

УДК 621.383.8

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ ПОСАДКА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В. Г. Бондарев, Д. В. Лопаткин, Д. А. Смирнов

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж)

Поступила в редакцию 07.03.2018 г.

**Аннотация.** Оптико-электронные системы в настоящее время находят все более широкое применение в системах авиационного оборудования беспилотных летательных аппаратов. Важнейшим измерительным средством в последние годы становятся системы технического зрения, обладающие высокой информативностью. В статье показан способ определения пространственного и относительного положения беспилотного летательного аппарата относительно взлетно-посадочной полосы для выполнения автоматической посадки.

**Ключевые слова:** системы технического зрения, инфракрасные ориентиры, обработка изображений, летательные аппараты, навигация, посадка, алгоритм.

**Annotation.** The optoelectronic systems are now increasingly used in aircraft systems for unmanned aerial vehicles. The most important instrument in recent years are machine vision systems, which has high informativeness. The method for determining the spatial and is relative position of an unmanned aerial vehicle relative to the runway for automatic landing.

**Keywords:** machine vision systems, infrared points, image processing, unmanned aerial vehicles, navigation, landing, algorithm.

### ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие беспилотной авиации, наблюдаемое в последние десятилетия, выявило как ее существенные достоинства, так и недостатки. Отсутствие человека на борту, а также оборудования обеспечивающего его функционирование сняло ограничения, как на вес летательных аппаратов, так и на предельные перегрузки. Однако, беспилотная авиация выдвинула новые требования к авиационной технике, которые прежде в значительной степени сглаживались наличием на борту человека. Так существенно возросли требования к качеству связи, которая обеспечивает теперь не только эпизодическую передачу информации, но и оказалась задействованной в контуре управления полетом. Обострились проблемы в навигации БЛА, что особенно заметно проявляется для малых и сверхмалых аппаратов.

### АНАЛИЗ ЗАДАЧИ ПОСАДКИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Одним из наиболее ответственных этапов применения БЛА, выполнение которого в автоматическом режиме давно стало насущной необходимостью, является посадка на аэродромы, посадочные площадки, палубы авианесущих кораблей [2].

Для применяемых в настоящее время неавтоматических способов посадки БЛА характерны недопустимо высокий уровень потерь и ускоренное, нерациональное расходование технического ресурса. Анализ показывает, что количество авиационных происшествий на этапе посадки составляет порядка 12–15 % от общего числа происшествий, из них более 40 % заканчиваются потерями БЛА.

Основным препятствием на пути гарантированного решения задачи автоматизации посадки является отсутствие удовлетворительных способов измерения положения БЛА. Анализ существующих методов определения

---

© Бондарев В. Г., Лопаткин Д. В., Смирнов Д. А., 2018

координат БЛА относительно взлетно-посадочной полосы (ВПП) показывает, что эти методы либо обеспечивают низкую точность, не удовлетворяющую требованиям к системам автоматической посадки, либо для реализации этих методов требуется технически сложное оборудование, обладающее значительными массами, габаритами и стоимостью.

В последние годы активно ведутся исследования по внедрению визуальных систем посадки с использованием систем технического зрения и широким применением алгоритмов распознавания изображений [2]. Достоинством таких систем является возможность автономной (не привязанной к внешним системным компонентам и средствам) посадки. Недостатками предлагаемых систем видимого диапазона являются сложность алгоритмов, большие вычислительные затраты, не позволяющие реализовать системы на малых БЛА, зависимость от времени суток, погодных условий (дымка, снег, дождь, туман), влияние приземных градиентов температуры воздуха, а также высокие требования к качеству аэродромов и посадочных площадок [3].

Таким образом, проблема заключается в том, что разрабатываемые системы посадки обладают существенными недостатками, несовместимыми с современными требованиями.

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОСАДКИ

В ВУНЦ создан опытный образец монокулярной системы технического зрения (СТЗ) [4], структурная схема которого изображена на рис. 1.

