

В. О. ИВАНОВ

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОСАДКИ АВТОНОМНОГО ЛЕТАЮЩЕГО РОБОТА

Представлен один из вариантов оптико-электронного устройства навигации для автоматической посадки малогабаритного автономного летающего робота. Приведены общая схема и принципы построения устройства; рассмотрены основные виды его погрешностей и результаты исследований макета.

Ключевые слова: оптико-электронное устройство, автоматическая посадка, система автоматического управления, автономный летающий робот.

Введение. Беспилотные летательные аппараты (ЛА), входящие в состав авиационных комплексов, являются на сегодняшний день перспективными, динамично развивающимися и широко применяемыми системами. Использование малогабаритных беспилотных средств обеспечивает максимальную оперативность исследований (мониторинга местности, аэрофотосъемки и т.д.) при относительно низкой стоимости эксплуатации. Значительный интерес представляют малогабаритные автономные летающие роботы (АЛР), относящиеся к классу беспилотных ЛА со взлетной массой до 5 кг [1]. Следствием массогабаритных ограничений АЛР является проблема создания бортовой авионики, обеспечивающей автономное управление ЛА на всех этапах полета. При этом вопросы управления автоматической посадкой малогабаритных АЛР вызывают особый интерес.

Посадка — крайне сложный и ответственный этап полета для всех типов летательных аппаратов. Снижение самолета перед заходом на посадку, выполнение предпосадочного маневра (глиссады), приземление и пробег по взлетно-посадочной полосе составляют совокупность этапов полета, на которые приходится значительный процент общего числа аварий и катастроф [2].

Одной из наиболее технически сложных проблем обеспечения безопасности посадки является ее автоматизация. Очевидно, что реализовать режим автоматической посадки возможно только в случае, когда система автоматической посадки удовлетворяет требуемому уровню надежности и безопасности. Таким образом, особое значение при разработке данных систем имеет качество управления летательным аппаратом и его навигация [3—5].

Эта проблематика является предметом множества исследований фундаментального и прикладного характера [6—9]. Разработка бортовых систем управления автоматической посадкой ЛА предполагает комплексное использование различных навигационных технологий. Известны традиционные радиотехнические и лазерные [7, 8] средства автоматической навигации, с помощью которых во время посадки можно определять навигационные параметры: координаты, скорость и ориентацию самолета. Из-за массогабаритных ограничений АЛР использование указанных технических средств зачастую невозможно. Применение спутниковой и инерциальной [9] систем навигации во время автоматической посадки АЛР перспективно, но не позволяет достаточно точно определить навигационные параметры и эффективно только на этапах выхода на глиссаду посадки.

Построение оптико-электронного устройства навигации. Одним из возможных путей решения задачи автоматической посадки малогабаритных АЛР является устройство навигации оптико-электронного типа, предназначенное для пилотирования по визуальным ориентирам на местности с помощью телевизионных каналов и современных методов и алгоритмов цифровой обработки изображений [10].

Использование возможностей систем технического зрения для управления подвижными объектами различных типов и назначения, включая манипуляционные и мобильные роботы, является далеко не новой, но актуальной проблемой. Для ее решения необходимо разрабатывать современные методы и алгоритмы предварительной обработки видеоизображений, распознавания и классификации образов. В ряде случаев учет специфики конкретных прикладных задач обработки и анализа изображений в режиме реального времени в совокупности с использованием различных эвристических приемов позволяет добиться искомого результата методами, пригодными для реализации в малогабаритных АЛР.

Преимущество использования для автоматической навигации АЛР оптико-электронного устройства (ОЭУ) обусловлено возможностью применения бортовой штатной оптико-телевизионной (оптико-электронной) аппаратуры и бортового компьютера, что позволит существенно уменьшить массу и габариты необходимого дополнительного оборудования. С другой стороны, применение аппаратно-программных средств ОЭУ в комплексе с другими средствами навигации позволит значительно повысить надежность и безопасность автоматической посадки АЛР.

Структурная схема оптико-электронного устройства для автоматической посадки АЛР представлена на рис. 1.

