

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ПРИВЕДЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Д. А. Ясенцев

В статье дан обзор различных систем посадки, которые используются для приведения пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов. Рассмотрены как радиотехнические системы приведения (курсо-гладные, спутниковые и т. д.), так и альтернативные (оптические и лазерные). На основе отобранных источников сделаны выводы о применимости известных и перспективных систем посадки для решения задач обеспечения автоматической посадки беспилотных аппаратов в различных условиях.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, система посадки, траекторные измерения.

Введение

Развитие авиационной техники более чем за столетнюю ее историю сделало летательные аппараты (ЛА) различных типов безальтернативными способами решения широкого спектра задач [1 – 4]. Среди этих задач стоит выделить задачи, связанные с мониторингом окружающего пространства, в основном подстилающей поверхности, доставкой различных грузов. Особняком стоят задачи военно-го и специального назначения [5, 6].

Параллельно с пилотируемыми ЛА развивались и беспилотные летательные аппараты (БЛА). Прогресс в области вычислительной техники сделал возможным появление беспилотных или опционально пилотируемых ЛА [7] с внедрением в контур управления элементов искусственного интеллекта. При этом для многих практических применений, особенно в хозяйственных направлениях деятельности человека, наличие пилота на борту управляемого ЛА не является обязательным, что позволяет получить дополнительную экономию по стоимости эксплуатации авиационной техники. Кроме того, отсутствие пилота на борту ЛА – это и экономия массогабаритных характеристик, и упрощение оборудования (не требуются, например, системы визуальной индикации информации с бортовых датчиков и системы жизнеобеспечения летчиков), что дает возможность, в том числе длительного барражирования в районе выполнения целевой задачи [8]. Функции пилота в данном случае берет на себя оператор, находящийся в наземном пункте управления. Данные факторы, а также совокупность некоторых других, предопределили широкое развитие беспилотных авиационных систем в мировой авиации.

Анализ аварийности при эксплуатации авиационной техники показал, что наибольшее число нештатных и аварийных ситуаций возникает в процессе взлета и посадки ЛА [9, 10]. Для минимизации

числа подобных авиационных происшествий в течение времени выполнения данных операций экипажам гражданских авиалайнеров обеспечивается существенная информационная поддержка, которая заключается в использовании неавтономных систем навигации спутниковых радионавигационных систем (СРНС), радиолокационных систем автоматизированного управления воздушным движением (РЛС АСУ ВД), диспетчерских пунктов управления воздушным движением, обеспечивающих непрерывное информационное и навигационное обеспечение.

Эксплуатация многих типов ЛА происходит при существенно худшем качестве информационной поддержки процесса посадки по сравнению с гражданскими авиалайнерами [10]. Это самолеты местных пассажирских авиалиний, военная авиация на полевых аэродромах, вертолеты и самолеты санитарной авиации, сельскохозяйственная авиация и т. д. Системы информационного обеспечения процесса посадки вышеперечисленных малых ЛА во многих случаях просто отсутствуют, и посадка осуществляется за счет визуального восприятия пилотом складывающейся ситуации.

Развитие беспилотной авиации, в том числе для ее использования в районах с неразвитой инфраструктурой, также требует решения проблемы информационного обеспечения посадки ЛА, при этом особенностью последней задачи является то, что система посадки должна быть полностью автоматической [11, 12].

Рассмотрим далее особенности существующих систем посадки ЛА применительно к возможности их использования для приведения беспилотных или дистанционно пилотируемых ЛА.

Кроме рассмотренных далее наиболее исследованных систем приведения БЛА существует достаточно большое число альтернативных систем и средств их информационного обеспечения в процессе посадки, которые детально в данной работе рассмотрены не будут.

1. Обзор современных систем посадки

Заход ЛА на посадку – один из заключительных этапов полета ЛА, непосредственно предшествующий посадке на взлетно-посадочную полосу (ВПП). Он определяется как маневрирование по заданной схеме для выведения ЛА на предпосадочную прямую и движение по предпосадочной прямой с соблюдением заданных горизонтального и вертикального профилей с целью выведения ЛА на точку приземления.

Заходы делятся на инструментальные и визуальные [9, 10, 13].

Инструментальный заход на посадку выполняется по правилу полетов по приборам и обеспечивает правильность полета ЛА от точки начала захода или из зоны ожидания до визуального контакта с зоной приземления или посадки и выполняется с использованием радионавигационного оборудования аэродрома посадки и ЛА. Инструментальный заход на посадку выполняется в ручном, полуавтоматическом или автоматическом режиме.

Визуальные заходы на посадку характеризуются тем, что пространственное положение воздушного судна и его местонахождение определяется экипажем воздушного судна визуально по естественному горизонту, земным ориентирам, а также относительно других материальных объектов и сооружений. Очевидно, что при отсутствии экипажа на борту БЛА его функции при осуществлении визуального захода на посадку могут быть переданы или системам технического зрения с интеллектуальной

обработкой, или оператору, находящемуся в наземном пункте управления и имеющему радиосистему управления приводимым БЛА.

Точные заходы на посадку обеспечивают наведение воздушного судна на конечном этапе захода на посадку (предпосадочная прямая) по курсу и высоте.

Неточные заходы на посадку обеспечивают наведение воздушного судна на конечном этапе захода на посадку (предпосадочная прямая) только по курсу.

2. Инструментальная система посадки

Аппаратура инструментальной системы посадки (Instrumental Landing System, ILS) состоит из наземного оборудования, которое формирует сигнал, и оборудования на борту самолета, которое принимает и обрабатывает сигнал, излучаемый наземным оборудованием [14, 15].

Комплекс наземного оборудования включает в себя: курсовой маяк; глиссидный маяк; маркерные радиомаяки (рис. 1).

Бортовое оборудование воздушного судна представляет собой комплекс из двух радиоприемных устройств с направленными антеннами (курсовая и глиссидная).

