

А.М. АГЕЕВ, кандидат технических наук, заместитель начальника научно-исследовательского отдела НИЦ (БП и О ВВС) ВУНЦ ВВС «ВВА»
С.Б. МИХАЙЛЕНКО, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ВУНЦ ВВС «ВВА»
В.А. ЗЕЗЮЛЯ, оператор научной роты ВУНЦ ВВС «ВВА»

СПОСОБ ТОЧНОЙ ПОСАДКИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Посадка является неотъемлемым этапом применения любого многоразового беспилотного летательного аппарата (БЛА) независимо от его функционального назначения. Этот этап характеризуется высоким уровнем сложности технической реализации и во многом определяет такие важные характеристики беспилотного комплекса, как допустимые условия применения, гибкость, мобильность, маневренность, автономность, всепогодность, оперативность повторного применения. Поэтому поиск и разработка новых способов, схем и средств посадки БЛА является одной из наиболее актуальных задач, от успешного решения которой, в конечном счете, зависит расширение области применения БЛА и развитие беспилотной авиации в целом.

Любая система посадки БЛА, независимо от реализуемого способа (схемы) посадки, должна решать две задачи:

задачу вывода БЛА в заданную точку (область) пространства с требуемой точностью и заданными значениями углов ориентации БЛА, линейных и угловых скоростей (задачу терминального управления);

задачу полного поглощения (гашения) остаточной кинетической энергии БЛА при сохранении его механической целостности.

Все известные способы посадки БЛА [1] могут быть сведены к следующим основным схемам:

посадка по-самолетному (на взлетно-посадочную полосу);

посадка по-вертолетному (на площадку);

посадка с использованием парашюта;

посадка в улавливающее устройство.

В первых трех схемах для решения задачи терминального управления используется штатное навигационное оборудование БЛА. Вторая задача решается за счет пробега БЛА по полосе до полной остановки, а также за счет применения парашюта или парашютной системы, состоящей из тормозного и основного парашютов [2], и, при необходимости, надувных посадочных баллонов (подушек, амортизаторов), располагаемых под фюзеляжем и крыльями, которые защищают БЛА от повреждений при касании земли. При посадке по-вертолетному вторая задача не

требует решения, так как беспилотный вертолет обеспечивает выполнение посадки с нулевой скоростью приземления.

При посадке в улавливающее устройство требуется высокая точность определения координат БЛА относительно этого устройства, как правило, не обеспечиваемая штатным навигационным оборудованием БЛА. Поэтому реализация этой схемы предполагает разработку специализированного оборудования приведения БЛА в улавливающее устройство, а зачастую, и ручной режим управления БЛА при посадке. При этом главное преимущество схемы посадки в улавливающее устройство состоит в компактности посадочного места (области пространства), что позволяет ее осуществлять, например, на палубу корабля, на небольшие открытые участки местности.

Основным недостатком способа посадки БЛА по-самолетному является низкая автономность осуществления посадки, обусловленная обязательной привязкой к обеспечивающей наземной инфраструктуре (аэродромы с посадочной полосой, курсо-глиссадное и другое посадочное оборудование), что существенно ограничивает допустимые условия, гибкость и оперативность применения БЛА.

Основным недостатком парашютного способа является низкая точность приземления, вследствие чего для его реализации может потребоваться посадочная площадка больших размеров (до десятков км² и более), свободная от мешающих объектов, столкновение с которыми может привести к потере БЛА. Дополнительные затраты времени на поиск БЛА на значительной по площади территории и последующую эвакуацию БЛА в район старта обуславливают низкую оперативность повторного применения БЛА. Необходимость проведения поиска и эвакуации БЛА требует привлечения дополнительной техники (транспорта), что снижает степень автономности способа. Кроме того, высока вероятность повреждения БЛА, что резко снижает кратность его применения. Общая масса агрегатов парашютной системы посадки БЛА может достигать 12-15 %. По другим источникам [2], масса только одного парашюта (без амортизирующих устройств), обеспечивающего безопасную скорость приземления (порядка 4 м/с), может достигать 26% от массы БЛА. Это значительно ограничивает запас по массе на целевую нагрузку или на топливо (для увеличения дальности или продолжительности полета).

Различные варианты схем посадки в улавливающее устройство отличаются видом (конструкцией) последнего. Наиболее известными являются схемы с использованием аэрофинишера [1], схемы посадки с захватом в улавливающие устройства в виде вертикальных и горизонтальных тросов, штанг, сетей [1,3,4]. Основным ограничивающим фактором при выборе такой схемы посадки является масса БЛА, которая, как правило, не должна превышать 100-120 кг, за исключением случая посадки с использованием аэрофинишера. При этом с уменьшением массы БЛА растет многообразие схем посадки и конструкций улавливающего устройства вплоть до «экзотических» вариантов [5,6].

