недостаткам парашютного способа относится низкая относительная точность приземления БЛА вследствие ветровых возмущений, из-за которых может потребоваться посадочная площадка больших размеров, что исключает возможность посадки БЛА на транспорт-носитель.

Главное преимущество схемы посадки в улавливающее устройство состоит в компактности посадочного места (области пространства), что позволяет ее осуществлять, например, на транспортное средство, на небольшие открытые участки местности в непосредственной близости от него.

Констатация момента посадки может осуществляться контактными (типа выключатель, датчик давления и др.) либо бесконтактными датчиками (магнитными, индукционными или фотодатчиками).

В момент их срабатывания при касании БЛА транспорта-носителя начинает выполняться алгоритм посадки, включающий в себя следующие действия:

- захват (механический, магнитный, пневматический и т.д.) БЛА;
- центрирование БЛА в удерживающем устройстве;

- оценка уровня топлива, заряда аккумуляторов;
- при необходимости дозаправка БЛА топливом или дозарядка/замена аккумуляторов;
- изъятие груза с БЛА, доукомплектование БЛА грузом;
- диагностирование систем и комплексов БЛА, проверка их работоспособности;
- получение информации с бортового устройства регистрации или системы бортовых измерений для проверки работоспособности всех систем БЛА во время прошедшего полета;
- считывание полетной видеоинформации, записанной на борту БЛА на накопитель в очень высоком качестве (4К, например), поскольку ее проблематично передать по радиоканалу на большое расстояние в режиме реального времени;
- пополнение БЛА израсходованными материалами в зависимости от его предназначения (например, дозаправка пеной и водой пожарных БЛА, химическими реагентами БЛА, предназначенного для обработки сельскохозяйственных посевов, спасательными средствами различного назначения и т.д.).

Безусловно, рассмотренные выше способы захвата касаются в первую очередь БЛА мультикоптерного или вертолетного типов, которые имеют возможность точно выровнять свою скорость и координаты в соответствии с параметрами движения транспорта-носителя.

Варианты посадки в удерживающее устройство для БЛА самолетного или конвертопланного типов следующие:

- 1) БЛА должен попасть в ловушку (например, в форме полусферы или корзины), предварительно погасив свою скорость, например, выполнив петлю Жуковского;
- 2) зацепиться крюком за натянутый над транспортом-носителем трос, как это уже реализовано для посадки пилотируемых самолетов на авианосец;

3) попасть на посадочные направляющие типа «ласточкин хвост», где скорость гасится трением, пружинами или электромагнитами.

В момент остановки производится центрирование БЛА в удерживающем устройстве одновременно с подключением к коммуникационным устройствам транспорта-носителя и последующим выполнением оставшихся операций алгоритма посадки.

Заключение

Рассмотренный способ наведения и точной посадки БЛА обеспечивает его посадку на движущееся транспортное средство в автоматическом автономном режиме при минимуме используемого дополнительного бортового радиоэлектронного оборудования. Тем самым становится возможным реализовать необходимый посадочный ракурс захода БЛА на транспорт-носитель в любых метеоусловиях. При этом гарантируются низкая вероятность повреждения БЛА при использовании амортизирующих и удерживающих устройств, что в совокупности значительно расширяет потенциальные возможности транспорта-носителя и повышает функциональные свойства БЛА, в первую очередь, за счет высокой кратности его применения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Авиационные системы радиоперехвата / Под ред. В.И. Меркулова. - М.: Издательство ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, 2008. 423 с.

