



Научная статья

УДК 621.396.9

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189152>

EDN: <https://www.elibrary.ru/IKSIWJ>

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ МАЛОГАБАРИТНОЙ РАДИОСИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОСАДКИ БЕСПИЛОТНОГО КВАДРОКОПТЕРА

Т.М. Чопанов, А.Ю. Гетманцев ✉

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

✉ toma1mens1@mail.ru

Цитирование: Чопанов Т.М., Гетманцев А.Ю. Особенности разработки малогабаритной радиосистемы автоматической посадки беспилотного квадрокоптера // Труды МАИ: электрон. журнал. № 149. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189152>

Аннотация. В статье рассмотрены технические вопросы создания малогабаритной радиосистемы автоматической посадки беспилотных летательных аппаратов мультикоптерного типа на высокоскоростные транспортные средства, например, на квадроциклы. Выполнен анализ новых потенциальных возможностей, которые возникают при таком способе посадки в движении, проведено сравнение с существующими способами посадки. Рассмотрены недостатки док-станций для дронов. Показаны достоинства, которые дает радиосистема высокоточной автоматической посадки беспилотных летательных аппаратов на подвижный квадроцикл, в том числе при его крене. Обосновывается, что разрабатываемая радиосистема посадки относится как к навигационной системе, так и к системе радиоуправления. Для повышения радиуса действия радиосистемы посадки она комплексируется со спутниковыми навигационными системами для грубого наведения в зону высокоточной посадки. Проведен анализ дополнительных требований, которые накладываются на

беспилотный летательный аппарат мультикоптерного типа при выполнении им аварийно-специальных операций. Дополнительно описаны требования по защите конструкции, его винтов и радиосистемы посадки от повреждений в момент касания посадочной платформы. Выбраны и рассчитаны антенные системы передатчика и приемника рассматриваемой радиосистемы. Обосновано применение амплитудного метода наведения, аналогичного курсоглиссадному методу. Подробно проанализированы уровни сигналов крестообразной диаграммы направленности. Обоснована несущая частота передатчика и выбран комплексный метод модуляции шести радиоканалов. Приведено обоснование сложной диаграммы направленности антенной системы передатчика, а также расчеты выходной мощности, несущей частоты и модулирующей частоты формирующих ее радиоканалов. Рассчитаны геометрические размеры антенной волноводной системы, определено необходимое количество щелей антенны. Изложена структурная схема радиоканала управления автоматической посадкой беспилотного летательного аппарата. Детально рассмотрены другие особенности передатчика радиосистемы.

Ключевые слова: автоматизированная посадка; радиоуправление; сложная диаграмма направленности антенны.

FEATURES OF DEVELOPING A SMALL-SIZED AUTOMATIC LANDING RADIO SYSTEM FOR AN UNMANNED QUADROPTER

T.M. Chopanov, A.Yu. Getmantsev ✉

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

✉ toma1mens1@mail.ru

Citation: Chopanov T.M., Getmantsev A.Yu. Features of developing a small-sized automatic landing radio system for an unmanned quadcopter // Trudy MAI. 2026. No. 149. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189152>

Abstract. The article discusses the technical issues of creating a small-sized radio system for automatic landing of multicopter-type unmanned aerial vehicles (UAVs) on high-speed vehicles, such as ATVs. The article analyzes the new potential opportunities that arise from this method of landing while in motion and compares it with existing methods of landing. The article also discusses the disadvantages of drone docking stations. The article highlights the advantages of using a radio system for high-precision automatic landing of UAVs on a moving ATV, including when the ATV is tilted. It is substantiated that the developed landing radio system belongs to both the navigation system and the radio control system. To increase the range of the landing radio system, it is combined with satellite navigation systems for rough guidance to the high-precision landing zone. The analysis of additional requirements imposed on the multi-rotor UAV during emergency and special operations is carried out. Additionally, the requirements for protecting the UAV structure, propellers, and landing radio system from damage during the touchdown on the landing platform are described. The antenna systems of the transmitter and receiver of the considered radio system are selected and calculated. The application of an amplitude guidance method similar to the course-glide method is substantiated. The levels of signals from a cross-shaped radiation pattern are analyzed in detail. The carrier frequency of the transmitter is substantiated, and a complex modulation method for six radio channels is selected. The paper provides a justification for the complex radiation pattern of the transmitter antenna system, as well as calculations of the output power, carrier frequency, and modulating frequency of the radio channels that form it. The geometric dimensions of the antenna waveguide system are calculated, and the required number of antenna slots is determined. The paper presents a structural diagram of the radio channel for controlling the automatic landing of an UAV. Other features of the radio system transmitter are discussed in detail.

Keywords: automated landing; radio control; complex antenna pattern.

Введение

В настоящее время в России активно работают предприятия по созданию беспилотных летательных аппаратов (БЛА, дронов) различного функционального назначения. Наблюдается некоторое отставание от передовых иностранных

разработок в этой области, поэтому российским производителям необходимо активно завоёвывать рынок дронов в России и мире, разрабатывать и производить БЛА с расширенной гаммой функциональных возможностей. В этом случае они будут способны создать конкуренцию для аппаратов таких передовых международных компаний-производителей, как NVIDIA, 3D Robotics, Boeing, Lockheed Martin Corporation, Northrop Grumman Corporation (США), DJI Innovations (Китайская Народная Республика), Elbit Systems Ltd. (Израиль), Yamaha (Япония) и многих других [14]. Возможности использования дронов, как и других высокотехнологичных разработок, весьма ограничены их тактико-техническими характеристиками (ТТХ). Увеличить конкурентоспособность и укрепиться на рынке БЛА можно не только улучшением их ТТХ [18], но и созданием новых multifunctional возможностей БЛА.

Одной из глобальных проблем при выполнении БЛА поиска и проведения аварийно-спасательных работ является отсутствие возможности автоматической посадки БЛА на подвижную платформу-носитель. Такая быстрая посадка необходима для оперативной замены аккумуляторов или заправки топливом, замены израсходованных токсичных материалов (например, пожарных реагентов или сельскохозяйственных ядохимикатов против саранчи) и грузов (медикаментов, кислородных аппаратов и др.), экстренной доставки самого БЛА в следующую точку его работы в условиях ограниченного времени выполнения поставленной задачи.