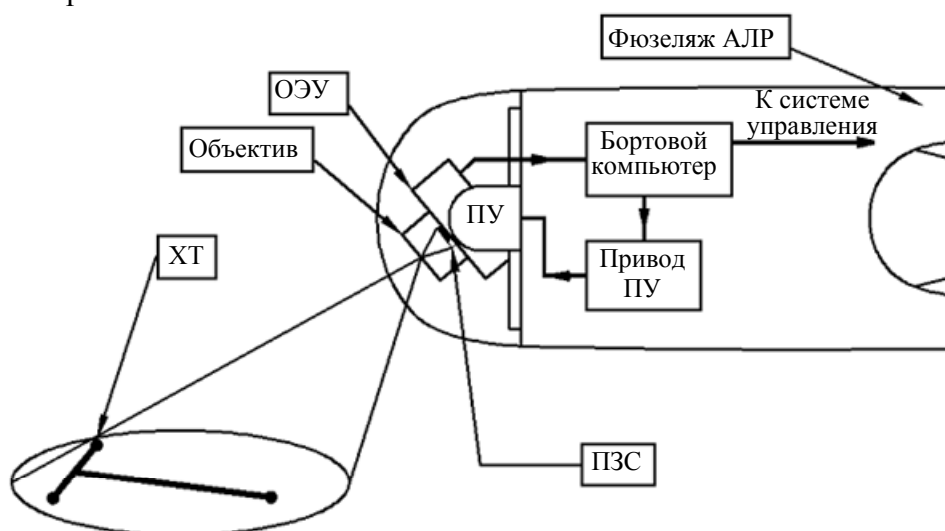


Рис. 1

Отраженное от земной поверхности оптическое излучение попадает в поле зрения объектива и проецируется на фоточувствительную ПЗС-матрицу, где оптическое изображение преобразуется в матрицу электрических зарядов. ПЗС считывает электрические заряды, преобразуя их в цифровой сигнал, поступающий на блок первичной обработки изображения — видеопроцессор бортового компьютера, где с помощью специальных алгоритмов производится фильтрация полезного сигнала и вычисляются координаты ориентиров (или специальных реперов) — характерных точек (ХТ) объекта на земной поверхности.

В вычислительном устройстве бортового компьютера по координатам характерных точек, положению поворотного устройства (ПУ) и его привода, а также по данным с других датчиков (приемника GPS, датчика скорости, дальномера, акселерометра и др.) рассчитываются параметры пространственного положения АЛР.

Среди множества методик расчета расстояния (D) от ОЭУ, вдоль его оптической оси, до характерных точек на местности выделим две [11, 12]:

- с использованием одной телекамеры, установленной на борту АЛР, и нескольких ориентиров, расстояния между которыми известны;
- с использованием двух телекамер, установленных на борту АЛР, расстояние между которыми известно с высокой точностью.

После вычисления в бортовом компьютере данные об углах ориентации АЛР и расстояниях до характерных точек объектов поступают на вход типовой (стандартной) системы управления (СУ) исполнительными механизмами АЛР.

Предложенный способ автоматической навигации, в том числе посадки АЛР, позволяет сформировать обобщенную структурную схему бортовой системы автоматического управления (САУ) роботом (рис. 2), в состав которой входят следующие элементы: бортовой компьютер (видеопроцессор, вычислительное устройство, микропроцессор), ОЭУ, привод ПУ, СУ, исполнительные механизмы (ИМ) и канал связи (КС).

