

Д.А. АМИНЕВ,
канд. техн. наук,
Н.Л. ЛИТВИНОВА,
студент,
А.С. СВИРИДОВ,
аспирант,
С.У. УВАЙСОВ,
д-р техн. наук
(МИЭМ НИУ ВШЭ,
Москва)
aminev.d.a@yandex.ru
verchenko.n@gmail.com
asviridov@hse.ru
uvaysov@yandex.ru

Исследование возможностей использования ультразвуковых дальномеров для построения систем посадки летательных аппаратов

Проведен анализ этапов посадки летательных аппаратов. Предложен способ измерения высоты самолета над взлетно-посадочной полосой при посадке с использованием ультразвукового дальномера. Проведен расчет процесса распространения и отражения ультразвуковых волн от взлетно-посадочной полосы до летательного аппарата. Определен набор основных параметров ультразвуковых приемопередатчиков для построения высотомеров системы посадки.

Посадка самолета, заход на посадку, ультразвуковой высотомер, ультразвуковой датчик

Интеграция бортового радиоэлектронного оборудования, осуществляющего навигацию с применением глобальных навигационных спутниковых систем, штатных систем летательных аппаратов (ЛА), позволяет автоматизировать все процессы полета [1–3]. Посадка по приборам с использованием глобальных навигационных спутниковых систем является наиболее перспективной, так как при достаточно высокой точности определения координат, вектора скорости и высоты полета автоматическая посадка может выполняться даже на взлетно-посадочную полосу (ВПП) аэродромов, не оборудованных стандартными системами инструментальной посадки.

Точность определения координат по долготе и широте в два метра вполне достаточна, чтобы не промахнуться мимо ВПП, но для выполнения мягкой посадки нужна точность по высоте порядка нескольких сантиметров, что приводит к необходимости совершенствовать авиационные приборы, комплексы и системы выполнения завершающих этапов полета (заход на посадку и посадка).

Известны два варианта захода на посадку – инструментальный и визуальный [4]. Визуальный заход на посадку производится без использования радионавигационного оборудования, по естественной линии горизонта и другим визуальным ориентирам. Инструментальный заход на посадку выполняется с применением радионавигационного оборудования и в зависимости от навигационной системы подразделяется на точный и неточный.

В любом случае, какая бы навигационная система ни использовалась для инструментальной посадки, для ее выполнения необходимо знать истинную высоту полета ЛА. Для решения этой задачи применяют высотомеры.

Заход на посадку и посадка (рис. 1) являются самыми ответственными этапами полета, так как возможность исправить ошибку летчика или автоматической системы посадки уменьшается по мере снижения высоты. Сложность этого маневра обусловлена тем, что пилотирование ЛА осуществляется в условиях значительного изменения высоты и скорости полета. К тому же необходимо обеспечить мягкую посадку и не допустить выкатывания на концевую полосу безопасности (КПБ). С целью обеспечения надежности посадки и безопасности воздушного движения аэропорты оборудуются автоматическими системами захода на посадку и посадки. Основная задача автоматических систем – вывод ЛА на линию курса – обеспечивается курсовым (КРМ) и глиссадным (ГРМ) радиомаяками.

Этап посадки ЛА начинается с высоты 15 м над уровнем торца ВПП до приземления и заканчивается пробегом по аэродрому до полной остановки. Для легких самолетов этап посадки может начинаться с высоты 9 м. Воздушный участок посадки длится порядка 6–10 с и включает несколько стадий: выравнивание, выдерживание, парашютирование, приземление и пробег.

На этапе выравнивания происходит грубый подвод самолета к ВПП на высоту 0,5–1 м. Высота начала выравнивания обычно равна 9–15 м. На этапе выравнивания измеряется истинная высота полета с помощью радиовысотомера малых высот. Например, максимальная точность современной радиовысотомерной системы «Волна-2К-01» [5] не превышает величину

$$\pm(0,3 + 0,03h), \quad (1)$$

где h – измеренная высота полета, м.