2. Ануфриев О.Н., Герасимов А.А., Меркулов В.И., Самарин О.Ф., Чернов В.С. Ударные беспилотные летательные аппараты и их радиолокационные системы // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 7. С. 51-65.
3. Аюпов А.И., Детков А.Н., Кожухов И.В. «Метод наведения беспилотного летательного аппарата на подвижную наземную групповую цель для её поражения неуправляемыми авиационными бомбами». -Вооружение и экономика №1 (55) / 2021 г.
4. Гришин Ю.П., Ипатов В.П., Казаринов Ю.М., Коломенский Ю.А., Ульяницкий Ю.Д. Радиотехнические системы / М.: Изд-во «Высшая школа», 1990. 496 с.
5. Гусейнова Р.О., Гумбатов Д.А. Оптимизация концептуальной разработки беспилотных летательных аппаратов. Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 136, 2024 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://trudymai.ru/upload/iblock/94b/osobennosti-proektirovaniya-bespilotnykh-aviatsionnykh-sistem-novogo-pokoleniya.pdf?lang=ru&issue=47> (дата обращения: 20.07.2025).
6. Детков А.Н., Трегубенков С.Ю. Радиолокационно-спутниковая система наведения ракет класса «воздух-поверхность» на наземные цели // Общероссийский научно-технический журнал «Полёт». 2019. № 11. С. 20-27.
7. Задачи группового управления роботами в робототехническом комплексе пожаротушения / В.Ф. Петров и др. // Труды СПИИРАН. - 2016. - № 2(45). - С. 116-129.
8. Задорожный А.М., Гетманцев А.Ю. Особенности разработки командной радиолинии управления роботизированным авиатопливозаправщиком // Труды МАИ. 2025. № 140. [Электронный ресурс].URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184063> (дата обращения: 20.07.2025).
9. Информационно-измерительные и управляющие радиоэлектронные системы и комплексы / Под ред. В.С. Вербы. - М.: Радиотехника, 2020. 490 с.

10. Каримов А.Х. Особенности проектирования беспилотных авиационных систем нового поколения. Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 47, 2011 г. [Электронный ресурс]. URL: https://trudymai.ru/upload/iblock/29e/go4khofk76uudd32xeg1wua9nu2tlzmf/20_Guseynova_Gumbatov684.pdf?lang=ru&issue=136 (дата обращения: 20.07.2025).
11. Комплексное использование разнородных каналов связи для управления робототехническими комплексами на базе единой системы радиомониторинга / П.А. Будко и др. // Научные исследования в космических исследованиях Земли. - 2017. - № 1. - С. 18-41.
12. Коротков М.В., Гетманцев А.Ю. Особенности радиосистемы управления целевым оборудованием беспилотного летательного аппарата – высотного монтажника // Труды МАИ. 2025. № 141. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184502> (дата обращения: 20.07.2025).
13. Математическое обеспечение испытаний летательных аппаратов (Методологические основы испытаний сложных систем) / Иванющенко А.С., Козлов Н.Н., Соколюк В.Л. Второе издание. - М. Технологии информационных систем, 2003 -324 с.
14. Мубаракшин Р.В. Комплексное наведение летательных аппаратов и отделяемых средств. - М.: Машиностроение, 1990. 271 с.
15. Основы радиоуправления. Под ред. В.А.Вейцеля и В.Н.Типугина. Учебное пособие для вузов. М., «Советское радио»,1973, 464 с.
16. Паньков С.Я. Теория и методика управления авиацией: учеб. пособие. В 2 ч. Ч.1 / С.Я. Паньков, Ю.Е. Забураев, А.М.Матвеев; под общ. ред. В.А.Мещерякова. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2006. – 190 с.
17. Порядок использования воздушного пространства РФ беспилотными воздушными судами (БВС, БПЛА, беспилотники, дроны) // Федеральное агентство воздушного транспорта (Росавиация) Министерства транспорта Рос. Федерации. URL: <https://favt.gov.ru/poryadok-ispolzovaniya-bespilotnyh-vozdychnih-sudov> (дата обращения: 03.07.2025).

18. Проблемы совместного использования пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов в единых сетях обмена информацией / А.А.Сулима, П.А.Зац // Труды XX Российской межведомственной научно-технической конференции «Новые информационные технологии в системах связи и управления», 9 сентября 2021 г. – г.Калуга: изд-во «Ноосфера», 2021 г.- 526 с. ISBN 978-5-6045517-6-9. Стр.63-65.