Курсовой (КРМ) и глиссидный маяки (ГРМ) устанавливаются возле ВПП. Курсовой маяк – около противоположного торца ВПП по осевой линии, глиссидный маяк – сбоку от ВПП на траверзе точки приземления от порога ВПП.

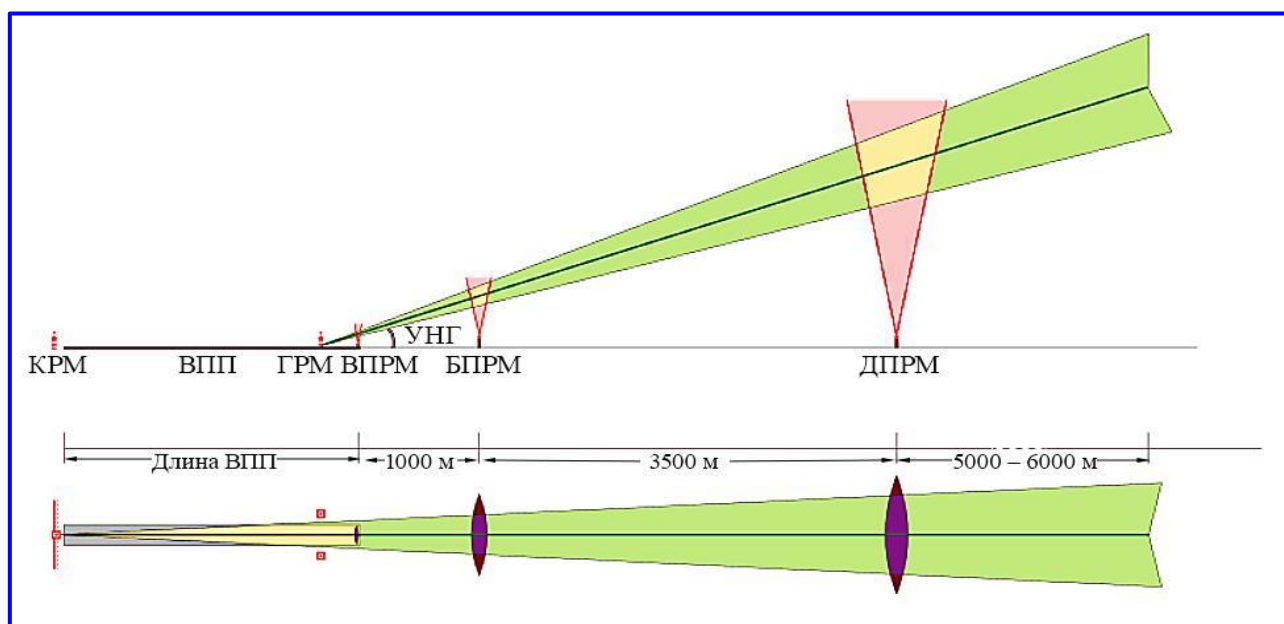


Рис. 1. Расположение наземной аппаратуры инструментальной системы посадки: КРМ – курсовой маяк; ГРМ – глиссидный маяк; ВПРМ, БПРМ, ДПРМ – маркерные радиомаяки; УНГ – угол наклона глиссады; ВПП – взлетно-посадочная полоса

КРМ и ГРМ представляют собой наземные радиотехнические устройства, излучающее в пространство радиосигналы метрового диапазона длин волн, содержащие информацию для управления воздушным судном в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно при выполнении захода на посадку до высоты принятия решения [14].

Дальний маркерный радиомаяк (ДПРМ) устанавливается на расстоянии 3,5 – 4 км от торца ВПП ± 75 м. Ближний маркерный радиомаяк (БПРМ) устанавливается в том месте, где высота глиссады обычно равна высоте принятия решения. Внутренний маяк (ВПРМ) используется редко, устанавливается для дополнительного сигнала о проходе над торцом ВПП в условиях низкой видимости.

Инструментальный заход на посадку выполняется в трех самостоятельных вариантах: автоматическом, директорном и по маякам [14].

Заход ILS автоматический. Заход ILS выполняется в автоматическом режиме путем удержания воздушного судна на посадочном курсе и глиссаде автоматически системами автопилота воздушного судна.

Заход ILS директорный. Заход ILS, выполняемый в директорном режиме отличается от автоматического тем, что директорная система выдает на стрелки прибора команды, по которым пилот сам создает рассчитанный автоматикой оптимальный крен для выхода на траекторию полета и рассчитанную автоматикой оптимальную вертикальную скорость для выхода на глиссаду.

Заход по КГС в режиме планки системы посадки. Заход ILS, выполняемый в ручном режиме. Пилот имеет возможность наблюдать положение самолета относительно позиционной линии по планкам положения на приборе. По темпу приближения планок курса к индексу ВПП можно своевременно определить изменение угла сноса и внести поправку в курс выхода на ВПП.

Для БЛА с автономным заходом на посадку, при котором отсутствует управляющий им оператор, имея на борту аппаратуру ILS, целесообразно реализовать заход на посадку в автоматическом режиме. Наличие оператора в контуре управления БЛА при его посадке позволяет использовать и директорный заход с передачей команд с наземного пункта управления на борт БЛА.

3. Микроволновая система посадки

Микроволновая система посадки (microwave landing system, MLS) создавалась на замену широко распространенной инструментальной системе посадки ILS [16, 17], однако ее практическое применение ограничено в гражданской авиации на сегодняшний день только лондонским аэропортом London Heathrow Airport (рис. 2).