В настоящее время БЛА мультикоптерного типа возвращаются только в неподвижную точку взлета, а БЛА самолетного типа обычно спускаются на парашюте в указанном районе. В этом случае речь не идет об автоматической посадке на высокودинамичный объект. Требуется человек с квалификацией не ниже техника, чтобы безопасно поймать дрон, перезарядить его, приготовить к повторному запуску. Тем самым происходит потеря ценного времени – до получаса на каждом перезапуске дрона. Сейчас также используются беспарашютные способы посадки БЛА на вертикальные, горизонтальные или наклонные сетки, однако и в этом случае требуется техник, чтобы распутать и вытащить дрон из сетки.

Таким образом, высокоточная посадка БЛА является важным технологическим процессом, который должен самостоятельно выполняться дроном с использованием малогабаритной радиосистемы автоматической посадки. В настоящее время такие системы неизвестны широкому кругу эксплуатантов БЛА, проводятся только теоретические исследования или разрабатываются единичные образцы неподвижных док-станций [2-3, 6-8,12-15].

В настоящей статье объектом исследования являются дроны, самостоятельно наводящиеся на посадочную точку и выполняющие автоматическую посадку на высокодинамичную платформу, имеющую значительный крен и скорость во время движения (рисунок 1). Предмет исследования – это радиолиния автоматического управления посадкой БЛА мультикоптерного типа с углубленной детализацией передающей части данной радиолинии.

Тема статьи имеет высокую актуальность и практическую значимость, поскольку разрабатываемая радиосистема освобождает человека-оператора от необходимости спешиваться с транспортного средства и с земли производить операции по посадке дронов. При этом транспортные средства (автомобили, квадроциклы, катера, транспортные роботы и т.д.) получают возможности визуальной разведки местности, поиска людей и предметов, доставки малогабаритных грузов в цикловом режиме практически неограниченное время без участия человека.



Рисунок 1 – Применение автоматической радиосистемы посадки БЛА на движущийся объект

Новизна темы статьи заключается в создании перспективных способов наведения БЛА, оснащенного приемником сигналов управления, на посадочную площадку с передатчиком этих сигналов. Использование современных элементов цифровой радиотехники позволяет резко повысить уровень роботизации БЛА.

Разрабатываемая радиосистема автоматической посадки одновременно является как радионавигационной системой, так и системой радиоуправления. Основное отличие этих двух типов радиосистем друг от друга в следующем:

- радионавигационная система предназначена для определения местоположения объектов. Она помогает определить текущие навигационные параметры полёта, такие как пространственное положение, высота полёта, курс, скорость, время полёта и другие [9];

- система радиоуправления предназначена для изменения состояния управляемого объекта. Она формирует и передаёт команды управления на объект [11].

Разрабатываемая радиосистема автоматической посадки является системой радиоуправления, в которую входят система радионавигации, система формирования и передачи команд управления [1].

Анализ классификационных группировок радионавигационных методов показывает, что разрабатываемая радиосистема автоматической посадки БЛА мультикоптерного типа для точного наведения должна использовать автономные радиотехнические методы навигации, применяемые в системах инструментальной посадки, с предварительным наведением БЛА в зону посадки по GPS/ГЛОНАСС.

Использование автономной радиосистемы посадки, в отличие от других способов навигации и передачи команд управления посадкой БЛА, обладает большими преимуществами. По сравнению с GPS/ГЛОНАСС-системами, у нее высокая точность (по угловым координатам – несколько градусов, что при высоте полета в несколько метров соответствует нескольким сантиметрам). По сравнению с системами ультразвукового и инфракрасного наведения может работать на необорудованных территориях, внутри или и вне помещений, в условиях пыли и дождя. Если оснастить передающую антенную систему

поворотной платформой, получается наклонный управляющий луч, который может работать в заданном направлении на требуемой дальности на открытой местности или в помещениях, даже без предварительного наведения БЛА на посадку по GPS/ГЛОНАСС. По сравнению с технологиями автоматической посадки при помощи технического зрения, искусственного интеллекта и нейросетей, разрабатываемая радиосистема является простой, всепогодной и малоразмерной, не требует избыточных вычислительных мощностей, и поэтому она является сравнительно дешевой.

При использовании профессиональных БЛА мультикоптерного типа для обеспечения, например, в МЧС, задач поиска и проведения аварийно-спасательных работ, на радиосистему посадки накладываются следующие особенности:

- установка передающей части радиосистемы посадки на подвижные транспортные средства с бортовым напряжением питания 12 В, приемной части радиосистемы - на крупные и средние дроны с напряжением аккумуляторов 8,4 В или 15,2 В;

- в случае жестко закрепленной антенны передатчика на посадочной платформе необходимо предварительное наведение БЛА, которое может осуществляться по GPS/ГЛОНАСС-координатам с погрешностью в несколько десятков метров при высоте полета несколько сотен метров;

- возможность наведения и плавной посадки БЛА по сложной криволинейной траектории на высокодинамичный объект с постепенным уменьшением высоты по методу «погоня» [10];

- возможность аппаратно-программной интеграции радиосистемы посадки со штатной системой радиоуправления дроном;

- соосность продольных осей БЛА и посадочной платформы в момент посадки для требуемой ориентации БЛА в горизонтальной плоскости (важно для БЛА без центральной симметрии);

- совместимость конструктивного исполнения всей радиосистемы посадки с используемыми на БЛА системой защиты винтов от столкновений [17].

Защитная конструкция квадрокоптеру нужна для защиты лопастей и моторов при посадке, так как в случае падения или столкновения удар

приходится на винты, моторы и лучи, что приводит к их частой поломке (рисунок 2).



а) дуговая защита



б) корпусная защита



в) сферическая защита



г) защита типа «клетка»

Рисунок 2 – Системы защиты винтов.

Актуальные вариации защиты:

- дуговая защита, которая является самым простым и лёгким по массе вариантом. Ее элементы крепятся на лучах под моторами и защищают винты БЛА за счёт своей упругости;

- корпусная защита, которая крепится по всему корпусу квадрокоптера, защищая не только моторы, но и раму в целом. По сравнению с предыдущим вариантом, данная защита более эффективна при прямых столкновениях дрона с объектами, ветками деревьев и стенами;

- сферическая защита предотвращает столкновение коптера по всем осям и направлениям, но минус данной защиты – её масса;

- защита типа «клетка» имеет мелкоячеистую сетку в основе своей конструкции. Надевается на моторы как клетка, защищая винты от попадания в них объектов.