Система включает в себя комплект из трех наземных лазерных инфракрасных маяков (ИК-ориентиров) диапазона 1,55 мкм, размещаемых вдоль ВПП, бортовую цифровую видеокамеру диапазона 0,9...1,7 мкм с вариообъективом и узкополосный (1,55 мкм) фильтр, установленные на трехступенном гиросtabilизированном управляемом подвесе. СТЗ БЛА обеспечивает автоматический заход на посадку до высоты  $H = 0$ .

Разработанное алгоритмическое обеспечение в бортовом вычислителе позволяет осуществлять поиск, захват, распознавание и сопровождение ИК-ориентиров, вычисление угловых и линейных координат самолета относительно ВПП и формирование заданных значений рассогласования этих координат от линии глissады в автопилот БЛА для формирования в нем управляющих воздействий [4].

Программная обработка изображений осуществляется с целью определения координат маяков на фотоматрице. Особенностью этой задачи является ее навигационная

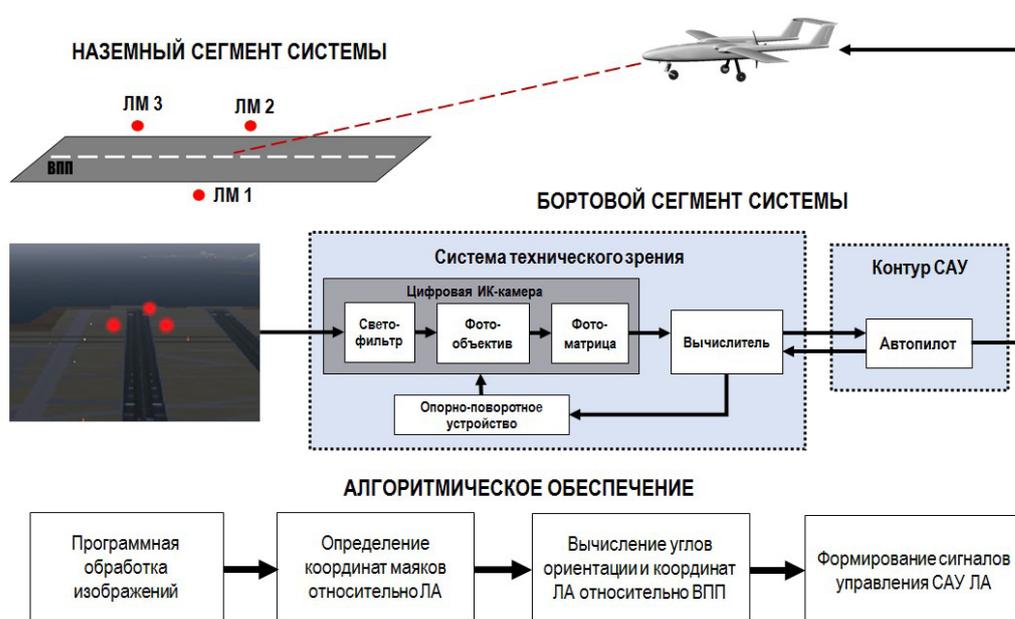


Рис. 1. Структурная схема системы посадки

направленность, и поэтому требования к минимизации погрешностей измерения достаточно высоки.

Значительные флуктуации функции яркости изображения, обусловленные шумами фотоматрицы существенно ухудшают метрологические возможности системы технического зрения. Естественным путем решения этой проблемы является обработка изображения, основанная на использовании статистических методов. Поиск особых точек изображения с субпиксельной точностью, в нашем случае – изображений лазерных маяков, необходимых для решения задачи навигации осуществляют как правило посредством метода наименьших квадратов, либо корреляционного подхода [5]. Однако, эти методы требуют значительных вычислительных ресурсов, поэтому реализован весьма простой, но эффективный подход, основанный на определении центра функции яркости изображения маяка. Центр функции яркости изображения метки определяется подобно тому, как вычисляется центр массы объемного тела [6]. Определение границы изображения маяка выполняется путем его бинаризации, причем в качестве порогового значения выбирается величина определяемая следующим образом

$$R_{\text{пор}} = \frac{1}{2I_{\text{вн}}} \sum_{i,j \in K} R(i,j) + \frac{1}{2I_{\text{внеш}}} \sum_{i,j \notin K} R(i,j), \quad (1)$$

где  $I_{\text{вн}}$  – число пикселей выбранных во внутренней области  $K$  изображения маяка,  $I_{\text{внеш}}$  – число пикселей выбранных во внешней области изображения маяка.