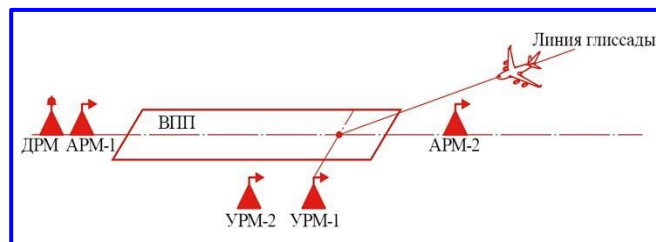


Рис. 2. Состав и расположение аппаратуры микроволновой системы посадки

Прогресс в области элементной базы радиотехнических систем позволил применить в качестве антенных систем сканирующие фазированные антенные решетки, в отличие от несканирующих антенных системы ILS.

Основой MLS являются два угломерных маяка [16], работающих в сантиметровом диапазоне длин волн, один из которых осуществляет определение угла курса приводимого ЛА относительно оси ВПП, а второй – определение угла места (наклона) приводимого ЛА.

Азимутальная станция № 1 (АРМ-1) обеспечивает управление ЛА по курсу и передает на борт ЛА информацию, связанную с условиями работы системы. Станция имеет диаграмму направленности в форме веерного луча, узкого в горизонтальной плоскости. Ширина в вертикальной плоскости несколько десятков градусов. Азимутальная станция № 2 (АРМ-2) обеспечивает управление взлетающим ЛА. Эта станция аналогична станции основного направления посадки и их функции могут меняться при изменении направления посадки.

Угломерная станция № 1 (УРМ-1) имеет диаграмму направленности в форме веерного луча, имеющего малую ширину в вертикальной плоскости. Зона действия станции в пределах зоны видимости азимутальной станции № 1 в вертикальной плоскости. Угол глиссады снижения может быть выбран пилотом по его желанию в пределах от 0,9 до 15°. Угломерная станция № 2 (УРМ-2), станция выравнивания, служит для определения момента выравнивания ЛА и управления ЛА до момента приземления.

Для измерения дальности в системе устанавливается высокочастотный дальномер типа DME/P, дальность действия которого составляет 40 км.

4. Радиолокационные системы посадки

Сходными по построению с MLS являются радиолокационные системы посадки (РСП), которые предназначены для управления полетом ЛА в зоне аэродрома, а также для контроля за выдерживанием ими курса и глиссады при заходе на посадку. Обыч-

но РСП используется как дополнительное средство к ILS, но они могут применяться и в качестве самостоятельных средств посадки [18].

Основным элементом РСП является посадочный радиолокатор, предназначенный для контроля за положением ЛА, начиная со входа ЛА в зону действия посадочного радиолокатора и до высоты 30 – 40 м относительно уровня ВПП. Положение ЛА определяется по отклонениям его отметки на индикаторе посадочного радиолокатора (ПРЛ) от курса посадки, номинальной глиссады, и дальностью до точки приземления. Обнаруженные с помощью ПРЛ отклонения от линии курса и глиссады передаются на борт ЛА по линии радиосвязи.

При использовании ПРЛ как средства управления ЛА, заходящими на посадку, необходимость в дополнительном посадочном оборудовании на борту ЛА отпадает, что является достоинством данной системы по сравнению с радиомаячными системами (РМС). Однако точность вывода ЛА в заданную точку с помощью РСП ниже, чем с помощью РМС, поэтому при оборудовании аэродрома той и другой системами посадки заход ЛА на посадку осуществляется по РМС, а РСП используется для контроля за посадкой ЛА. Повышение точности определения местоположения ЛА обеспечивается применением антенн с остронаправленным излучением.

Подобное оборудование также достаточно просто реализует задачу по приведению БЛА, поскольку сигналы управления формируются в пункте управления автоматически или при участии оператора и передаются на приводимый БЛА. Так, например, для посадки БЛА Predator MQ-1 корпорацией Sierra Nevada был создан посадочный радиолокатор TALS (Tactical Automated Landing System) диапазона 35 ГГц, построенный по принципам Low Probability of Intercept (LPI) [18].

5. Спутниковые системы посадки

Заход на посадку по СРНС [19] обычно трактуется как разновидность зональной навигации – самолетовождения, позволяющего выполнять полет по любому избранному маршруту в пределах радиуса действия радионавигационных систем, или в пределах действия бортовых средств, или в пределах использования комбинации тех и других.

Все оборудование, используемое для организации спутниковой системы посадки (рис. 3), можно разделить на три сегмента [19]:

– космический сегмент, который состоит из созвездий орбитальных группировок спутников GPS и GNSS;

– наземный сегмент, представляющий собой функциональное дополнение GBAS (Ground Based Augmentation System, функциональное дополнение наземного базирования), обеспечивающее дифференциальный режим;

– бортовой сегмент, одним из элементов которого является комплекс навигационных систем (КНС), в состав которого входит приемник сигналов GNSS, принимающий сигналы спутников и поправку от локальных контрольно-корректирующих станций (ЛККС) – радиопередатчика ультракоротких волн (ПРД УКВ) и приводного радиомаяка спутниковых навигационных систем (ПРМ СНС).

Дополнение GBAS содержит ЛККС, антенну приема сигналов спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС, которая установлена в точке с координатами, измененными с высокой (сантиметровой) точностью.

Радионавигационные сигналы спутников GNSS принимаются ЛККС и после их обработки по радиоканалу диапазона очень высоких частот в бортовой приемник GNSS передаются дифференциальные коррекции, информация о целостности системы и другие служебные сообщения.

Для посадки ЛА могут быть использованы также и лазерные посадочные системы («Глиссада-М», «Сталкер-ЛКГСП») или на основе сканирующего полупроводникового лазера с электронной накачкой (СПЛЭН). При этом системы на основе СПЛЭН достаточно просто могут быть увязаны в автоматический посадочный комплекс для приведения БЛА [20].

Оптическая система СПЛЭН формирует вдоль глиссады световые зоны трех различных цветов с заданными угловыми размерами и геометрической формой. Она выдает визуальную и инструментальную информацию о наклонной дальности до летательного аппарата и его местоположении в цветовой зоне.