Также есть активная система защиты, которая состоит из пластикового контура с датчиком, устанавливаемого на ось вращения винта. Если какой-либо посторонний предмет приближается к вращающемуся винту, то сначала

происходит касание контура, и микропроцессор управления по сигналу датчика за несколько сотых долей секунды успевает остановить винт дрона [17].

В разрабатываемой радиосистеме посадки используется симплексная (однонаправленная) передача данных, на основании которых в приемнике БЛА формируются команды управления. Две пары приемных антенны радиосистемы устанавливаются на перпендикулярных лучах дрона или на системе защиты и являются полуволновыми вибраторами длиной до 2 см.

Для предварительного наведения БЛА в область посадки от передатчика квадроцикла к приемнику дрона один раз в секунду поступают GPS/ГЛОНАСС координаты (погрешность без высокоточной коррекции порядка 50 м). Для передачи этих данных используется один из шести радиоканалов.

При выборе передающей антенной системы возможны два способа наведения БЛА на посадку:

1) фазовым методом в случае посадки на конусный радиолуч, сформированный спиральной антенной с однолепестковой диаграммой направленности;

2) амплитудным методом в случае посадки на крестообразный радиолуч, сформированный крестообразной антенной системой. Составляющие этого луча различаются по времени работы, частоте или фазе сигнала.

С учетом того, что БЛА в момент посадки должен быть строго сориентирован относительно подвижной посадочной платформы, метод посадки с использованием спиральной антенны становится неприменимым.

Разрабатываемая радиосистема автоматической посадки будет угломерного типа, напоминающей курсоглиссадную систему (КГС) [16]. Ее антенная система (АС) будет ориентирована строго вверх (перпендикулярно посадочной платформе). В радиосистеме посадки используется антенная система, формирующая шесть радиолучей (рисунок 3). Для их разделения применяется частотное разделение каналов. Первая группа антенн – продольная, т.е. параллельная продольной оси квадроцикла, будет излучать один непрерывный модулированный радиосигнал с широкой диаграммой направленности (ДН) и пару дискретных (прерывистых) радиосигналов с узкой ДН. Вторая группа антенн

– поперечная, работает аналогично, но ее ДН будут ориентированы в вертикальной плоскости перпендикулярно продольной оси квадроицикла. Таким образом, передатчиком радиосистемы посадки будут формироваться две широких и четыре узких ДН радиосигнала (рисунок 1).

Чтобы точно сориентировать БЛА при посадке, его приемник должен измерять уровни сигналов, модель расположения которых приведена на рисунке 3, а условные значения – в таблице 1.

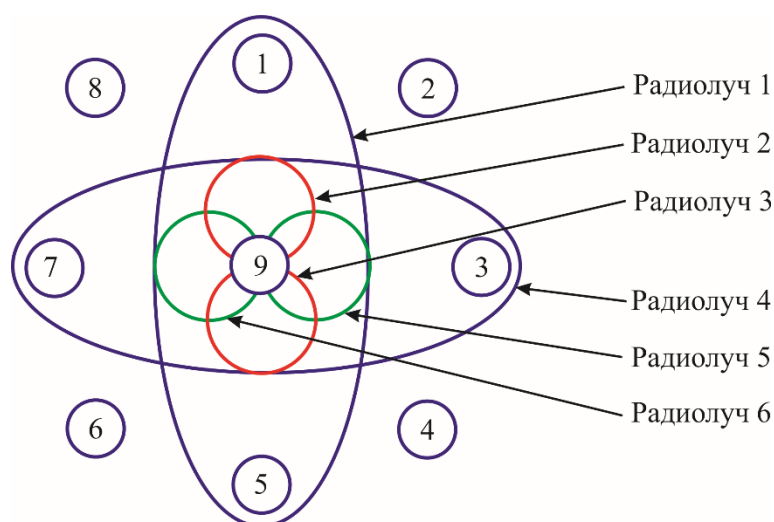


Рисунок 3 - Модель расположения точек измерения уровней сигналов (вид сверху на передатчик)

Таблица 1

Условные уровни сигнала в точках 1-9

Номер точки пространства	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Радиолуч 1	5	2	2	2	5	2	2	2	5
Радиолуч 2	3	3	2	2	1	2	2	3	5
Радиолуч 3	1	2	2	3	3	3	2	2	5
Радиолуч 4	2	2	5	2	2	2	5	2	5
Радиолуч 5	2	3	3	3	2	2	1	2	5
Радиолуч 6	2	2	1	2	2	3	3	3	5

На основе уровня шести принятых приемником радиосистемы посадки радиосигналов вычислительным устройством БЛА формируются команды управления для микропроцессора управления двигателями БЛА. Попадание на посадочную ось (точка пространства №9) соответствует равенству уровней двух сигналов с широкой ДН между собой, а также и четырех сигналов с узкой ДН между собой. Для передатчика были выбраны 3 несущие частоты:

- первого и четвертого радиоканалов - 9,375 ГГц (длина волны 3,2 см);
- второго и пятого радиоканалов - 7,56 ГГц (длина волны 3,97 см);
- третьего и шестого радиоканалов - 11,5 ГГц (длина волны 2,6 см).

Выбор метода модуляции передаваемого радиосигнала определяется совокупностью технических требований, предъявляемыми к радиотехнической системе, и условиями её эксплуатации. Измерение угловых координат источников радиоизлучения может производиться путём измерения амплитуды или фазы приходящих сигналов. Поэтому соответствующие методы радиопеленгации носят название амплитудных и фазовых методов [5]. Ввиду достаточно высокой частоты колебаний (около 10 ГГц) реализация фазового метода является технически затруднительной.

Приемная антенная система, размещаемая на БЛА, может быть реализована на четырех полуволновых вибраторах размером 1,6 см каждый (выбран размер, соответствующий несущей частоте 9,375 ГГц). В качестве передающей антенной системы предлагается использовать волноводно-щелевые антенные решетки. Они позволяют существенно уменьшить габариты антенной системы и создать необходимые узкие или широкие ДН.