Тогда координаты центра яркости изображения маяка (по аналогии с центром массы тела) вычислим следующим образом,

$$X_0 = \frac{r \sum_{i,j \in K} R(i,j) \cdot (i-1/2)}{R}, \quad (2)$$

$$Z_0 = \frac{r \sum_{i,j \in K} R(i,j) \cdot (j-1/2)}{R}, \quad (3)$$

где  $r$  – размер пиксела,  $R_{ij}$  – яркость пиксела в зависимости от номера строки ( $i$ ) и столбца ( $j$ ),  $K$  – внутренняя область изображения

метки, удовлетворяющая условию  $R(i,j) \geq R_{\text{пор}}$ ,  $R = \sum_{i,j \in K} R(i,j)$  – интегральная яркость изображения области  $K$ .

Вычисление навигационных параметров осуществляется путем решения системы шести нелинейных уравнений.

$$\left. \begin{aligned} &(a_{13}F + a_{11}z_{g1})(x-l_{x1}) + \\ &+ (a_{23}F + a_{21}z_{g1})(y-l_{y1}) + \\ &+ (a_{33}F + a_{31}z_{g1})(z-l_{z1}) = 0, \\ &(a_{12}F + a_{11}y_{g1})(x-l_{x1}) + \\ &+ (a_{22}F + a_{21}y_{g1})(y-l_{y1}) + \\ &+ (a_{32}F + a_{31}y_{g1})(z-l_{z1}) = 0, \\ &(a_{13}F + a_{11}z_{g2})(x-l_{x2}) + \\ &+ (a_{23}F + a_{21}z_{g2})(y-l_{y2}) + \\ &+ (a_{33}F + a_{31}z_{g2})(z-l_{z2}) = 0, \\ &(a_{12}F + a_{11}y_{g2})(x-l_{x2}) + \\ &+ (a_{22}F + a_{21}y_{g2})(y-l_{y2}) + \\ &+ (a_{32}F + a_{31}y_{g2})(z-l_{z2}) = 0, \\ &(a_{13}F + a_{11}z_{g3})(x-l_{x3}) + \\ &+ (a_{23}F + a_{21}z_{g3})(y-l_{y3}) + \\ &+ (a_{33}F + a_{31}z_{g3})(z-l_{z3}) = 0, \\ &(a_{12}F + a_{11}y_{g3})(x-l_{x3}) + \\ &+ (a_{22}F + a_{21}y_{g3})(y-l_{y3}) + \\ &+ (a_{32}F + a_{31}y_{g3})(z-l_{z3}) = 0. \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где  $\alpha_{ij}$  – элементы матрицы направляющих косинусов ( $A$ ),  $i=1...3, j=1...3$ ;

$$(A) = \begin{pmatrix} \cos\psi \cos\nu & \sin\nu & -\sin\psi \cos\nu \\ \sin\psi \sin\gamma - \sin\nu \cos\psi \cos\gamma & \cos\gamma \cos\nu & \cos\psi \sin\gamma + \sin\psi \sin\nu \cos\gamma \\ \sin\psi \cos\gamma + \cos\psi \sin\nu \sin\gamma & -\cos\nu \sin\gamma & \cos\psi \cos\gamma - \sin\psi \sin\nu \sin\gamma \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$\psi$  – угол рыскания,  $\nu$  – угол тангажа,  $\gamma$  – угол крена;

$x_k, y_k, z_k$  – координаты геометрического центра объектива;  $x, y, z$  – искомые координаты маяка;  $l_{xk}, l_{yk}, l_{zk}$  – координаты маяков в горизонтальной системе координат

Исследованиями установлено, что наиболее быструю сходимость обеспечивает метод последовательных приближений. При использовании разработанной процедуры определения нулевого приближения уже в первом приближении достигается погреш-

ность не хуже 0,05 %, что вполне приемлемо для бортового алгоритма.