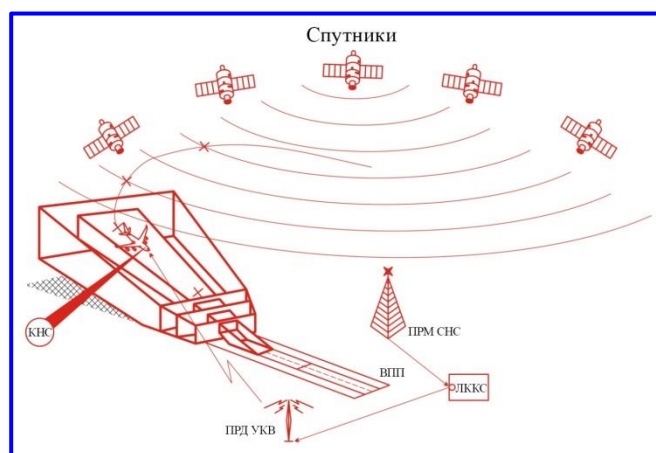


Рис. 3. Структура спутниковой системы посадки

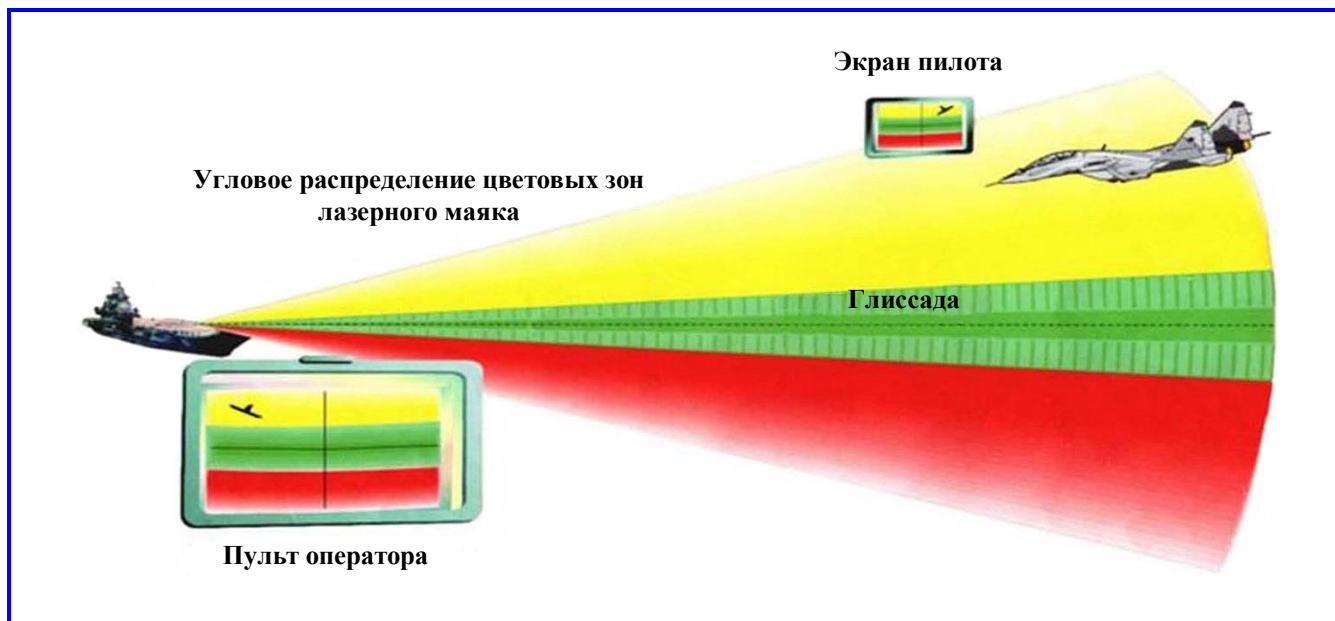


Рис. 4. Иллюстрация принципа формирования маяка системы посадки сканирующего полупроводникового лазера с электронной накачкой

6. Лазерные системы посадки

Лазерная система посадки (Laser Landing System, LLS) (рис. 4) может применяться в качестве светотехнического оборудования для посадки и взлета ЛА в сложных метеорологических условиях, при минимуме погоды по II и III категориям ICAO (International Civil Aviation Organization, Международная организация гражданской авиации) [20].

Нахождение ЛА в створе ВПП будет сопровождаться зеленым цветом имеющихся в системе двух курсовых маяков. Выход за пределы границы боковой кромки ВПП приведет к входу ЛА в желтый цветовой сектор ($0 - 3^\circ$) и далее в красный ($3 - 15^\circ$), при этом маяк противоположной стороны излучает зеленый цвет. Глиссадные маяки располагаются перпендикулярно оси ВПП, являются огнями знака приземления и позволяют контролировать положение горизонта. Кроме того, по взаимному расположению глиссадных маяков определяется середина ВПП, а по взаимному расположению курсовых и глиссадных маяков (расположены на линии параллельной оси ВПП) положение ЛА по отношению к ВПП.

7. Оптические системы посадки

Прогресс в области создания малогабаритных и чувствительных приборов с зарядовой связью (ПЗС-матриц), а также алгоритмов цифровой обработки изображений, позволил реализовывать различные варианты систем посадки, основанных на распределенных системах видеокамер, расположенных на подстилающей поверхности [21].