Наиболее типичным и реализованным на практике способом, использующим улавливающее устройство, является посадка с захватом в вертикальную сеть. Рас-

смотрим пример реализации этого способа посадки в беспилотном комплексе «Аквила» [1]. Способ состоит в том, что формируют узкую секторную зону захода БЛА на посадку и задают опорную траекторию посадки, для чего в заданном месте посадки на конструкции крепления улавливающей вертикальной сети устанавливают две инфракрасных камеры, поля зрения которых задают узкую секторную зону захода БЛА на посадку в боковой и вертикальной плоскостях, а оптические оси – опорную траекторию посадки БЛА. Наземной станцией управления осуществляется радиолокационное сопровождение БЛА по дальности и угловым координатам. По данным радиолокационного сопровождения формируются команды управления для ввода БЛА в узкую секторную зону захода на посадку. Эти команды передаются по радиолинии на борт БЛА и обрабатываются бортовой системой управления. По излучению бортового инфракрасного источника с помощью инфракрасных камер определяются боковое и вертикальное угловые отклонения БЛА от опорной траектории посадки. Эти отклонения передаются по радиолинии на борт БЛА и используются бортовой системой управления для удержания БЛА на опорной траектории посадки до попадания в улавливающую сеть.

Основным недостатком способа посадки в вертикальную сеть является его низкая автономность, обусловленная тем, что значительная часть действий выполняется на земле с использованием соответствующего наземного оборудования. Кроме того, он не обеспечивает всеракурсный заход БЛА на посадку и всепогодное осуществление посадки, что обусловлено формированием узких секторных зон захода БЛА на посадку и использованием в посадочном оборудовании инфракрасного диапазона длин волн. Для выполнения посадки требуется открытая, свободная от мешающих объектов, значительная по размерам площадка (радиусом не менее 200...250 м).

Для увеличения автономности выполнения посадки БЛА, обеспечения всеракурсности захода на посадку, всепогодности осуществления посадки, уменьшения размеров посадочной площадки до единиц метров в поперечнике, предложен способ точной посадки малоразмерного БЛА в горизонтальную улавливающую сеть [7]. Способ состоит в следующем. Для формирования круговой зоны захода на посадку в заданной точке посадки устанавливают изотропный источник радиои-злучения (радиомаяк), а на борту БЛА устанавливают радиопеленгатор. С помощью штатного бортового навигационного оборудования выполняется автономный ввод БЛА в зону захода на посадку. Бортовой радиопеленгатор принимает сигналы радиомаяка и выполняет его угловое сопровождение в горизонтальной и вертикальной плоскостях. По данным радиопеленгатора в бортовой системе управления формируются команды самонаведения БЛА на радиомаяк в горизонтальной плоскости. Одновременно с самонаведением БЛА на радиомаяк в горизонтальной плоскости выполняется его полет на заданной высоте до достижения заданного угла визирования радиомаяка в вертикальной плоскости. Затем БЛА переводится в пикирование и выполняется его самонаведение на радиомаяк в вертикальной и горизон-

тальной плоскостях до попадания в улавливающую сеть, установленную горизонтально над радиомаяком.

На рисунке 1 представлена схема реализации предлагаемого способа точной посадки малоразмерного БЛА.