19. Системы адаптивного управления летательными аппаратами. / Новоселов А.С., Болнокин В.Е., Чинаев П.И., Юрьев А.Н. - М. Машиностроение, 1987. 280 с.

20. Ярлыков М.С., Богачев А.С., Меркулов В.И., Дрогалин В.В. Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов. Т. 2. Применение авиационных радиоэлектронных комплексов при решении боевых и навигационных задач / Под ред. М.С. Ярлыкова. - М.: Радиотехника, 2012. 256 с.

References

1. Aviation radio control systems / Edited by V.I. Merkulov. - М.: Publishing House of the VVIA named after Professor N.E. Zhukovsky, 2008. 423 p. (in Russian),

2. Anufriev O.N., Gerasimov A.A., Merkulov V.I., Samarin O.F., Chernov V.S. Strike Unmanned Aerial Vehicles and Their Radar Systems // Advances in Modern Radioelectronics. 2007. No. 7. Pp. 51-65.

3. Ayupov A.I., Detkov A.N., Kozhukhov I.V. "The method of aiming an unmanned aerial vehicle at a mobile ground group target for its destruction by unguided aerial bombs". -Armament and Economy No. 1 (55) / 2021. (in Russian),

4. Grishin Yu.P., Ipatov V.P., Kazarinov Yu.M., Kolomenskiy Yu.A., Ulyanitsky Yu.D. Radio engineering systems / Moscow: Publishing House "Higher School", 1990. 496 p. (in Russian),

5. Guseinova R.O., Gumbatov D.A. Optimization of the Conceptual Development of Unmanned Aerial Vehicles. Electronic Journal «Proceedings of the Moscow Aviation Institute». Issue No. 136, 2024 [Electronic resource]. URL:

<https://trudymai.ru/upload/iblock/94b/osobennosti-proektirovaniya-bespilotnykh-aviatsionnykh-sistem-novogo-pokoleniya.pdf?lang=ru&issue=47> (accessed: 20.07.2025).

6. Detkov A.N., Tregubenkov S.Yu. Radar-Satellite System for Guiding Air-Surface Missiles at Ground Targets // All-Russian Scientific and Technical Journal "Flight". 2019. No. 11. Pp. 20-27.

7. Tasks of group control of robots in a robotic fire extinguishing complex / V.F. Petrov [et al.] // Proceedings of SPIIRAN. - 2016. - № 2(45). - Pp. 116-129. (in Russian),

8. Zadorozhny A.M., Getmantsev A.Yu. Development features Command radio control of a robotic aircraft tanker. Trudy MAI. 2025. No. 140. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184063>(date of reference: 07/20/2025).

9. Information-measuring and control radio-electronic systems and complexes / Edited by V.S. Verba. - M.: Radio Engineering, 2020. 490 p. (in Russian),

10. Karimov A.Kh. Features of Designing New Generation Unmanned Aerial Systems. Electronic journal «Proceedings of the Moscow Aviation Institute». Issue No. 47, 2011 [Electronic resource]. URL: https://trudymai.ru/upload/iblock/29e/go4khofk76uudd32xeg1wua9nu2tlzfn/20_Guseynova_Gumbatov684.pdf?lang=ru&issue=136 (date of reference: 07/20/2025).

11. Complex use of heterogeneous communication channels for controlling robotic complexes based on a single radio monitoring system / P.A. Budko et al. // High-tech technologies in space research of the Earth. - 2017. - No. 1. - pp. 18-41. (in Russian),

12. Korotkov M.V. and Getmantsev A.Yu. Features of the Radio System for Controlling the Target Equipment of an Unmanned Aerial Vehicle – High-Altitude Installer. Proceedings of the Moscow Aviation Institute. 2025. No. 141. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184502> (accessed: 20.07.2025).