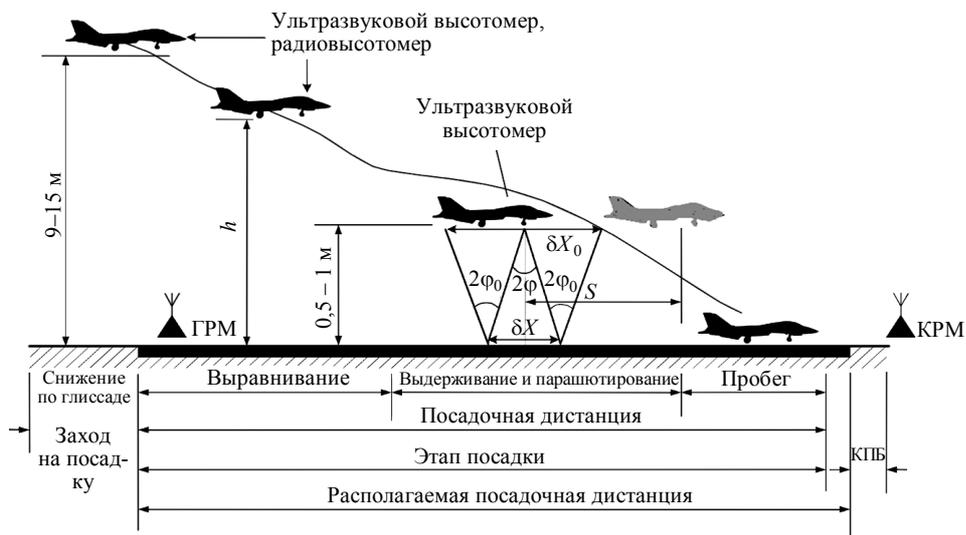


Рис. 1

При выдерживании происходит точный подвод ЛА к ВПП с одновременным уменьшением скорости, высоты полета и увеличением угла атаки до значений, при которых становятся возможными приземление и устойчивый пробег самолета. Выдерживание начинается с высоты 0,5–1 м, заканчивается этапом парашютирования и касанием поверхности ВПП с дальнейшим пробегом и остановкой ЛА.

Таким образом, для реализации возможности плавной посадки по приборам в автоматическом режиме с автоматическим плавным уменьшением скорости, высоты полета и увеличением угла атаки требуется обеспечить высокую точность измерения истинной высоты полета ЛА до момента его приземления.

Для достижения сантиметровой и большей точности измерения истинной высоты полета ЛА предлагается использовать акустический метод измерения высоты с применением ультразвукового высотомера, характеризующегося малыми габаритами, низким потреблением энергии, а также небольшой стоимостью. Комплексование ультразвукового высотомера со спутниковой навигационной системой наряду со штатными барометрическим и радиовысотомером решит проблему измерения на малых высотах (до 15 м). Ультразвуковой высотомер начнет работать при заходе на посадку и выравнивании. В момент, когда высотомер «увидит» землю, система автоматической посадки будет получать информацию о высоте непосредственно от него.

Подтвердим математическими выкладками возможность использования ультразвука на стадии выдерживания и парашютирования. Для этого проведем расчет элементов захода на посадку с учетом горизонтальной скорости движения ЛА на стадиях выравнивания и выдерживания. Именно на стадии выравнивания ультразвуковой высотомер должен «увидеть» землю, а на стадии выдерживания – передать информацию об истинной высоте полета ЛА в систему автоматической посадки.

Согласно стандартам ИКАО все ЛА по скорости разделены на пять категорий [1]. Расчет выполним для максимальной скорости порога пересечения ВПП 390 км/ч. Такая скорость присуща ЛА категории Е. Очевидно, что если расчеты подтвердят возможность использования ультразвукового высотомера на скоростях этой категории, то на меньших скоростях полета измерение высоты будет происходить с большей точностью. При этом минимальная (V_{\min}) и посадочная ($V_{\text{пос}}$) скорости согласно работе [1] заданы соотношением

$$V_{\text{пос}} = 0,94 V_{\min} = 0,94 \cdot 390 \text{ км/ч} = 366,6 \text{ км/ч} \approx 102 \text{ м/с}. \quad (2)$$

Таким образом, минимальная величина горизонтальной скорости полета ЛА категории Е над ВПП, при которой ультразвуковой высотомер должен «видеть» землю, равна примерно 102 м/с.

Ультразвуковой метод измерения расстояния

Метод измерения использует ультразвуковой импульс [6, 7], посылаемый устройством. Отраженный от препятствия сигнал поступает обратно к приемнику и фиксируется датчиками. Высота над ВПП определяется временным запаздыванием принимаемого сигнала относительно излучаемого. Преимущества ультразвукового метода измерения расстояния состоят в возможности измерять расстояния до сложных

объектов (например, от сыпучих веществ или сильно отражающих поверхностей), оснащать датчики цифровым и/или аналоговым выходами, выбрать угол раскрытия диаграммы направленности, в высокой точности определения расстояний. Пьезорезистивный преобразователь может служить как излучателем, так и приемником ультразвуковых импульсов, поэтому есть возможность создать ультразвуковые датчики [8] с одним преобразователем.