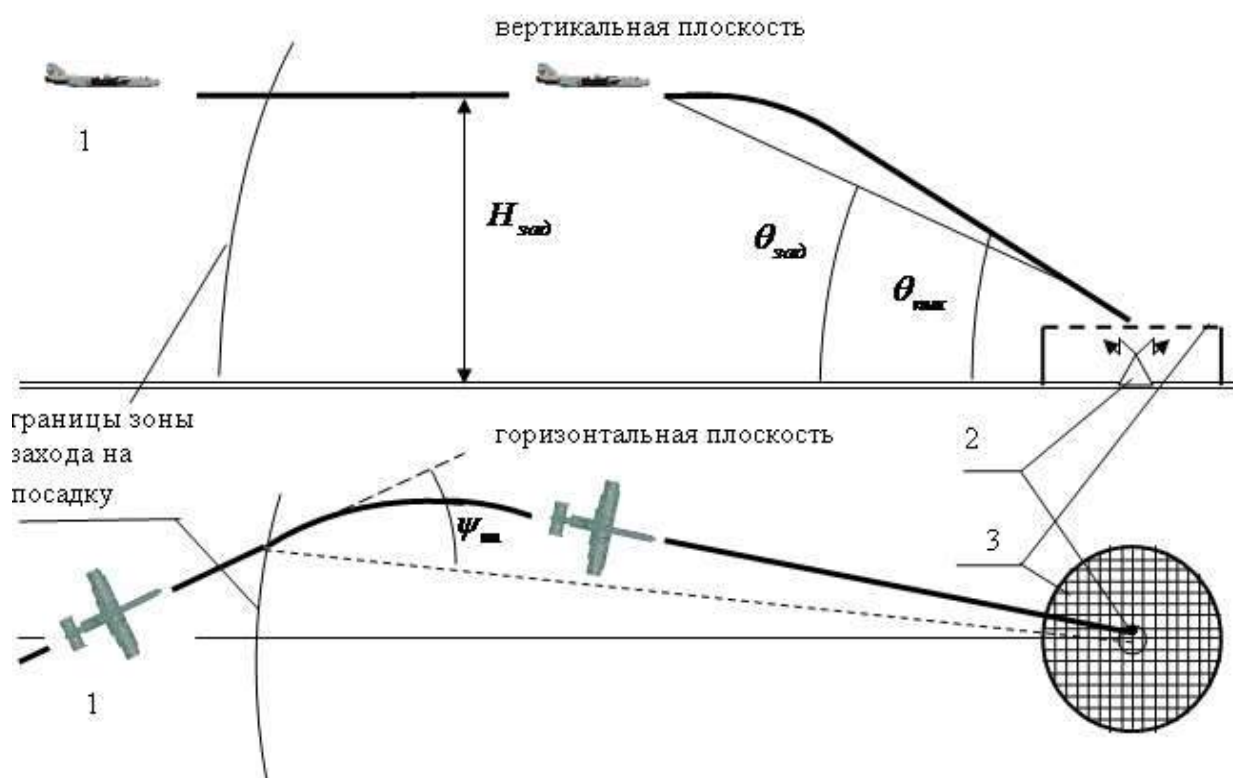


Рисунок 1 – Схема реализации способа точной посадки малоразмерного БЛА в горизонтальную сеть: 1 – БЛА со штатным бортовым навигационным оборудованием, бортовой системой управления и бортовым радиопеленгатором; 2 – изотропный радиомаяк, устанавливаемый в заданной точке посадки; 3 – горизонтальная улавливающая сеть

Для реализации способа точной посадки БЛА необходима разработка бортового радиопеленгатора, наземного радиомаяка и улавливающего устройства (сети). Предварительные расчеты подтвердили возможность создания радиопеленгатора фазового типа [8] для открытого диапазона частот 2,42-2,44 ГГц с массогабаритными характеристиками, приемлемыми для установки на борт малоразмерного БЛА (масса порядка сотен граммов, размеры порядка единиц-десятков сантиметров) и достаточной точностью пеленгации (не хуже 1 градуса).

Проведем количественную оценку точности посадки БЛА предложенным способом. Для этого воспользуемся формулами для дисперсий составляющих конечной ошибки самонаведения (промаха) БЛА при посадке в улавливающую сеть [9], полученные в предположении, что самонаведение БЛА на радиомаяк выполняется методом пропорциональной навигации:

$$\sigma_{\Delta\varepsilon}^2 = \frac{(\sigma_\varepsilon NVT)^2}{a_0(N+1)} \cdot \frac{l_\varepsilon \cdot \sum_{j=0}^{N-1} a_{\varepsilon j}(N) \cdot l_\varepsilon^j}{(1+l_\varepsilon)^{N+1}}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\Delta\delta}^2 = \frac{(\sigma_\delta T)^2}{a_0(N)} \cdot \frac{l_\delta \cdot \sum_{j=0}^{N-2} a_{\delta j}(N) \cdot l_\delta^j}{(1+l_\delta)^N}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\Delta\varepsilon}^2$ – дисперсия составляющей промаха БЛА, обусловленной ошибками бортового радиопеленгатора; $\sigma_{\Delta\delta}^2$ – дисперсия составляющей промаха БЛА, обусловленной воздействием случайных порывов бокового ветра; σ_ε – среднеквадратическая ошибка бортового радиопеленгатора; σ_δ – среднеквадратическое значение скорости случайных порывов бокового ветра; N – навигационная постоянная; V – скорость БЛА; T – эквивалентная постоянная времени бортовой системы управления БЛА; T_ε – время корреляции случайных ошибок радиопеленгатора; $l_\varepsilon = \frac{T_\varepsilon}{T}$; T_δ – время корреляции случайных порывов бокового ветра; $l_\delta = \frac{T_\delta}{T}$; $a_0(N)$, $a_{\xi ij}(N)$ – полиномиальные коэффициенты.