Для моделирования применена волноводно-щелевая решетка на основе стандартного трехсантиметрового волновода R-100 с сечением 23x10 мм. Моделирование выполнялось при помощи программы MathCAD версия 15.0. По его результатам ширина ДН первого и четвертого радиолучей на резонансной частоте 9,375 ГГц по уровню половинной мощности составляет 108 градусов. Для излучения каждого радиолуча применяется один щелевой элемент антенны.

При использовании волноводно-щелевой антенны с четырьмя щелевыми элементами ширина ДН резко сужается, а максимум главного луча ДН отклоняется от нормали (рисунок 4):

- на угол минус 18 градусов на частоте 7,56 ГГц,
- на угол 14 градусов – в случае частоты 11,5 ГГц.

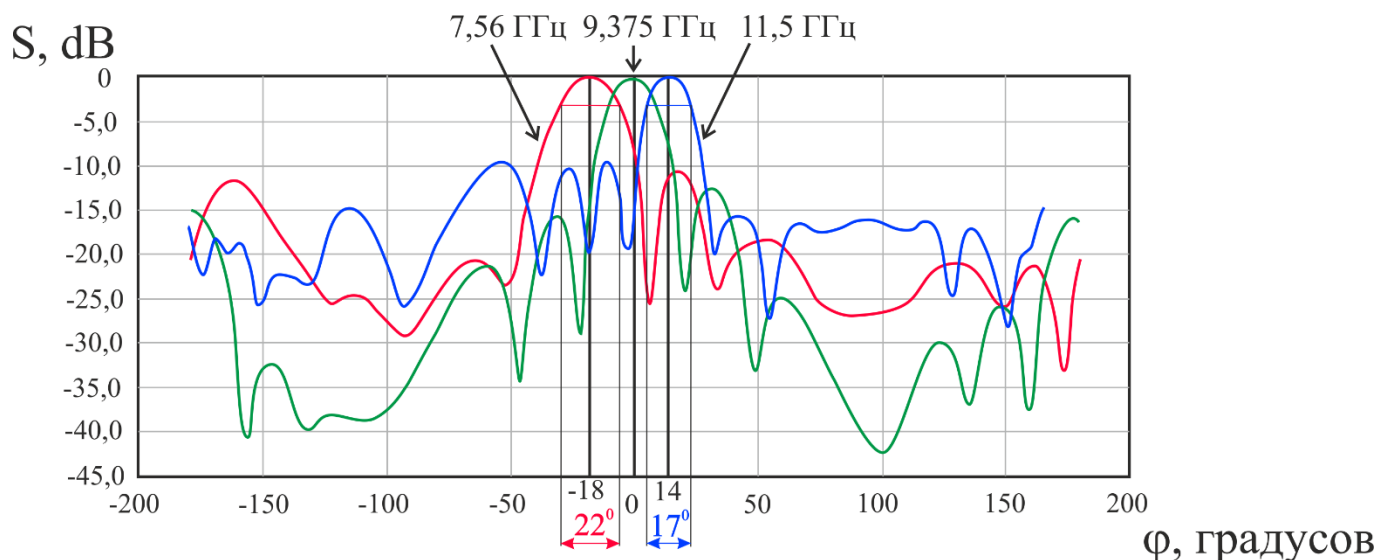


Рисунок 4 - Диаграммы направленности нерезонансной волноводно-щелевой антенной решетки из 4 элементов

Ширины ДН составят соответственно 22 и 17 градусов. Радиолучи с узкими диаграммами направленности работают по очереди в следующем порядке: второй, пятый, третий, шестой. Использование сигналов с дискретным изменением частоты позволяет сформировать требуемую сложную крестообразную диаграмму направленности передающей антенной системы (рис.3). В разрабатываемой радиосистеме посадки для различения радиолучей необходимо использовать амплитудную модуляцию для построения суммарного и разностного каналов в каждой вертикальной плоскости – в продольной и в поперечной.

На рисунке 5 показан вариант итогового проекта технической реализации АС - шесть волноводов на крышке передатчика, образующих две группы антенных систем с взаимно перпендикулярными направлениями поляризации по три волновода в каждой группе. Волновод каждой группы АС работает на своей частоте:

- волновод длиной 9,6 см с одной щелью – на частоте 9,375 ГГц,
- волновод длиной 20,6 см с четырьмя щелями – на частоте 7,56 ГГц;
- волновод длиной 15,7 см с четырьмя щелями – на частоте 11,5 ГГц.