К недостаткам можно отнести сложность измерения расстояния до сильно поглощающих и изогнутых поверхностей.

Основные исходные данные для расчета смещения самолета S относительно прямого ультразвукового луча, направленного перпендикулярно посадочной полосе (см. рис. 1):

- скорость распространения ультразвуковой волны, c , м/с;
- время распространения ультразвукового луча, T , с;
- высота самолета над ВПП, h , м;
- диаметр принимаемого ультразвукового луча, δX_0 , м;
- скорость движения самолета, V , м/с;
- смещение самолета, $S = V \times T$ [м].

Скорость распространения ультразвуковой волны в воздухе, м/с:

$$c = 331,41(1 + \alpha_0 \theta), \quad (3)$$

где $\alpha_0 = 1,83 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$ – температурный коэффициент скорости звука при 0°C ; θ – температура по шкале Цельсия. Согласно расчетам эти соотношения справедливы для звуковых волн с частотой до 10^8 Гц [4].

Время распространения прямого ультразвукового луча от излучателя до приемника на высоте h определяется формулой

$$T = 2h/c. \quad (4)$$

Из теории ультразвука известно, что ультразвуковой излучатель имеет диаграмму направленности, в которой излучение отклоняется от центрального вектора на угол φ . Угол φ зависит от частоты и диаметра излучателя и рассчитывается по формуле

$$\varphi = \arcsin \frac{c}{df}, \quad (5)$$

где d – диаметр излучателя; f – частота излучения.

Диаметр падающего на полосу луча зависит от высоты h и угла φ и рассчитывается по формуле:

$$\delta X = 2h \sin \varphi. \quad (6)$$

Диаметр луча, принимаемого на высоте h , зависит от угла отражения φ_0 и диаметра луча, падающего на полосу, и рассчитывается по формуле

$$\delta X_0 = \delta X + 2h \sin \varphi_0. \quad (7)$$

Для получения полной картины исследования построены графики, иллюстрирующие следующие зависимости:

- смещения самолета S , летящего со скоростью V на высоте h , относительно прямого ультразвукового луча (рис. 2, а);
- угла φ от частоты и диаметра излучателя дальномера в пределах $d \in [0; 0,02 \text{ м}]$, $f \in [20 \text{ кГц}; 1 \text{ МГц}]$ (рис. 2, б);
- диаметра падающего луча δX на ВПП от высоты самолета над полосой и угла излучения (рис. 2, в);
- диаметра δX_0 отраженного луча на высоте h от диаметра луча, падающего на полосу, и угла отражения (рис. 2, г).

Как видим, смещение самолета линейно возрастает с увеличением скорости и высоты h посадки (см. рис. 2, а). На малых частотах и при малых диаметрах угол φ принимает максимальное значение 58° (см. рис. 2, б). Диаметр падающего на полосу луча δX линейно возрастает с увеличением высоты h и угла φ (см. рис. 2, в). С увеличением диаметра δX падающего луча диаметр δX_0 отраженного луча линейно увеличивается с возрастанием высоты h (см. рис. 2, г).