Основной идеей, положенной в основу принципа функционирования оптической системы посадки, является определение координат приводимого ЛА по оптическим изображениям, формируемым камерами, установленными на ВПП. Оценивание дальности до приводимого ЛА реализуется путем бистатического (многопозиционного) триангуляционного метода определения местоположения цели с последующим расчетом [21], угловые измерения каждой из камер осуществляются по формируемому изображению отдельно. Большинство этих методов базируется на нахождении пикселей формируемого изображения, которые соответствуют контуру цели, с дальнейшим оцениванием углового положения центра наблюдаемой цели в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Возможны также и технические решения по приведению БЛА при использовании его бортовой видеокамеры [22], что очень удобно для малогабаритных и дешевых аппаратов. Для ориентирования БЛА в районе приземления могут быть использованы имеющиеся наземные ориентиры или установленные на ВПП источники сигналов, например, инфракрасные лампы.

8. Посадка летательного аппарата с использованием его бортовой радиолокационной системы

Перечисленные выше системы приведения ЛА требуют наличия в районе ВПП различного оборудования, выполняющего необходимые измерения для оценки координат и параметров движения приводимого ЛА, а также передачи команд для его управле-

ния. Отсутствие возможности размещения такого оборудования не позволит применять их, например, в труднодоступных районах земного шара.

Наличие на борту приводимого ЛА бортовой радиолокационной системы (РЛС) переднего обзора дает возможность использовать пассивные наземные отражатели, расположенные в известных точках относительно ВПП, для определения по ним координат и параметров движения ЛА в процессе посадки. Принципиальная возможность реализации подобной системы описана в [23]. В качестве пассивного отражателя могут быть использованы уголкового или биконические отражатели. Важным достоинством последних является отсутствие зависимости их эффективной площади отражения от азимутального направления облучения. Для обеспечения посадки достаточно использовать 4 отражателя, расположенных, например, в форме креста [23].

Определение местоположения приводимого ЛА в подобной системе может быть основано на дальномерном способе определения местоположения объекта [24], а для оценки составляющих вектора скорости целесообразно использовать доплеровские методы измерения радиальных скоростей по направлениям на отражатели.

Альтернативой дальномерному подходу определения местоположения БЛА в процессе его приведения может быть угломерный способ, при котором определяются относительные бортовые пеленги наземных уголкового отражателей [25].

Аналогичный подход, при котором используются наземные отражатели, можно реализовать и для РЛС, использующих для получения радиолокационных изображений (РЛИ) подстилающей поверхности слабонаправленные антенны, размещаемые на законцовках лопастей несущего винта-носителя вертолетного типа. Вращательное движение лопастей, на которых установлены один или несколько фазовых центров реальных антенн, позволяет реализовать синтезирование искусственной апертуры в любом пространственном секторе, в том числе и впереди по курсу движения носителя, что позволит определить по сформированному РЛИ угловые координаты и дальности до наземных уголкового отражателей [26].

9. Анализ достоинств и недостатков различных систем посадки

Рассмотрим далее достоинства и недостатки указанных выше систем приведения ЛА со следующих точек зрения: объем и сложность наземной аппаратуры системы посадки, необходимость в ее юстировке на местности.

ILS и MLS характеризуются наибольшим объемом наземной аппаратуры, необходимой для их функционирования. Кроме того, их высокая чувствительность к пассивным помехам, порождаемым вследствие переотражения излучаемого радиосигнала от местных предметов, особенно искусственного происхождения, и имеющих большую эффективную площадь рассеяния, требует специальной подготовки подстилающей поверхности (необходимо очистить ее от крупной растительности и искусственных строений) и юстировки. Требуется также вводить ограничения на перемещение объектов в районе расположения самих маяков, в противном случае происходит существенное искажение диаграммы направленности антенн курсовых и глиссидных маяков. Еще одним недостатком ILS является невозможность адаптации формируемой линии глиссиды к конкретному типу ЛА [16], а также неработоспособность на конечном этапе посадки, когда ЛА находится в зоне, где диаграмма направленности антенны радиомаяка не сформирована. Также стоит отметить, что частотный диапазон инструментальной системы посадки подвержен индустриальным помехам, что снижает надежность ее функционирования.

Использование посадочных РЛС в гражданских аэропортах требует размещения этих РЛС в районе ВПП, что проблематично в труднодоступных и малоосвоенных областях планеты.

Для военного применения недостатком ПРЛ является высокая мощность излучения, которая позволяет противнику обнаружить ПРЛ по его излучению и поставить активные помехи для срыва слежения за ЛА. Попытка защититься от обнаружения активных систем, как было указано ранее, привела к разработке радиолокаторов класса LPI (низкая вероятность перехвата).

Применение спутниковых посадочных систем позволяет получить следующие преимущества:

- более прямые маршруты (ортодромии);
- высокую гибкость системы маршрутов управления воздушным движением;
- повышенную эффективность использования свободного воздушного пространства, что приводит к повышению пропускной способности через зону;
- расширение тактической гибкости диспетчерских центров управления воздушным движением;
- сокращение количества наземных радионавигационных точек в районе.

Данное направление развития систем посадки ICAO признало приоритетным благодаря следующим преимуществам:

- сравнительно небольшой состав оборудования в районе ВПП при условии, что уже создана спутниковая система навигации, включая станцию вычисления и передачи дифференциальных поправок;
- спутниковая навигационная система является энергосберегающей технологией;
- на ее основе возможно организовать слежение за всеми подвижными объектами на территории аэропорта, при этом данное утверждение целесообразно только для аэропортов с большим количеством движущихся объектов.

Однако СРНС обладает рядом существенных недостатков:

- чувствительность к непреднамеренным помехам, вызванным атмосферными эффектами;
- блокировка сигнала при затенении антенны элементами конструкции БЛА во время выполнения эволюции;
- чувствительность к преднамеренным помехам, которые могут ограничивать область обслуживания;
- величины достигаемых ошибок не позволяют реализовать точный заход на посадку;
- невозможность достаточно точного определения высоты ЛА.