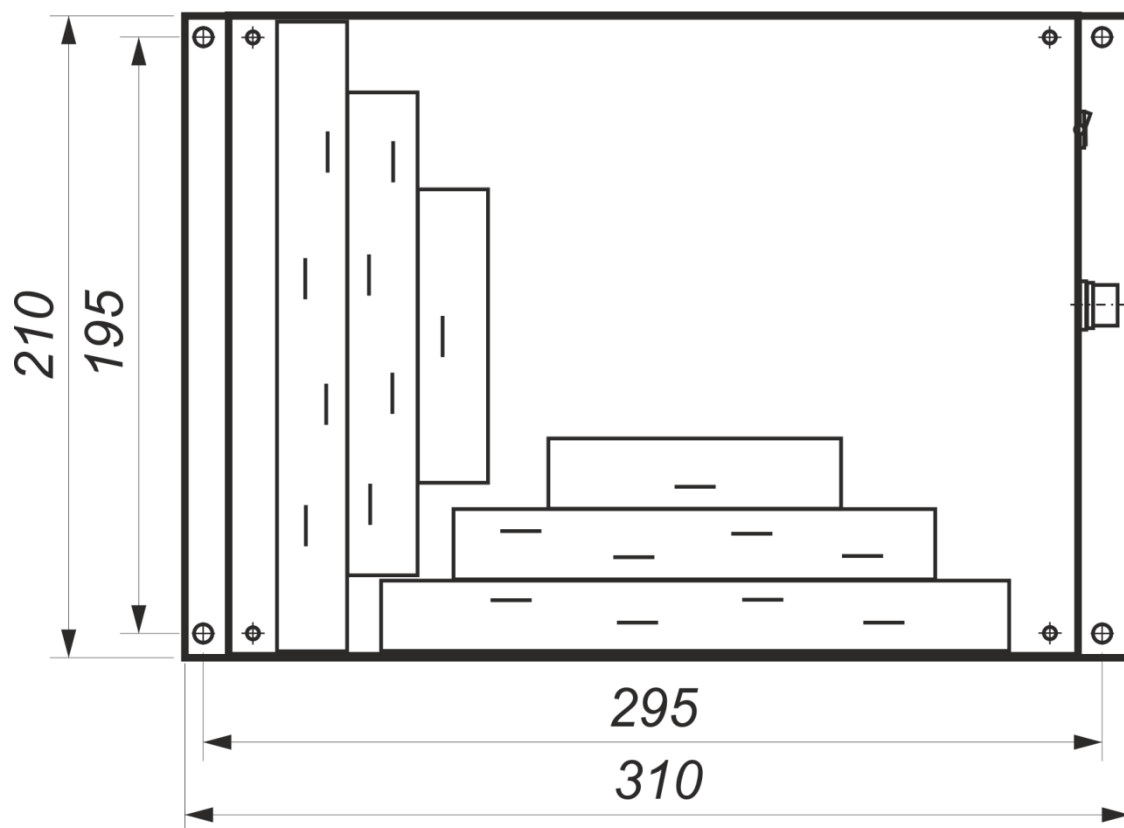


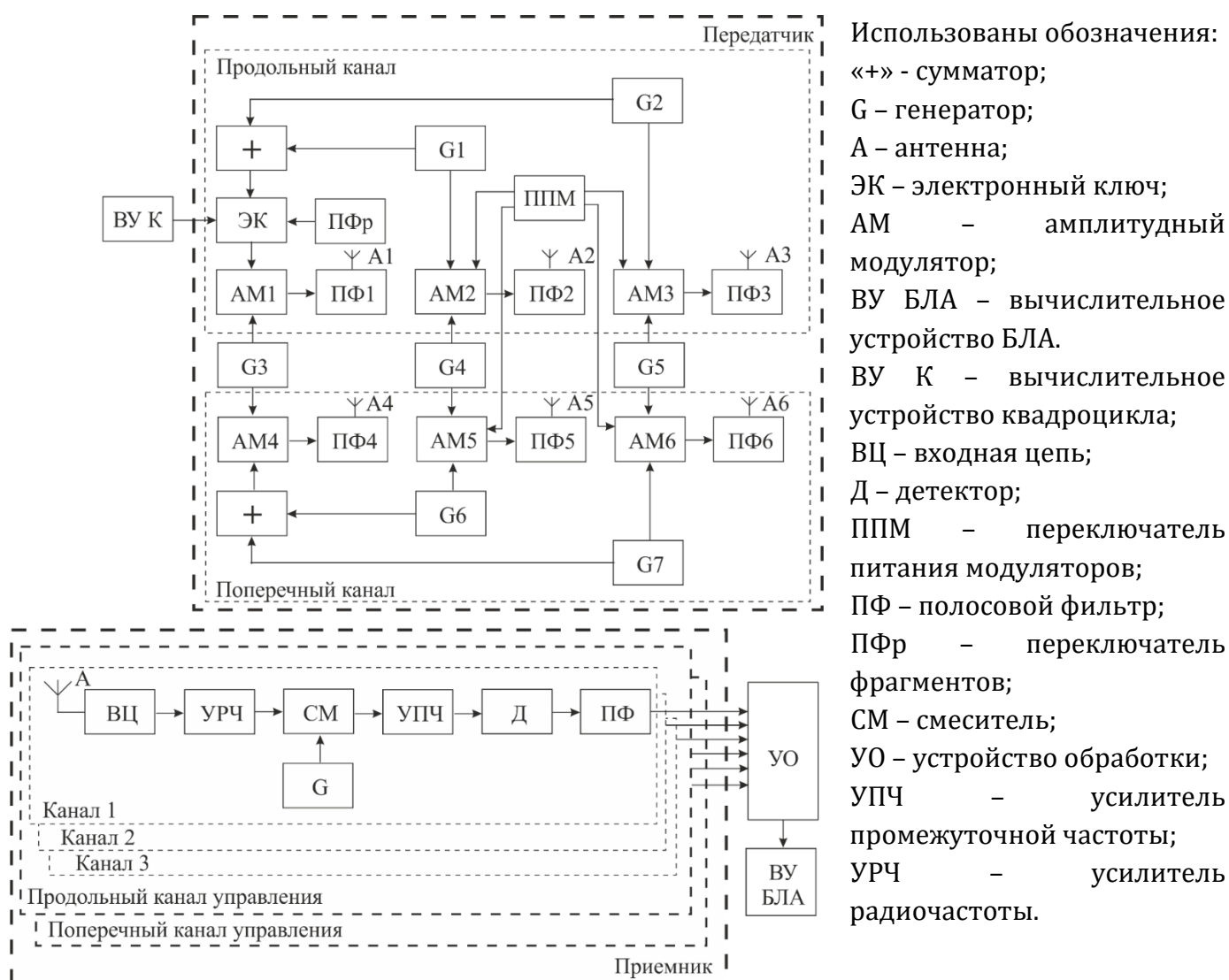
Рисунок 5 – Расположение волноводно-щелевых антенн на крышке передатчика.
Вид сверху

В продольной антенне в широком лепестке диаграммы направленности несущая частота должна быть промодулирована по амплитуде суммой сигналов с частотами 90 и 150 кГц. Два узких лепестка ДН с противофазными сигналами модуляции наклонены соответственно вперед и назад относительно продольной осевой линии. Их несущие радиочастоты должны быть промодулированы по амплитуде сигналами соответственно с частотой 90 и 150 кГц, а сама гармоника несущей частоты подавлена. В поперечной антенне амплитудная модуляция несущей частоты широкого лепестка ДН должна производиться суммой сигналов с частотами 70 и 235 кГц. Два узких лепестка ДН должны быть направлены влево и вправо относительно продольной осевой линии радиосистемы посадки и промодулированы по амплитуде сигналами соответственно с частотой 70 и 235 кГц, а сама гармоника несущей частоты также подавлена. Вспомогательные частоты 70, 90, 150 и 235 кГц выбраны таким образом, чтобы они не были кратными, а также не были кратными их комбинационные частоты.