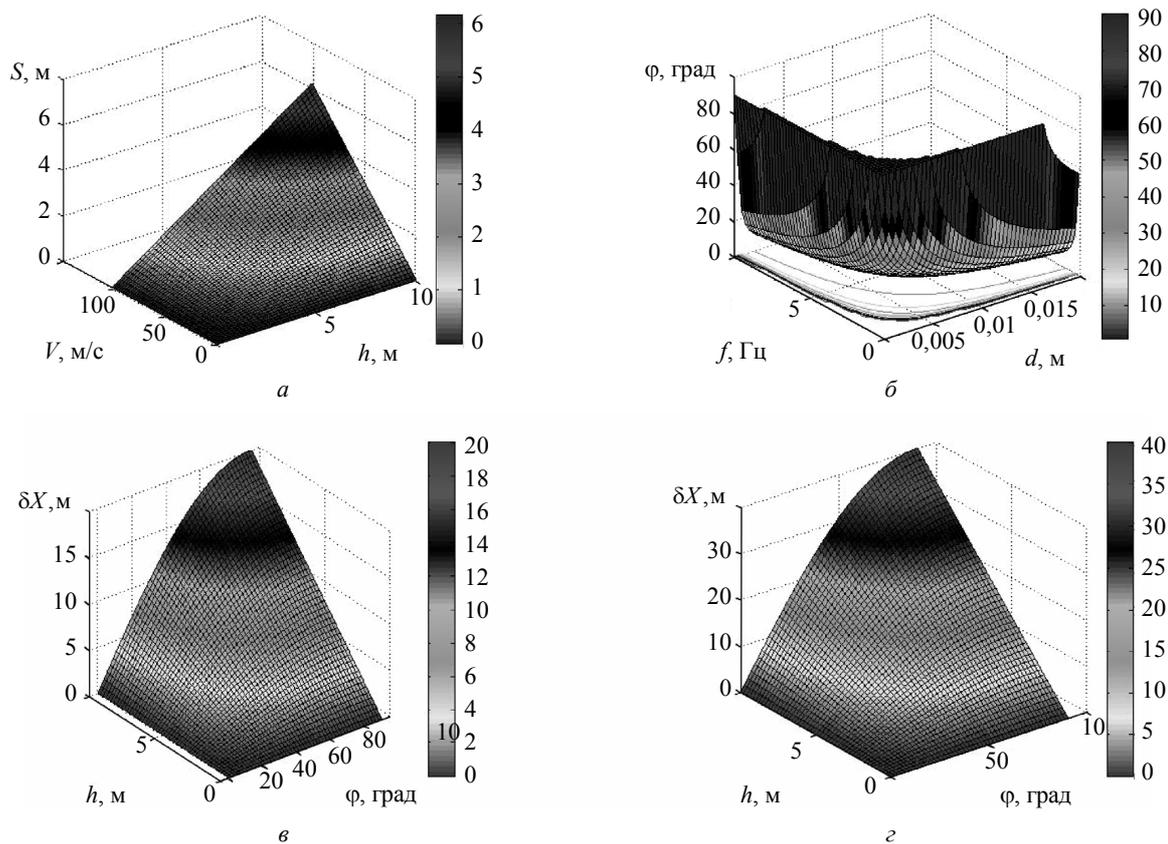


Рис. 2

Таким образом, при смещениях самолета на соответствующих скоростях и высотах диаграмма направленности отраженного ультразвукового луча захватывает место излучателя. Так, при полете самолета на высоте 5 м со скоростью 102 м/с его смещение составит 4 м, при этом диаметр принимаемого ультразвукового луча будет 20 м, следовательно, передатчик и приемник ультразвукового излучения можно располагать в непосредственной близости друг от друга или использовать единый приемопередатчик.

Однако кроме диаграммы направленности необходимо учитывать чувствительность приемного датчика, мощность излучаемого, отраженного и принимаемого сигналов. Так как коэффициент отражения ультразвука от бетона почти равен единице, то потерями при отражении от ВПП можно пренебречь. Тогда максимальную высоту h , м, измеряемую ультразвуковым дальномером, можно рассчитать по формуле

$$h = \frac{\text{SPL} - \text{AS}}{2\delta}, \quad (8)$$

где SPL – уровень звукового давления; AS – чувствительность приемного датчика; δ – коэффициент затухания ультразвуковых колебаний.

Реализация метода на основе ультразвуковых дальномеров

Основными производителями дальномеров являются компании «Mastech», «Vertex», «Skil», «Hammer», «S-Line», «Murata» и др. Ультразвуковые дальномеры имеют маленькие габариты и вес (около 150 г), могут эксплуатироваться в широком диапазоне температур ($-30 \dots +60$ °C), работают на частотах до 1 МГц, измеряют расстояния до 20 м с точностью 10 см и более и могут быть легко установлены на борту ЛА.

Главными элементами дальномера являются приемник и передатчик ультразвуковых волн. Основные параметры некоторых ультразвуковых датчиков [9, 10], пригодных для эксплуатации на борту ЛА, приведены в таблице.

При частоте ультразвука порядка 100 кГц затухание δ в воздухе при нормальных условиях составляет 1 дБ/м. В соответствии с выражением (8) построена зависимость измеряемой высоты h от уровня звукового давления и чувствительности (рис. 3).