Собственная точность космического сегмента GNSS меняется во времени, возможны перерывы в слежении, например, из-за переключений бортовых приемоизмерителей на разные навигационные космические аппараты. Орбитальное движение спутников и параметры ошибок GNSS приводят к появлению ошибок определения местоположения, значения которых могут меняться в интервале нескольких часов. Кроме того, сама точность (ошибка, ограниченная вероятностью 95%) изменяется в зависимости от различной геометрии созвездий. Хотя функциональные дополнения и компенсируют большую часть по-

грешностей, но характеристики существующих ныне контрольно-корректирующих станций не соответствуют даже первой категории ICAO по точности и в первую очередь целостности.

В связи с этим с целью повышения безопасности, надежности и точности (особенно в вертикальном канале) навигации бортовое оборудование GNSS необходимо комплексировать с другими бортовыми навигационными системами и устройствами. В первую очередь это может быть сделано при наличии на борту БЛА инерциальной навигационной системы, а также видеокамеры [22].

Использование оптических и в меньшей степени лазерных систем посадки приводит к ограничениям по возможностям приведения БЛА, которые обусловлены неблагоприятными погодными условиями. Кроме того, оптические системы также не позволяют обеспечить посадку БЛА при отсутствии естественного освещения, что требует применения на эксплуатируемых аппаратах достаточно мощных ламп подсветки. Обязательной компонентой таких систем является совокупность объединенных между собой инфракрасных камер или видеокамер с пунктом совместной обработки.

РЛС посадки, которые основаны на использовании бортовой РЛС БЛА, не позволяют с достаточной точностью сформировать глиссаду в вертикальной плоскости, что обусловлено низкой точностью измерения высоты БЛА, однако наличие на его борту высотомера (радиовысотомера или лазерного высотомера) даст возможность нивелировать данный недостаток системы посадки. Кроме того, данный способ приведения БЛА наименее требователен к наземной инфраструктуре, обеспечивающей посадку.

Выводы

Результаты сравнительного анализа рассмотренных систем приведения БЛА сведены в таблицу.

Таблица

Результаты сравнения систем посадки беспилотных летательных аппаратов

Показатели для сравнения	Инструментальная	Микроволновая	Лазерная	Спутниковая	Оптическая	На основе бортовой РЛС
Сложность бортовой аппаратуры	низкая	низкая	низкая	средняя	средняя	средняя
Сложность наземной аппаратуры	высокая	высокая	средняя	высокая	средняя	низкая
Обеспечение неточного захода	возможно	возможно	возможно	возможно	возможно	возможно
Обеспечение точного захода	возможно	возможно	возможно	невозможно	возможно	возможно с использованием бортового высотомера
Стойкость к влиянию атмосферы	высокая	высокая	средняя	высокая	низкая	высокая
Адаптация к типу БЛА	невозможна	возможна	невозможна	возможна	возможна	возможна

Очевидно также, что различные типы БЛА (мультикоптерного и самолетного типа) приводятся в точку приземления различными способами, поэтому применимость рассмотренных систем необходимо еще и конкретизировать относительно используемых типов БЛА. Основные из рассмотренных систем (система инструментальной посадки, микроволновая система) применяются именно для ЛА самолетного типа, использование же БЛА мультикоптерного типа требует других подходов к информационному обеспечению процесса их приведения.

Приведенные выше материалы позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Наиболее точные посадочные радиомаячные системы ILS и MLS способны функционировать только на крупных аэродромах, что для эксплуатации БЛА не всегда является приемлемым, особенно при использовании последних для освоения труднодоступных территорий.

2. Как ILS, так и MLS имеют схожий недостаток, который является существенным для военных применений: это активные, излучающие системы, следовательно, аэродром, оснащенный этими системами, легко обнаружить. Кроме этого, эти системы посадки могут быть подавлены воздействием преднамеренных помех, особенно ILS, а также вследствие активного излучения они сами будут являться источниками активных помех в городских районах.

3. СРНС без аппаратуры дифференциальной коррекции неспособны обеспечить посадку ЛА и подвержены активным помехам, развертывание аппаратуры дифференциальной коррекции требует серьезной подготовительной работы.

4. РЛС для посадки БЛА, основой которых служит бортовая РЛС, наиболее приемлемы для неосвоенных территорий и районов, однако возникает проблема информационного обеспечения конечного этапа приземления БЛА (ниже 40 метров), который характеризуется высоким уровнем пассивных помех от подстилающей поверхности.

Литература

1. Hirst M. *The Air Transport System* / M. Hirst. – Sawston, Cambridge : Woodhead Publishing, 2008. – 347 p.
2. Беспилотные летательные аппараты : справочное пособие / [Военный учебно-науч. центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная акад. им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж) ; сост.: М. С. Иванов и др.]. – Воронеж : Научная книга, 2015. – 619 с. : ил.
3. Василин Н. Я. Беспилотные летательные аппараты / Н. Я. Василин. – Минск : Попурри, 2017. – 272 с.
4. Биард Р. У. Малые беспилотные аппараты : теория и практика / Р. У. Биард, Т. У. МакЛэйн ; перевод с англ.

А. И. Демьяникова ; под редакцией Г. В. Анцева. – Москва : Техносфера, 2015. – 312 p.