Масса комплекта бортовой части СТЗ не превышает 2 кг, что допускает их установку на борту БЛА малого класса (с максимальной взлетной массой до 10 кг). Возможно использование в качестве СТЗ видеокамер целевых нагрузок БЛА, используемых по целевому назначению на других этапах полета.

Наземная часть системы дополняется устройствами автоматического управления диаграммой направленности излучения, регулирования мощности источников излучения и слежения за созвездием маяков [7], а также импульсной модуляцией их излучения, что значительно расширяет ее возможности по дальности и метеоустойчивости.

Функционирование системы посадки основано на алгоритме, включающем распознавание изображений маяков, субпиксельное определение их координат на фотоматрице видеокамеры, решение системы нелинейных уравнений относительно трех линейных и трех угловых координат положения ЛА. Численное дифференцирование этих координат обеспечивает автономное функционирование системы автоматического управления на этапе посадки без использования дополнительных датчиков информации.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

При исследовании особенностей функционирования системы технического зрения проводилось имитационное моделирование, в основу которого была положена математическая модель динамики полета БЛА, интегрированная с бортовым автопилотом БЛА и авиационным инженерным симулятором, для отображения визуального представления зоны захода на посадку и модели ВПП с маяками красного цвета, отличающимися от подстилающей поверхности и близлежащих объектов.

Результаты имитационного моделирования показаны на рис. 2.

Математическая модель динамики полета формирует параметры движения БЛА, передает эти данные бортовому автопилоту. Многофункциональная оптико-электронная система фиксирует положение маяков на экране, вычисляет линейные и угловые координаты положения БЛА относительно ВПП, передает эти данные бортовому автопилоту. Бортовой автопилот в соответствии с заложенным законом управления ведет самолет по глиссаде на посадку.

С использованием данного метода удалось скорректировать алгоритмы распознавания



Рис. 2. Результаты полунатурного моделирования СТЗ с заходом на посадку с дальности  $D = 3000$  м, высоты  $H = 150$  м

изображений и определения координат, отладить работоспособность системы с бортовым автопилотом, провести цикл исследований по отработке автоматического захода на посадку с различных дальностей, в том числе оценить влияние различных условий визуальной видимости (день, ночь, туман, снег, дождь) [7], а также турбулентности атмосферы и бокового ветра [8]. Проведенное полунатурное моделирование позволило отработать различные варианты захода на посадку с использованием СТЗ, в том числе и в полностью автономном режиме по линейным и угловым координатам, полученным только от системы технического зрения.

Для полноценного решения задачи управления полетом БЛА в режиме обеспечения посадки до высоты  $H = 0$  разработан алгоритм автоматического управления, обеспечивающий выдерживание параметров посадки с заданной точностью. В основу алгоритма автоматического управления положены принципы: иерархического многоуровневого деления полётного задания на этапы полёта,

участки и фазы; разделения каналов непрерывного и дискретного управления [9].

На основании сформированных заданного путевого угла, заданного наклона траектории и заданной программы управления по скорости с учётом существующих ограничений формируется закон управления в терминах заданного крена и перегрузки, являющийся основой для работы модели штатной САУ БЛА. В продольном канале работа САУ на посадочном режиме построена на выдерживании заданного значения угла тангажа посредством рулей высоты и изменением тяги двигателя. Для управления боковым движением БЛА на этапе посадки используются аэродинамический руль направления и многосекционные элероны.

На основе полученных законов управления и рассчитанной математической модели движения БЛА на режиме посадки было проведено численное моделирование, где исследовались ошибки отклонения от заданных параметров регулирования, представленные на рис. 3 и 4.