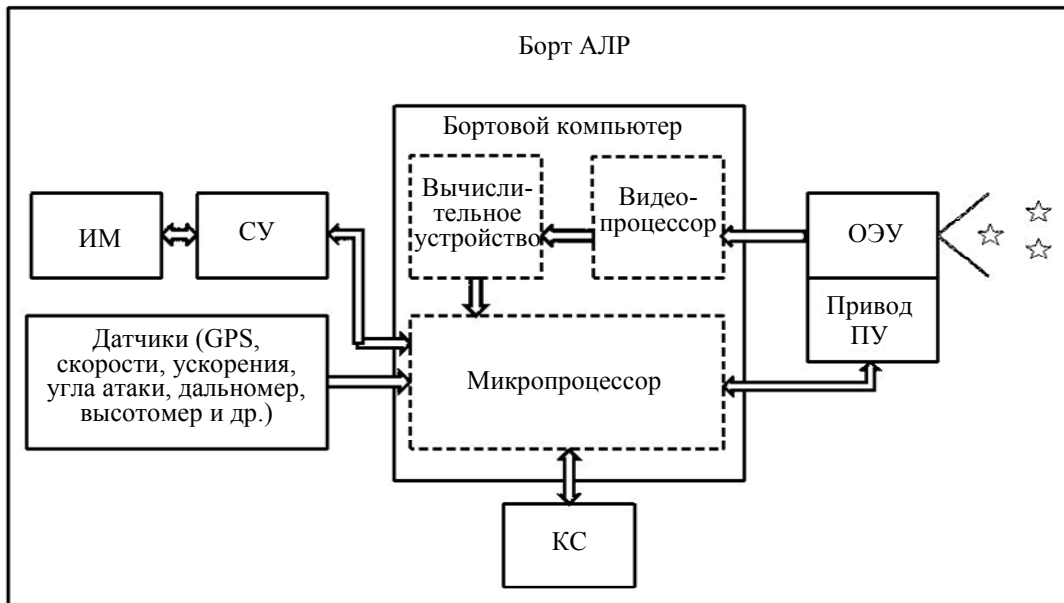


Рис. 2

Оценка погрешностей измерительной системы ОЭУ. Условно погрешности измерительной системы ОЭУ можно разделить на „внутренние“ и „внешние“ [13]. Основные виды „внутренних“ погрешностей представлены в таблице.

„Внутренние“ погрешности ОЭУ		
конструкционные	методологические	температурные
Конструкция корпуса устройства Место размещения устройства в фюзеляже АЛР Способы крепления ОЭУ на ПУ Погрешность калибровочной системы Погрешность юстировки Точность изготовления ПЗС-матрицы Ошибки привода ПУ	Погрешность метода вычислений Фильтрация шумов по нескольким измерениям Неточность формирования трехмерной модели АЛР Погрешности аналого-цифрового преобразователя	Флюктуационные шумы Температурный дрейф конструкции устройства

Под „внешними“ погрешностями понимаются следующие воздействия:

- дифракция неоднородности среды (атмосферы);
- оптические засветки устройства;
- оптическая неоднородность фона, рельефа и окружающей среды (дым, пыль);
- изменения освещенности в районе посадки;
- метеорологические условия: туман, облачность, осадки.

Основная „внутренняя“ погрешность измерений (ϵ), по результатам предварительных исследований, включает в себя следующие компоненты:

- случайная (шумовая) погрешность ($\epsilon_{СКО}$);
- погрешность калибровки оптической системы (ϵ_k);
- погрешность температурного дрейфа конструкции (ϵ_T);

— погрешность юстировки (привязки) ($\varepsilon_{\text{пр}}$).

Основная погрешность ОЭУ при однократном измерении координат характерной точки определяется как

$$\varepsilon^2 = \varepsilon_{\text{СКО}}^2 + \varepsilon_{\text{к}}^2 + \varepsilon_{\text{т}}^2 + \varepsilon_{\text{пр}}^2;$$

расчет погрешности $\varepsilon_{\text{СКО}}$ выполняется с учетом случайной угловой погрешности при измерении координат одной характерной точки:

$$\varepsilon_{\text{СКО}} = 2\omega\varepsilon,$$

где 2ω — угловое поле зрения объектива ОУЭ.

Приведем пример расчета случайных погрешностей определения линейных отклонений АЛР по курсу (ε_x) и дальности (ε_d) при вертикальном расположении оптической оси устройства (рис. 3). Исходные данные при расчете: поле зрения объектива ОЭУ (2ω) 30° , угол $\psi = 6^\circ$, расстояние $D = 150$ м.

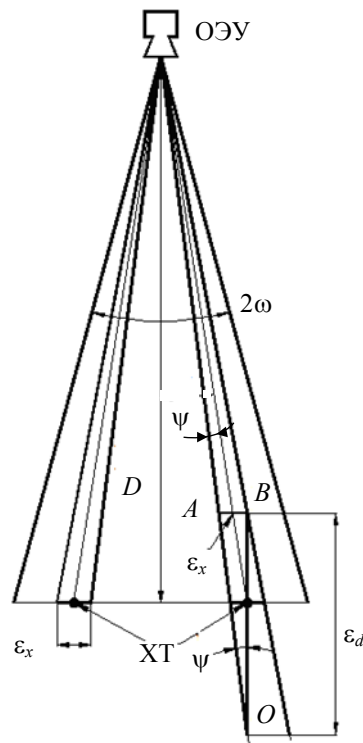


Рис. 3

Определим численные значения погрешностей для заданных условий.