Если дрон находится точно на пересечении двух узких лепестков поперечной (продольной) диаграммы, глубина непрерывной амплитудной модуляции обоих сигналов одинакова. Разность мощностей узких вспомогательных лучей равна

нулю, а сумма максимальна. Если БЛА отклоняется влево или вправо (вперед или назад для продольной диаграммы), то один сигнал начинает преобладать над другим. Чем дальше от осевой линии, тем больше разность мощностей сигналов с узкой ДН. Знак разности мощностей этих сигналов после демодуляции показывает, в какую сторону имеется пространственное отклонение. Если второй, третий, пятый и шестой радиолучи имеют в приемнике БЛА одинаковую мощность, то посадка происходит строго по посадочной прямой сверху вниз. При этом первый и четвертый радиолучи также будут равны по мощности. Чем ближе БЛА к посадочной платформе, тем выше будет мощность принимаемого сигнала. Поэтому ее уровень можно использовать для ориентировочной оценки высоты полета БЛА.

С учётом вышеизложенного, структурная схема радиосистемы автоматической посадки беспилотных летательных аппаратов будет иметь вид, приведенный на рисунке 6.



Расчеты показывают, что для посадочной дальности 50 м минимально необходимая мощность излучения радиолучей составит:

- для первого и четвертого каналов $P_{\text{ПРД } 1,4} = 2,41$ мВт;
- для второго и пятого каналов $P_{\text{ПРД } 2,5} = 1,56$ мВт;
- для третьего и шестого каналов $P_{\text{ПРД } 3,6} = 3,65$ мВт.

Суммарная мощность передатчиков составит:

$$P_{\text{ПРД}} = 2 \cdot (P_{\text{ПРД } 1,4} + P_{\text{ПРД } 2,5} + P_{\text{ПРД } 3,6}) \approx 15 \text{ мВт.}$$

Получено достаточно малое значение суммарной мощности передатчика. Это обусловлено низким заданным соотношением «сигнал/шум» (100 раз или 20 дБ), небольшим расстоянием (50 м) и рабочими длинами волн передатчика в 3,2 см, 3.97 см и 2,6 см.

Для передачи информационного сигнала, содержащего код и грубые координаты квадроицикла, предлагается сигнал первого радиолуча на несущей частоте 9,375 ГГц дополнительно кратковременно промодулировать кодовой комбинацией при помощи амплитудной-импульсной манипуляции. С целью повышения помехоустойчивости информационный сигнал должен быть закодирован вычислительным устройством квадроицикла, например, помехоустойчивым ортогональным кодом (16, 8).

Минимально необходимое количество информации, передаваемое в пакете данных, определяется следующим образом (рис.7) [4]:

- 8 бит – синхронизация по несущей (СН) без модуляции;
 - 8 бит – идентификатор квадроицикла (I);
 - 24 бита – информация о географической широте (В) с точностью 10 см;
 - 24 бита – информация о географической долготе (L) с точностью 10 см;
 - 12 бит – информация о высоте (Н) с точностью 1 м (в диапазоне от 0 до 4096 м);
 - 28 бит – информация о текущем времени сообщения (Т) с точностью 1 мс.
- Таким образом, объем информации в одной посылке составит (рис.6):

$$n_1 = 8 + 8 + 24 + 24 + 12 + 28 = 104 \text{ (бита)} .$$

Это соответствует 13 информационным посылкам по 8 бит. После кодирования помехоустойчивым ортогональным кодом (16, 8) длина информационного пакета будет равна $n_2 = 208$ бит.

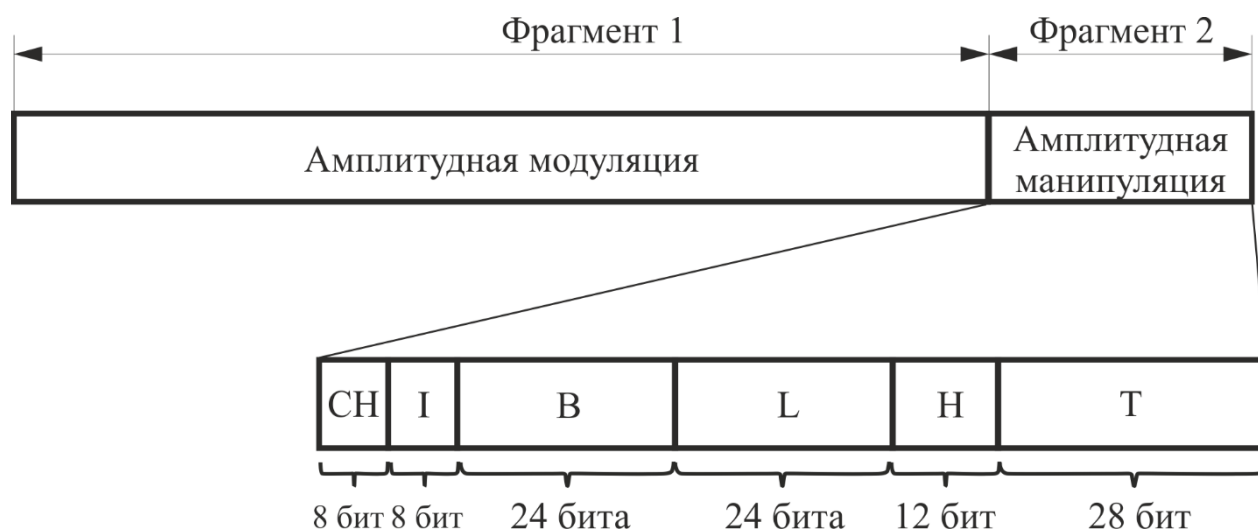


Рисунок 7 – Структура кадра передаваемой информации

Длительность передачи одного бита выбрана равной $\tau_{\text{и}} = 100$ (мкс), тогда длительность передачи одного закодированного пакета составит:

$$T_{\text{код}} = n_2 \cdot \tau_{\text{и}} = 208 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 208 \cdot 10^{-4} \text{ (с)} = 20,8 \text{ (мс)}.$$

Периодичность повтора передачи координат выбрана равной периодичности обновления информации GPS/ГЛОНАСС $T_{\text{прд}} = 1$ с.

Следовательно, длительность амплитудной модуляции между кодовыми посылками составит:

$$T_{\text{АМ}} = T_{\text{прд}} - T_{\text{код}} = 1 - 20,8 \cdot 10^{-3} = 0,9792 \text{ с}.$$

Тем самым длительность передачи кодовой информации составит всего 2,08% от общего периода повторения данных.