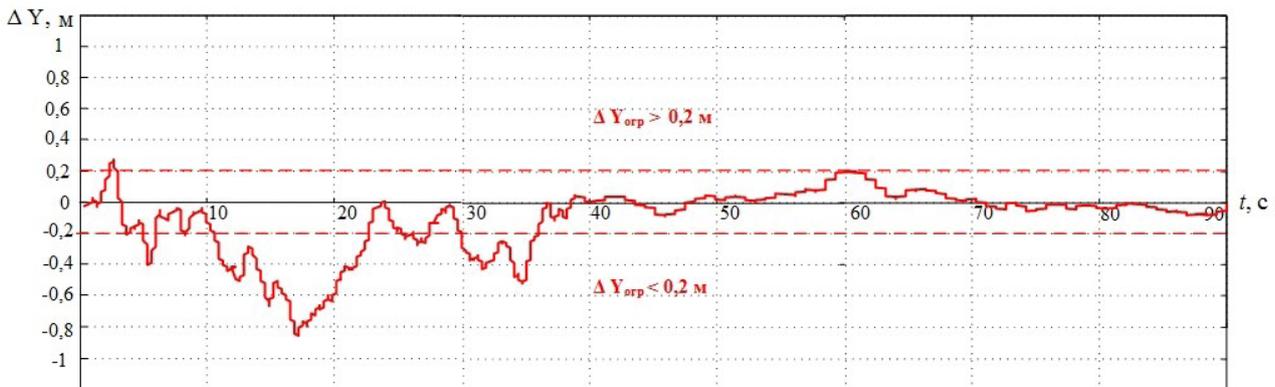


Рис. 3 Ошибки регулирования по вертикальному  $\Delta Y$  отклонению при влиянии турбулентности ветра ( $\sigma_v = 2$  м/с,  $L = 300$  м)

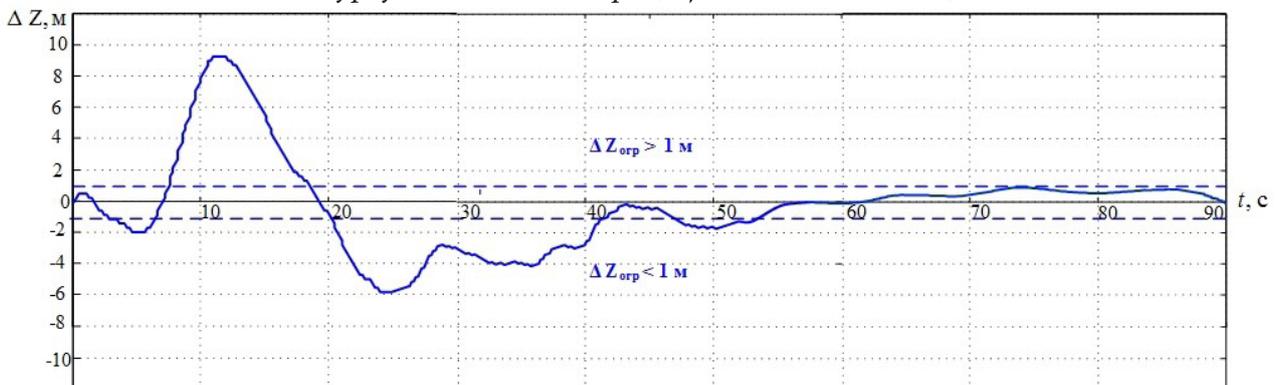


Рис. 4 Ошибки регулирования по боковому  $\Delta Z$  отклонению при влиянии турбулентности ветра ( $\sigma_v = 2$  м/с,  $L = 300$  м)

Полученные результаты моделирования показывают, что точность измерения и регулирования параметров посадки достаточна для решения задачи выполнения автоматической посадки с применением разработанного алгоритмического обеспечения.

Исследованиями установлено, что доминирующими являются погрешности дискретизации, поэтому приведем соотношения, описывающие эти погрешности измерения линейных и угловых координат ЛА.

Предел абсолютной погрешности измерения высоты

$$\Delta h^* = \frac{(X + L2) \cdot X}{F \cdot L2} \Delta y^*, \quad (6)$$

где  $\Delta y^*$  – погрешность измерения расстояния между изображениями на фотоматрице,  $L2$  – расстояние между маяками,  $F$  – фокусное расстояние объектива,  $X$  – дальность, рас-

стояние от фронтально расположенных маяков до БЛА.

Предел абсолютной погрешности измерения дальности

$$\Delta X^* = \frac{X^2}{L1 \cdot F} \Delta z^*, \quad (7)$$

где  $\Delta z^*$  – погрешности измерения расстояния между изображениями на фотоматрице.