Параметры	МА40В8R	МА40В8S	МА40Е7S-1	НС-SR04
	Приемник	Передатчик	Приемник, передатчик	
Диаметр, мм	16	16	18	16
Чувствительность, дБ	63±3	–	72	–
Звуковое давление, дБ	–	120	106	–
Угол рассеивания, град	50	50	75	15
Разрешение, мм	9	9	9	3
Детектируемое расстояние, м	0,2...6	0,2...6	0,2...3	0,02...4

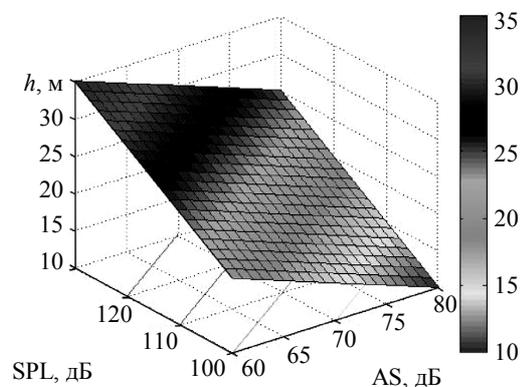


Рис. 3

Как видим (см. рис. 3), ультразвуковые датчики обеспечивают измерение высоты до 5 м и более. Например, при уровне звукового давления передатчика в 120 дБ и чувствительности приемника 60 дБ максимальная высота равна 30 м.

Таким образом, проведенное теоретическое исследование и построенные на его основе зависимости высоты и скорости при посадке подтверждают возможность использования ультразвуковых дальномеров в системе посадки летательных аппаратов.

По выполненным расчетам, диаметр ультразвукового луча, принимаемого датчиком на борту ЛА при посадке, в несколько раз превышает смещение самолета, следовательно, задача автоматической посадки ЛА с применением ультразвукового дальномера вполне решаема.

Проанализировав технические характеристики ультразвуковых датчиков, можно сделать вывод, что основными параметрами являются диаграмма направленности, частота ультразвуковых колебаний, уровень звукового давления передатчика и чувствительность приемника.

Учитывая параметры существующих ультразвуковых датчиков и их широкую номенклатуру, можно выбрать или разработать ультразвуковой дальномер, встраиваемый в систему посадки летательных аппаратов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № НК 14-07-00422\14).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила аэронавигационного обслуживания. Производство полетов воздушных судов. Т. 1. Правила производства полетов. Международная организация гражданской авиации. 2006. 386 с.
2. Аминев Д.А. и др. Embodiment of the input path receiver of satellite navigation system // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий: Материалы междунар. науч.-практ. конф., г. Сочи, 10 окт. 2013. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. Р. 333–335.
3. Aminev D.A. et al. 24-channel receiver block for aviation satellite navigation system // Там же. С. 484–487.
4. Мамаев В.Я. и др. Воздушная навигация и элементы самолетовождения. СПб.: СПбГУАП, 2002. 256 с.
5. Радиовысотомерная система «Волна-2К-01» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ktrv.ru/production/69/174/182/?PHPSESSID=6b095306723d49e43b4a66534f2a436f> (дата обращения: 04.09.2014).
6. Горбатов А.А., Рудашевский Г.Е. Акустические методы измерения расстояний и управления. М.: Энергоиздат, 1981. 208 с.
7. Аминев Д.А. и др. Методы измерения фазы и временных параметров импульсов // Труды научно-исследовательского института радио. 2013. № 4. С. 64–70.

8. Аминев Д.А., Увайсов С.У. Алгоритм распределения пропускной способности систем регистрации сигналов от множества датчиков // Датчики и системы. 2012. №. 5. С. 26–29.
9. Ультразвуковые датчики Murata [Электронный ресурс]. URL: <http://www.symmetron.ru/suppliers/sensors/ultrasonic.shtml> (дата обращения: 04.09.2014).
10. Ultrasonic Ranging Module HC - SR04 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.micropik.com/PDF/HCSR04.pdf> (дата обращения: 04.09.2014).

Поступила в редакцию 26.05.14

Study of Ability to Use Ultrasonic Range Finders for Constructing Systems of Aircraft Landing

D.A. AMINEV, N.L. LITVINOVA, A.S. SVIRIDOV, AND S.U. UVAISOV

The aircraft landing stages are analyzed. A method for measuring the height of an aircraft above the runway using an ultrasonic range finder during landing is proposed. The process of propagation and reflection of ultrasonic waves from the runway to the aircraft is calculated. A set of basic parameters of ultrasonic transceivers to build altimeters for landing systems is defined.

Aircraft landing, landing approach, ultrasonic altimeter, ultrasonic sensor