13. Mathematical support for testing aircraft (Methodological foundations of testing complex systems) / Ivanyushchenko A.S., Kozlov N.N., Sokolyuk V.L. Second edition. - M. Technologies of information systems, 2003 -324 p. (in Russian),

14. Mubarakshin R.V. Complex guidance of aircraft and detachable means. - M.: Mashinostroenie, 1990. 271 p. (in Russian),
15. Fundamentals of radio control. Edited by V.A.Veitzel and V.N.Tipugin. Textbook for universities. M., "Soviet radio", 1973, 464 p(in Russian),
16. Pankov S.Ya. Theory and methodology of aviation management: textbook. stipend. At 2 h. h.1 / S.Ya. Pankov, Yu.E. Zaburaev, A.M. Matveev; under the general editorship of V.A. Meshcheryakov. – Ulyanovsk: UVAU GA, 2006. – 190 p. (in Russian),
17. The procedure for using the airspace of the Russian Federation by unmanned aircraft (UAVs, UAVs, drones, drones) // Federal Air Transport Agency (Rosaviation) of the Ministry of Transport of the Russian Federation. Federation. URL: <https://favt.gov.ru/poryadok-ispolzovaniya-bespilotnyh-vozdychnih-sudov> (date of reference: 03.11.2022). (in Russian),
18. Problems of joint use of manned and unmanned aerial vehicles in unified information exchange networks / A.A.Sulima, P.A.Zats // Proceedings of the XX Russian Interdepartmental Scientific and Technical Conference "New information technologies in communication and control systems", September 9, 2021 - Kaluga: Noosphere Publishing House, 2021 G.- 526s. ISBN 978-5-6045517-6-9. Pp.63-65. (in Russian),
19. Systems of adaptive control of aircraft. / Novoselov A.S., Bolnokin V.E., Chinaev P.I., Yuryev A.N. - M. Mashinostroenie, 1987. 280 p. (in Russian),
20. Yarlykovich M.S., Bogachev A.S., Merkulov V.I., Drogalin V.V. Radio-electronic complexes of navigation, aiming and armament control of aircraft. Vol. 2. Application of aviation radio-electronic complexes in solving combat and navigation tasks / Edited by M.S. Labels. - M.: Radio Engineering, 2012. 256 p. (in Russian)

Информация об авторах

Алексей Юрьевич Гетманцев, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Радиоэлектронные системы и комплексы летательных аппаратов» филиала «Взлет» МАИ, г. Ахтубинск, Россия; e-mail: toma1mens1@mail.ru

Артур Игоревич Горох, старший преподаватель кафедры «Радиоэлектронные системы и комплексы летательных аппаратов» филиала «Взлет» МАИ, г. Ахтубинск, Россия.

Никита Владимирович Тихомиров, специалист Государственного летно-испытательного центра им. В.П. Чкалова (ГЛИЦ им.В.П.Чкалова) Минобороны России, г. Ахтубинск, Россия.

Information about the authors

Alexey Yu. Getmantsev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Radioelectronic Systems and Aircraft Complexes of the Vzlet Branch of Moscow Aviation Institute in Akhtubinsk, Akhtubinsk, Russia; e-mail: toma1mens1@mail.ru

Artur I. Gorokh – Senior Lecturer of the Department of Radioelectronic Systems and Aircraft Complexes of the Vzlet Branch of Moscow Aviation Institute in Akhtubinsk, Akhtubinsk, Russia.

Nikita V. Tikhomirov – specialist of the State Flight Test Center named after V.P. Chkalov (GLIC named after V.P. Chkalov) of the Russian Ministry of Defense, Akhtubinsk, Russia.

Получено 01 декабря 2025 ● Принято к публикации 09 марта 2026 ● Опубликовано 30 апреля 2026
Received 01 December 2025 ● Accepted 09 March 2026 ● Published 30 April 2026