Погрешности измерения расстояния между изображениями маяков на фотоматрице определяются размером пиксела при попиксельной обработке изображения, а при субпиксельной обработке они зависят от метода обработки и снижаются примерно на порядок.

Графики погрешностей измерения высоты, дальности в зависимости от дальности для диапазона 0...500 м, позволяющие оценить потенциальные точностные возможно-

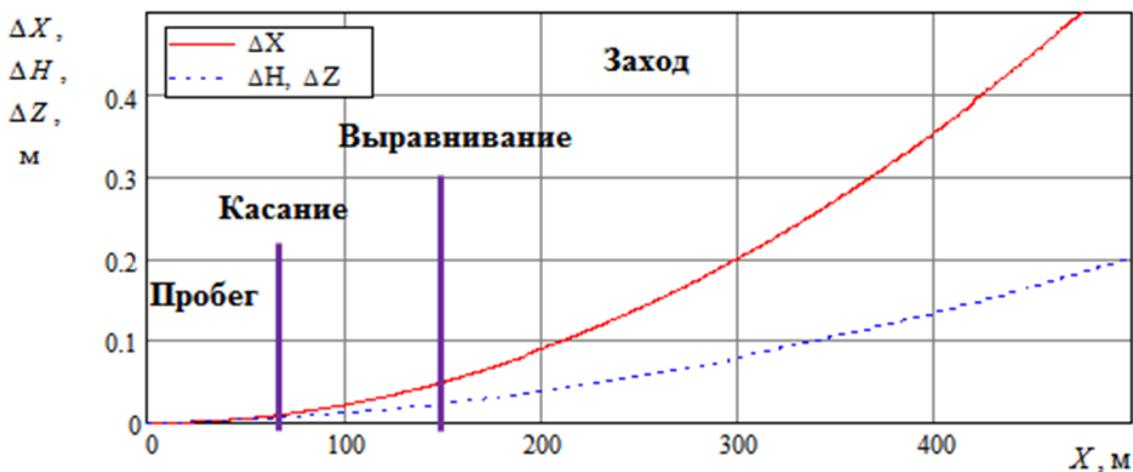


Рис. 5 Оценка точности измерения линейных координат (дальность, высота и боковое отклонение) на различной дальности от точки посадки

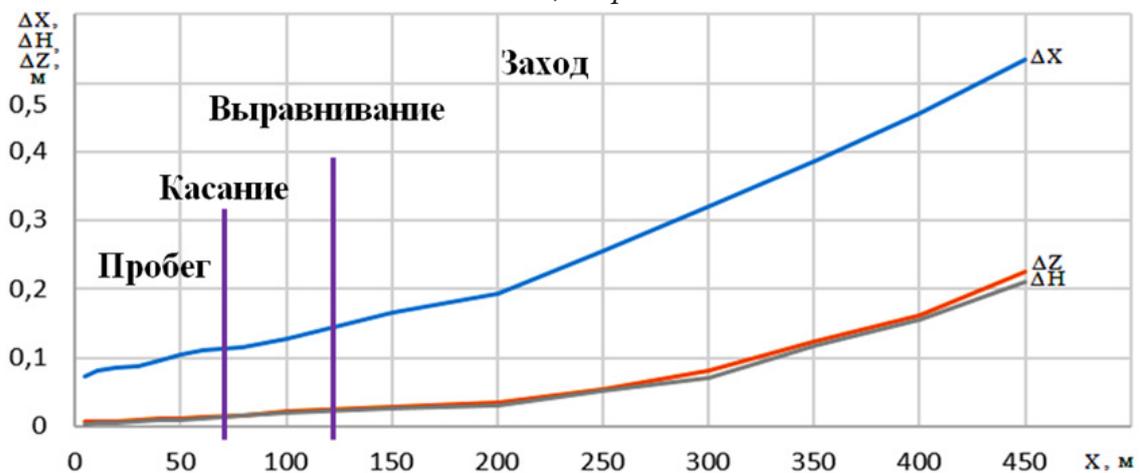


Рис. 6 Точности измерения координат в натурном эксперименте системы-аналога (Военный университет НОАК. Китай)

сти используемого подхода в момент посадки, изображены на рис. 5.