Расчеты проведем при следующих исходных данных: $\sigma_\varepsilon = 1,0$ град; $\sigma_\delta = 1,0$ м/с; $N = 3$; $V = 50$ м/с; $T = 1,1$ с; $T_\varepsilon = 0,1$ с; $T_\delta = 1,0$ с; угол пикирования БЛА при посадке $\theta_{\text{пик}} = 30$ град. Значения полиномиальных коэффициентов, приведенные в [9], равны: $a_0(3) = 8$; $a_0(4) = 16$; $a_{\varepsilon 0}(3) = 1$; $a_{\varepsilon 1}(3) = 4$; $a_{\varepsilon 2}(3) = 1$; $a_{\varepsilon 0}(3) = 3$; $a_{\varepsilon 1}(3) = 1$.

Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1 – Результаты расчетов точности посадки БЛА в горизонтальную сеть по сигналам радиомаяка (среднеквадратические значения промаха в боковой и продольной плоскостях)

Плоскость наведения	Среднеквадратические значения промаха, м		
	обусловленного ошибками радиопеленгатора	обусловленного случайными порывами ветра	суммарного
Боковая	0,25	0,28	0,38
Продольная	0,5	0,56	0,75

Определим требуемые размеры улавливающей горизонтальной сети, исходя из необходимости обеспечения всеракурсности захода на посадку и практически достоверного попадания БЛА в сеть. Для обеспечения всеракурсности сеть должна иметь форму круга, радиус которого, в целях получения гарантированного резуль-

тата, определим максимальным среднеквадратическим значением суммарного промаха БЛА, т.е. значением $\sigma_{\Delta \text{ прод}} = 0,75$ м, и требуемой вероятностью попадания

в сеть. Полагая закон рассеивания точек приземления БЛА гауссовым и круговым, запишем вероятность P попадания БЛА в сеть радиусом R в виде:

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma_{\Delta \text{ прод}}^2}\right) \quad (3)$$

Задаваясь вероятностью $P = 0,96$ (по правилу двух сигма), в соответствии с (3) получим:

$$R = \sigma_{\Delta \text{ прод}} \sqrt{-2\ln(1-P)} = 0,75 \cdot 2,54 = 1,9 \text{ м.}$$

Следовательно, для практически достоверного попадания БЛА в горизонтальную сеть в форме круга, ее диаметр должен составлять 3,8 м плюс максимальный размер БЛА (длина фюзеляжа или размах крыльев). Можно использовать сеть в форме квадрата со стороной, равной диаметру круга.

Таким образом, предлагаемый способ точной посадки БЛА обеспечивает его попадание в улавливающую сеть малых размеров в автоматическом автономном режиме при минимуме используемого наземного оборудования, включающего изотропный радиомаяк и горизонтальную улавливающую сеть. Способ обеспечивает произвольный ракурс захода БЛА на посадку, в простых и сложных метеоусловиях, при использовании для посадки малой площадки не более единиц метров в поперечнике. При этом гарантируются низкая вероятность повреждения БЛА за счет амортизирующих и гасящих свойств улавливающего устройства и, соответственно, высокая кратность применения БЛА. Экономия массы в 12-15% и более (до 26%) позволит увеличить дальность, продолжительность полета, расширить круг решаемых задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системы адаптивного управления летательными аппаратами. / А.С. Новоселов, В.Е. Болнокин, П.И. Чинаев, А.Н. Юрьев. - М. Машиностроение, 1987. 280 с.
2. Лобанов Н.А. Основы расчета и конструирования парашютов. – М.: Машиностроение, 1965. 362 с.
3. Овинов А.В. Способы взлета и посадки летательных аппаратов и взлетно-посадочная система для осуществления этих способов. Патент РФ № 2466913, 2010.
4. Николаев Р.П., Григорьев Д.В., Весельев А.В. и др. Способ посадки летательного аппарата. Патент РФ № 2208555, 2001.
5. Шептовецкий А.Ю. Способ посадки беспилотного летательного аппарата. Патент РФ № 2278060, 2005.

6. Шептовецкий А.Ю. Способ посадки сверхлегкого беспилотного летательного аппарата. Патент РФ № 2307047, 2006.
7. Агеев А.М., Волобуев М.Ф., Михайленко С.Б. и др. Способ точной посадки беспилотного летательного аппарата. Патент РФ № 2539703, 2013.
8. Денисов В.П., Дубинин Д.В. Фазовые радиопеленгаторы. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2002, 251 с.
9. Волобуев М.Ф., Замыслов М.А, Михайленко С.Б., Орлов С.В. Методика оценки точности автоматической системы посадки самолета в условиях воздействия случайных возмущений // Сборник докладов XII МНТК «К и ВТ XXI века», том 2. Воронеж, НПФ «САКВОЕЕ», 2011. 878 с.