5. Durand E. de. *Helicopter warfare : The future of airmobility and rotary wing combat* / E. de Durand, B. Michel, E. Tenenbaum // *Focus strategique ; Laboratoire de recherche sur la defense*. – 2012. – № 32. – 69 [2] p. – URL : <https://www.ifri.org/en/publications/etudes-de-lifri/focus-strategique/helicopter-warfare-future-airmobility-and-rotary-wing>.
6. Беспилотные летательные аппараты : основы устройства и функционирования : учеб. пособ. / П. П. Афанасьев, И. С. Голубев, В. Н. Новиков [и др.] ; под ред. И. С. Голубева, И. К. Туркина. – Москва : МАИ, 2008. – 654 с.
7. McLean D. *Automatic Flight Control Systems* / D. McLean. – NJ, USA, 1990. – 606 p.
8. Anderson E. *Levels of Aviation Autonomy* / E. Anderson, T. Fannin, B. Nelson // *IEEE/AIAA : 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. – London, 2018. – P. 1–8. – DOI: 10.1109/DASC.2018.8569280.
9. Kayton M. *Landing guidance* / M. Kayton, W. R. Fried // *Avionics Navigation Systems*. – Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, 1997. – 794 p. – URL : <https://pdfslide.net/documents/avionics-navigation-systems-second-edition.html?page=792>.
10. International Civil Aviation Organization (ICAO) : [сайт]. – Монреаль, Канада, 2023. – URL: <https://www.icao.int/>.
11. Kayton M. *Landing guidance* / M. Kayton, W. R. Fried // *Avionics Navigation System*. – New York : Wiley, 1969. – P. 520–553.
12. *The Role of Human Causal Factors in US Army Unmanned Aerial Vehicle Accidents* / S. D. Manning, C. E. Rash, P. A. LeDuc [at al.] // *Army Aeromedical Research Lab*. – Fort Rucker, AL, USA, 2004. – URL : https://www.researchgate.net/publication/235148956_The_Role_of_Human_Causal_Factors_in_US_Army_Unmanned_Aerial_Vehicle_Accidents.
13. Hess R. A. *Unified theory for aircraft handling qualities and adverse aircraft pilot coupling* / R. A. Hess // *J. Guid. Dyn.* – 1997. – Vol. 20. – № 6. – P. 1141–1148.
14. Sanders L. *Instrument Landing Systems* / L. Sanders, V. Fritch // *IEEE Trans. Commun.* – 1973. – Vol. 21. – Issue 5. – P. 435–454.
15. Kramar E. *Instrument landing systems* / E. Kramar // *Interavia*. – 1972. – Vol. 27. – P. 246.
16. Lanman M. H. *An Investigation of Microwave Landing System Signal Requirements for Conventionally Equipped Civilian Aircraft* / M. H. Lanman. – Cambridge, MA, USA : Transportation Systems Center, 1971. – 140 p.
17. Viret C. *Microwave aircraft digital guidance equipment – Description of the system* / C. Viret // *In Proceedings of the Electronics and Civil International Conference*. – Paris, France, 1972. – P. 987–1002.
18. Brooker G. *A Millimetre Wave Radar Sensor for Autonomous Navigation and Landing* / G. Brooker, T. A. Carter // *In Proceedings of the Australian Conference on Robotics and Automation*. – Melbourne, Australia, 2000. – P. 59–64.
19. Guochang X. *GPS. Theory, Algorithms and Application* / X. Guochang. – Berlin/Heidelberg, Germany : Springer, 2003. – URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-72715-6>.

20. The laser-based automatic landing system for UAVs / RUAG International : [сайт]. – 2021. – 2 p. – URL: <http://www.ruag.com/>.
21. Ground Stereo Vision-based Navigation for Autonomous Take-off and Landing of UAVs: A Chan-Vese Model Approach / D. Tang, T. Hu, L. Shen [at al.] // Int. J. Adv. Robot. Syst. – 2016. – Vol. 13. – DOI: 10.5772/62027. – URL: <https://cyberleninka.org/article/n/693289/viewer>.
22. Vision-based navigation of unmanned aerial vehicles / J. Courbon, Y. Mezouar, N. Guenard [at al.] // Control Eng. Pract. – 2010. – Vol. 18(7). – P. 789–799.
23. Using Ground-Based Passive Reflectors for Improving UAV Landing / D. Yasentsev, T. Shevgunov, E. Efimov [at al.] // Drones, 2021. – Vol. 5. – URL: <https://doi.org/10.3390/drones5040137>.
24. Zekavat R. Handbook of Position Location: Theory, Practice, and Advances / R. Zekavat, R. M. Buehrer. – Reading, MA, USA : Wiley-IEEE Press, 2019. – 1376 p.
25. Unmanned Aerial Vehicle Antenna Measurement Using Anechoic Chamber / E. M. Dobychnina, M. V. Snastin, E. N. Efimov [at al.] // TEM Journal. – 2020. – Vol. 9. – № 4. – P. 1480–1487. – DOI: 10.18421/TEM94-21.
26. Патент № US6515613B2 United States, G01S13/91, G01S7/411, G01S13/9082. ROSAR method for landing helicopters under adverse weather conditions and for recognizing and detecting concealed targets : № US10/050,602 : заявл. 18.01.2002 : опубл. 04.02.2003 // Helmut Klausning, Horst Kaltshmidt ; EADS Deutschland GmbH. – [8 p.]. – URL: <https://patents.google.com/patent/US6515613B2/en>.

Поступила в редакцию 02.03.2023

Дмитрий Александрович Ясенцев, кандидат технических наук, доцент кафедры 410, т.: 8 (926) 623-53-57, e-mail: yasentsev@yandex.ru. (ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»).

MAIN TRENDS IN DEVELOPMENT OF GUIDANCE SYSTEMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

D. A. Yasentsev

The article contains an overview of different landing systems that are used for guidance of manned and unmanned aerial vehicles. The radio guidance systems (instrument landing systems, satellite systems), as well as alternative systems (optical and laser systems) are considered. Based on the selected publications, the conclusions on applicability of well-known and advanced landing systems for ensuring automatic landing of unmanned aerial vehicles under different conditions have been made.