Информационная кодовая комбинация из 8 бит позволяет сформировать независимое адресное пространство для $2^8 = 256$ абонентов (квадроциклов).

Заключение

В статье был подробно рассмотрен передатчик малогабаритной радиосистемы автоматической посадки БЛА на подвижное транспортное средство – квадроцикл. Приведены результаты расчета выходной передатчика и определены необходимые виды модуляции и методы кодирования, определена

структура передаваемого сигнала, рассчитана его информативность. Показаны результаты моделирования антенной системы, состоящей из шести волноводно-целевых антенн, и приведены ее геометрические размеры. Рассмотрена подробная структурная схема радиосистемы.

Таким образом, использование рассмотренной помехозащищенной командно-навигационной радиолинии позволяет внедрять полностью автоматическое управление посадкой с целью дополнительной роботизации транспортных средств для повышения их функциональности.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Антонович К.М. Космическая навигация: учеб. пособие. – Новосибирск: СГУГиТ, 2015. – 233 с. ISBN 978-5-87693-865-7 [Электронный ресурс]. URL: <https://lib.sgugit.ru/irbisfulltext/UMK/2015/%D0%AD%D0%91%D0%A1%D0%93%D0%93%D0%90/28.12.2015/%D0%90%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87/%D0%90%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87.pdf> (дата обращения: 25.07.2025).
2. Бойко А. Статья «Дронопорты. Автономные взлетно-посадочные платформы для беспилотников. Станции подзарядки» [Электронный ресурс]. URL: <https://robotrends.ru/robopedia/avtomatizirovannye-sistemy-dlya-zapuska-bespilotnika> (дата обращения: 25.07.2025).
3. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Анализ эффективности передачи данных в сети связи группировки беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2015. № 81. [Электронный ресурс]. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57894> (дата обращения: 25.07.2025).
4. Гетманцев А.Ю. Теория и проектирование радиосистем передачи информации и управления: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2025. – 69 с.: ил.

5. Гришин Ю.П., Ипатов В.П., Казаринов Ю.М., Коломенский Ю.А., Ульяницкий Ю.Д. Радиотехнические системы / Издательство «Высшая школа», 1990. 496 с.

6. Кишко Д.В. Повышение точности определения навигационных параметров вертолета при посадке на корабль. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) - 2015 г. [Электронный ресурс]. URL: https://mai.ru/upload/iblock/8ef/discertatsiya-kishko-_publikatsiya_.pdf (дата обращения: 20.07.2025).

7. Кузнецов А.Г. Статья «Автоматизация процесса посадки малогабаритного беспилотного летательного аппарата в особых ситуациях». Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 45 [Электронный ресурс] <https://mai.ru/upload/iblock/790/avtomatizatsiya-protssessa-posadki-malogabaritnogo-bespilotnogo-letatel'nogo-apparata-v-osobykh-situatsiyakh.pdf>, (дата обращения: 20.07.2025).

8. Нгуа Ндонг Авеле Ж.Б., Горяинов В.С. Статья «Док-станция для БПЛА: исследование построения автономной взлетно-посадочной платформы для беспилотных летательных аппаратов». Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 9. С. 38–48 [Электронный ресурс]. URL: <https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-9-2023-38-48.pdf> (дата обращения: 20.07.2025).

9. Никольский, Б.А Бортвые радиоэлектронные системы [электрон, учебник] / Б.А. Никольский; Минобрнауки России, Самар, гос. аэрокосм, ун-т им. С.П.Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон, текстовые и граф. дан. (3,612 Мбайт). - Самара, 2013. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM). [Электронный ресурс]. URL: <https://repo.ssau.ru/bitstream/Uchebnye-posobiya/Bortovye-radioelektronnye-sistemy-Elektronnyi-resurs-elektron-ucheb-54583/1/Никольский%20Б.А.%20Бортвые.pdf> (дата обращения: 20.07.2025).

10. 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.

11. Ползик Е.В., Коньшин С.В. Радиотехнические системы телеметрии и

управления космическими аппаратами. Конспект лекций для студентов всех форм обучения специальности 050719 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации. – Алматы: АИЭС, 2008. – 65 с. [Электронный ресурс]. URL: https://libr.aues.kz/facultet/frts/kaf_tks/36/umm/tks_1.htm (дата обращения: 20.07.2025).

12. Ронжин А.Л., Нгуен В.В., Соленая О.Я. Анализ проблем разработки беспилотных летательных манипуляторов и физического взаимодействия БЛА с наземными объектами // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=90439&eng=Y> (дата обращения: 20.07.2025).

13. Свиридов В.В. Методика оценки качества группового взаимодействия робототехнических комплексов в условиях изменяемой фоноцелевой обстановки // Труды МАИ. 2021. № 121. [Электронный ресурс]. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=162669>. DOI: 10.34759/trd-2021-121-22 (дата обращения: 20.07.2025).

14. Статья «15 Biggest Drone Companies In the World» [Электронный ресурс]. URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.45f8711e-67d26551-f98d8b76-74722d776562/https/www.yahoo.com/video/15-biggest-drone-companies-world-175046410.html (дата обращения: 20.07.2025).

15. Статья «Autonomous Multirotor Landing System (AMLS). Цель проекта: Автоматически посадить дрон в движении». [Электронный ресурс]. URL: <https://clover.coex.tech/ru/amls.html> (дата обращения: 20.07.2025).

16. Статья «Курсо-глиссадная система» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.avsimrus.com/wiki/%D0%9A%D0%93%D0%A1> (дата обращения: 20.07.2025).

17. Статья «Рамы и защитные конструкции» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.geoscan.ru/pioneer/database/const-module/frame/frame.html> (дата обращения: 20.07.2025).

18. Хуснутдинов Т.Д., Щербакова А.В., Комарова П.А., Рублевская Е.В., Решетников А.Ю. – Статья «Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов в инновационных проектах». Журнал «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» – 2017. Том 3. Стр.139-141 [Электронный

ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-v-innovatsionnyh-proektah> (дата обращения: 20.07.2025).