Приведенные графики погрешностей измерения параметров положения БЛА, полученные теоретическим путем, превосходно подтверждаются экспериментальными зависимостями, изображенные на рис. 6, опубликованы китайскими разработчиками системы посадки, аналогичной по принципу действия [10].

Существенным отличием этой системы от предлагаемой, является измерение только линейных координат, а также использование светодиодных маяков (диапазона 940 мкм).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предлагаемая система способна обеспечить измерение шести навигационных параметров, а также шести компонент линейной и угловых скоростей, обеспечивающих автоматическое управление полетом на посадке до  $H = 0$  без использования дополнительных датчиков.

Субпиксельная обработка изображений обеспечивает сантиметровые погрешности измерений линейных координат местоположения ЛА относительно ВПП в момент посадки, кроме этого система способна обеспечить начальную выставку ИНС за время  $< 1$  сек, с погрешностью  $< 0.01$  град.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 51747-2001 Система инструментального захода летательных аппаратов на посадку сантиметрового диапазона волн радиомаячная. Основные параметры и методы измерений.

2. Логвин А. И. Алгоритмы автоматического распознавания взлетно-посадочной полосы на видеоизображениях / А. И. Логвин,

**Бондарев В. Г.** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации авиационного оборудования, факультет авиационного оборудования, «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж).  
E-mail: bondarevstis@mail.ru

А. В. Волков // Научный вестник – М. : МГТУ ГА. 2015. – № 213. – С. 115–117.

3. Williams K. W. A Summary of Unmanned Aircraft Accident/Incident Data: Human Factors Implications / Civil Aerospace Medical Institute. – Oklahoma City, 2004. – 261 p.

4. Патент РФ 2378664 от 09.07.2008. Способ определения местоположения и углов ориентации летательного аппарата относительно взлетно-посадочной полосы и устройство для его осуществления. Заявитель и патентообладатель Бондарев В. Г., Бондарев В. В., Бондарев М. В., Ипполитов С. В., Конотоп В. И., Лейбич А. А. – № 2008128185; заявл. 09.07.2008; опубл. 10.01.2010, Бюл. № 8. – 16 с.

5. Визильтер Ю. В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения / Ю. В. Визильтер. – М. : Физматгиз, 2010. – 249 с.

6. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для учащихся вузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука, 1981. – 332 с.

7. Зеленюк Ю. И. Влияние погодных условий на надежность атмосферной оптической связи / Ю. И. Зеленюк, И. В. Огнев, С. Ю. Поляков, С. Е. Широбакин. – М. : Вестник связи, 2002. – № 4. – С. 85–97.

8. Алпатов Б. А. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов / Б. А. Алпатов, П. В. Бабаян, О. Е. Балашов, А. И. Степашкин. – М. : Радиотехника, 2008. – 176 с. Монография ГосНИИАС.

9. Котик М. Г. Динамика взлета и посадки самолетов / М. Г. Котик – М. : Машиностроение. 1984. – 134 с.

10. Yang G. Airborne Vision-Based Navigation Method for UAV Accuracy Landing Using Infrared Lamps / G. Yang. – J. Intell : Robot. Syst., 2013. – 197 p.

**Bondarev V. G.** – Candidate of Technical sciences., Assistant Professor, Department of Maintenance Aviation Equipment, Aviation Equipment Faculty, Zhukovsky-Gagarin Air Force Academy (Voronezh).

E-mail: bondarevstis@mail.ru

**Лопаткин Д. В.** – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры Эксплуатации авиационного оборудования, факультет авиационного оборудования, «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж).  
E-mail: dimkaao@yandex.ru

**Lopatkin D. V.** – Candidate of Technical sciences, Department of Maintenance Aviation Equipment, Aviation Equipment Faculty, Zhukovsky-Gagarin Air Force Academy (Voronezh).  
E-mail: dimkaao@yandex.ru

**Смирнов Д. А.** – курсант 3 курса, факультет авиационного оборудования, «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж).  
E-mail: sda134@rambler.ru

**Smirnov D. A.** – Cadet, Aviation Equipment Faculty, Zhukovsky-Gagarin Air Force Academy (Voronezh).  
E-mail: sda134@rambler.ru