Key words: *unmanned aerial vehicle, landing system, trajectory measurements.*

References

- Hirst M. The Air Transport System / M. Hirst. – Sawston, Cambridge : Woodhead Publishing, 2008. – 347 p.
- Unmanned aerial vehicles: Handbook. – Voronezh : Scientific book, 2015. – 619 p. : ill.
- Vasilin N. Ya. Unmanned aerial vehicles / N. Ya. Vasilin. – Minsk : Popurri Publishers, 2017. – 272 p.
- Beard R. W. Small unmanned aerial vehicles. Theory and practice / R. W. Beard, T. W. McLain ; translation from English A. I. Demjanikova ; edited by G. V. Antcev. – Moscow : Technosphere, 2015. – 312 p.
- Durand E. de. Helicopter warfare : The future of airmobility and rotary wing combat / E. de Durand, B. Michel, E. Tenenbaum // Focus strategique ; Laboratoire de recherche sur la defense. – 2012. – № 32. – 69 [2] p. – URL : <https://www.ifri.org/en/publications/etudes-de-lifri/focus-strategique/helicopter-warfare-future-airmobility-and-rotary-wing>.
- Unmanned aerial vehicles : design and operation principles : textbook / P. P. Afanasyev, I. S. Golubev, V. N. Novikov [et al.] ; edited by I. S. Golubev, I. K. Turkin. – Moscow : MAI, 2008. – 654 p.
- McLean D. Automatic Flight Control Systems / D. McLean. – NJ, USA, 1990. – 606 p.
- Anderson E. Levels of Aviation Autonomy / E. Anderson, T. Fannin, B. Nelson // IEEE/AIAA : 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC). – London, 2018. – P. 1–8. – DOI: 10.1109/DASC.2018.8569280.
- Kayton M. Landing guidance / M. Kayton, W. R. Fried // Avionics Navigation Systems. – Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, 1997. – 794 p. – URL : <https://pdfslide.net/documents/avionics-navigation-systems-second-edition.html?page=792>.
- International Civil Aviation Organization (ICAO) : [website]. – Montreal, Canada, 2023. – URL: <https://www.icao.int/>.
- Kayton M. Landing guidance / M. Kayton, W. R. Fried // Avionics Navigation System. – New York : Wiley, 1969. – P. 520–553.
- The Role of Human Causal Factors in US Army Unmanned Aerial Vehicle Accidents / S. D. Manning, C. E. Rash, P. A. LeDuc [at al.] // Army Aeromedical Research Lab. – Fort Rucker, AL, USA, 2004. – URL : https://www.researchgate.net/publication/235148956_The_Role_of_Human_Causal_Factors_in_US_Army_Unmanned_Aerial_Vehicle_Accidents.

13. Hess R. A. Unified theory for aircraft handling qualities and adverse aircraft pilot coupling / R. A. Hess // J. Guid. Dyn. – 1997. – Vol. 20. – № 6. – P. 1141–1148.
14. Sanders L. Instrument Landing Systems / L. Sanders, V. Fritch // IEEE Trans. Commun. – 1973. – Vol. 21. – Issue 5. – P. 435–454.
15. Kramar E. Instrument landing systems / E. Kramar // Interavia. – 1972. – Vol. 27. – P. 246.
16. Lanman M. H. An Investigation of Microwave Landing System Signal Requirements for Conventionally Equipped Civilian Aircraft / M. H. Lanman. – Cambridge, MA, USA : Transportation Systems Center, 1971. – 140 p.
17. Viret C. Microwave aircraft digital guidance equipment – Description of the system / C. Viret // In Proceedings of the Electronics and Civil International Conference. – Paris, France, 1972. – P. 987–1002.
18. Brooker G. A Millimetre Wave Radar Sensor for Autonomous Navigation and Landing / G. Brooker, T. A. Carter // In Proceedings of the Australian Conference on Robotics and Automation. – Melbourne, Australia, 2000. – P. 59–64.
19. Guochang X. GPS. Theory, Algorithms and Application / X. Guochang. – Berlin/Heidelberg, Germany : Springer, 2003. – URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-72715-6>.
20. The laser-based automatic landing system for UAVs / RUAG International : [сайт]. – 2021. – 2 p. – URL: <http://www.ruag.com/>.
21. Ground Stereo Vision-based Navigation for Autonomous Take-off and Landing of UAVs: A Chan-Vese Model Approach / D. Tang, T. Hu, L. Shen [at al.] // Int. J. Adv. Robot. Syst. – 2016. – Vol. 13. – DOI: 10.5772/62027. – URL: <https://cyberleninka.org/article/n/693289/viewer>.
22. Vision-based navigation of unmanned aerial vehicles / J. Courbon, Y. Mezouar, N. Guenard [at al.] // Control Eng. Pract. – 2010. – Vol. 18(7). – P. 789–799.
23. Using Ground-Based Passive Reflectors for Improving UAV Landing / D. Yasentsev, T. Shevgunov, E. Efimov [at al.] // Drones, 2021. – Vol. 5. – URL: <https://doi.org/10.3390/drones5040137>.
24. Zekavat R. Handbook of Position Location: Theory, Practice, and Advances / R. Zekavat, R. M. Buehrer. – Reading, MA, USA : Wiley-IEEE Press, 2019. – 1376 p.
25. Unmanned Aerial Vehicle Antenna Measurement Using Anechoic Chamber / E. M. Dobychnina, M. V. Snastin, E. N. Efimov [at al.] // TEM Journal. – 2020. – Vol. 9. – № 4. – P. 1480–1487. – DOI: 10.18421/TEM94-21.
26. Patent № US6515613B2 United States, G01S13/91, G01S7/411, G01S13/9082. ROSAR method for landing helicopters under adverse weather conditions and for recognizing and detecting concealed targets : № US10/050,602 : application 18.01.2002 : published on 04.02.2003 // Helmut Klausung, Horst Kaltshmidt ; EADS Deutschland GmbH. – [8 p.]. – URL: <https://patents.google.com/patent/US6515613B2/en>.

*Dmitriy Aleksandrovich Yasentsev, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.),
Associate Professor of Department 410, tel.: +7 (926) 623-53-57,
e-mail: yasentsev@yandex.ru.
(Federal State Educational Institution of Higher Education «Moscow Aviation Institute
(National Research University)»).*