References

1. Antonovich K.M. Space navigation: textbook. stipend. Novosibirsk: SGUGiT Publ., 2015. 233 p. ISBN 978-5-87693-865-7 [Electronic resource]. URL: <https://lib.sgugit.ru/irbisfulltext/UMK/2015/%D0%AD%D0%91%D0%A1%D0%93%D0%93%D0%90/28/12/2015/%D0%90%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87/%D0%90%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87.pdf> (accessed: 07/25/2025).
2. Boyko A. Article «Drone ports. Autonomous take-off and landing platforms for drones. Recharging stations» [Electronic resource]. URL: <https://robotrends.ru/robopedia/avtomatizirovannye-sistemy-dlya-zapuska-bespilotnika> (accessed: 25.07.2025).
3. Borodin V.V., Petrakov A.M., Shevtsov V.A. Analysis of the Effectiveness of Data Transmission in the Communication Network of a Group of Unmanned Aerial Vehicles // Proceedings of the Moscow Aviation Institute. 2015. No. 81. [Electronic resource]. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57894> (accessed: 25.07.2025).
4. Getmantsev, A.Yu. Theory and Design of Radio Systems for Information Transmission and Control: Textbook. Moscow: MAI Publishing House, 2025. 69 p.: ill.
5. Grishin, Yu.P., Ipatov, V.P., Kazarinov, Yu.M., Kolomensky, Yu.A., and Ulyanitsky, Yu.D. Radio Engineering Systems. Moscow: Vysshaya Shkola Publishing House, 1990. 496 p.
6. Kishko D.V. Improving the accuracy of determining the navigation parameters of a helicopter when boarding a ship. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University) - 2015 [Electronic resource]. URL: https://mai.ru/upload/iblock/8ef/discertatsiya-kishko-_publikatsiya_.pdf (date of request: 07/20/2025).
7. Kuznetsov A.G. Article «Automation of the Landing Process of a Small-Sized Unmanned Aerial Vehicle in Special Situations». Electronic journal «Proceedings of the

Moscow Aviation Institute». Issue No. 45 [Electronic resource]
<https://mai.ru/upload/iblock/790/avtomatizatsiya-protssessa-posadki-malogabaritnogo-bespilotnogo-letatel'nogo-apparata-v-osobykh-situatsiyakh.pdf> , (date of access: 07/20/2025).

8. Ngua Ndong Avele J.B., Goryainov V.S. Article «UAV docking station: a study of the construction of an autonomous take-off and landing platform for unmanned aerial vehicles» Izvestiya of SPbGETU «LETI». 2023. Vol. 16, No. 9. Pp. 38–48 [Electronic resource]. URL: <https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-9-2023-38-48.pdf> (date of reference: 07/20/2025).

9. Nikolsky, B.A. On-board radio electronic systems [electron, textbook] / B.A. Nikolsky; Ministry of Education and Science of Russia, Samara, State Aerospace University named after S.P.Korolev (National Research university). - Electronic, textual, and graphical data. (3.612 MB). - Samara, 2013. - 1 electronic optical disk (CD-ROM).). [Electronic resource]. URL: <https://repo.ssau.ru/bitstream/Uchebnye-posobiya/Bortovye-radioelektronnyye-sistemy-Elektronnyi-resurs-elektron-ucheb-54583/1/Nikolsky%20B.A.%20Bortovye.pdf> (accessed: 20.07.2025).

10. Pankov S.Ya. Theory and Methods of Aviation Control: Textbook. In 2 parts. Part 1 / S.Ya. Pankov, Yu.E. Zaburaev, A.M. Matveev; under the general editorship of V.A. Meshcheryakov. – Ulyanovsk: UVAU GA, 2006. – 190 p.

11. Polzik E.V., Konshin S.V. Radio engineering systems of telemetry and control of spacecraft. Lecture notes for students of all forms of study in the specialty 050719 – Radio Engineering, Electronics, and Telecommunications. – Almaty: AIES, 2008. – 65 p. [Electronic resource]. URL: https://libr.aues.kz/facultet/frts/kaf_tks/36/umm/tks_1.htm (accessed: 20.07.2025).

12. Ronzhin A.L., Nguyen V.V., Solnaya O.Ya. Analysis of the problems of developing unmanned aerial manipulators and physical interaction of UAVs with ground objects // Proceedings of MAI. 2018. No. 98. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=90439&eng=Y> (accessed: 20.07.2025).

13. Sviridov V.V. Methodology for Assessing the Quality of Group Interaction of Robotic Systems in a Changing Target Environment // Proceedings of the Moscow Aviation Institute. 2021. No. 121. [Electronic resource]. URL: <https://trudymai.ru/>

published.php?ID=162669. DOI: 10.34759/trd-2021-121-22 (accessed: 20.07.2025).

14. Article «15 Biggest Drone Companies In the World» [Electronic resource]. URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.45f8711e - 67d26551-f98d8b76-74722d776562/https/www.yahoo.com/video/15-biggest-drone-companies-world-175046410.html (accessed: 07/20/2025).

15. Article «Autonomous Multirotor Landing System (AMLS). Project goal: Automatically land a drone in motion». [Electronic resource]. URL: <https://clover.coex.tech/ru/amls.html> (accessed: 20.07.2025).

16. Article «Course-Glide System» [Electronic resource]. URL: <https://www.avsimrus.com/wiki/%D0%9A%D0%93%D0%A1> (accessed: 20.07.2025).

17. Article «Frames and protective structures» [Electronic resource]. URL: <https://docs.geoscan.ru/pioneer/database/const-module/frame/frame.html> (accessed on 20.07.2025).

18. Khusnutdinov T.D., Shcherbakova A.V., Komarova P.A., Rublevskaya E.V., Reshetnikov A.Yu. – Article «Prospects for the Use of Unmanned Aerial Vehicles in Innovative Projects». Journal «Actual Problems of Aviation and Cosmonautics» – 2017. Volume 3. Pages 139-141 [Electronic resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-v-innovatsionnyh-proektah> (accessed: 20.07.2025).

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

Тимур Мустафаевич Чопанов, выпускник филиала «Взлет» МАИ, 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

Timur M. Chopanov – graduate of the Vzlet Branch of Moscow Aviation Institute in Akhtubinsk, Akhtubinsk, Russia

Получено 01 декабря 2025 • Принято к публикации 09 марта 2026 • Опубликовано 31 августа 2026
Received 01 December 2025 • Accepted 09 March 2026 • Published 31 August 2026