Погрешность ε_x определяется соотношением

$$\varepsilon_x = \frac{2\omega}{Z} D,$$

где $Z = 40\,000$ — количество отсчетов в ПЗС-матрице (согласно паспортным данным); для заданных условий $\varepsilon_x \approx 2$ мм.

Погрешность ε_d определяется параметрами треугольника AOB (см. рис. 3). В треугольнике, в силу малости угла ψ , отрезок $AB \approx \varepsilon_x$, а $\angle AOB \approx \psi$. Тогда выражение для линейной погрешности по дальности имеет вид

$$\varepsilon_d = \frac{\varepsilon_x}{\text{tg}\psi}.$$

Для заданных условий $\varepsilon_d \approx 20$ мм.

Таким образом, линейная погрешность по дальности превышает линейную погрешность по курсу примерно в 10 раз.

С учетом накопления двух и более измерений (отсчетов) линейные погрешности по курсу и дальности рассчитываются по следующим формулам:

$$\varepsilon_x = (\sqrt{n})^{-1} \cdot \frac{2\omega}{Z} D; \quad \varepsilon_d = (\sqrt{n})^{-1} \cdot \frac{\varepsilon_x}{\operatorname{tg}\psi},$$

где n — количество измерений.

Результаты стендовых исследований. Предложенная схема построения оптико-электронного устройства для автоматической посадки АЛР и методика расчета расстояния до характерных точек на местности были опробованы на макете поворотной телекамеры в стендовых условиях.

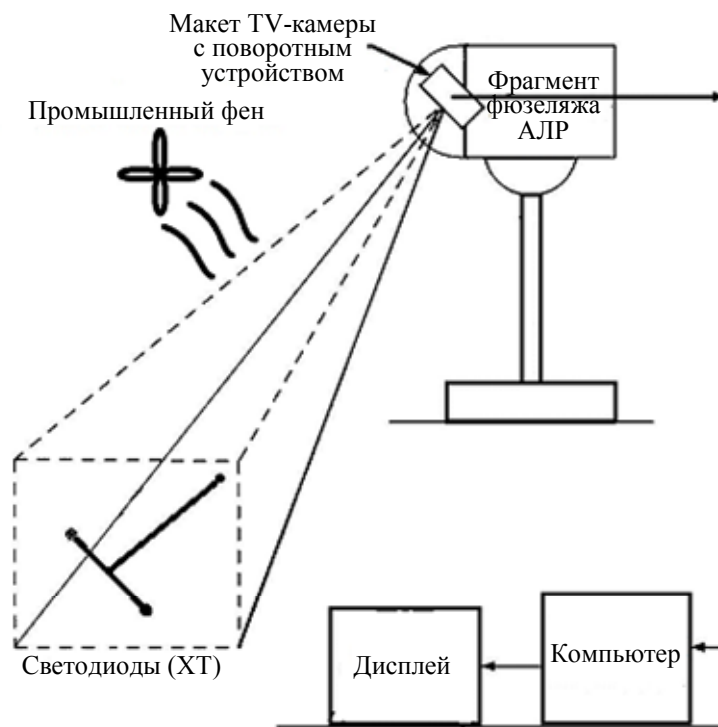


Рис. 4

Стендовое оборудование для проведения экспериментальных исследований (структурная схема приведена на рис. 4) содержит фрагмент фюзеляжа АЛР, телекамеру с поворотным двухосевым устройством, систему светодиодов с различной длиной волны (синий, красный, зеленый), компьютер с дисплеем, источник тепла и турбулентности (промышленный фен) между камерой и светодиодами.

В результате исследований подтверждена возможность использования предложенной методики расчета дальности до характерных точек объекта и вычислены координаты положения макета фюзеляжа АЛР (X, Y, Z) и углы ориентации (курс, крен, тангаж).

Результаты стендовых исследований показали также, что основной вклад в погрешность измерений, связанную с влиянием внешних возмущающих факторов, вносит дифракция оптического излучения светодиодов, вызванная температурными градиентами воздушной среды: дополнительная погрешность может составлять до 50 мкм при дальности до 10 м и температурных градиентах 50 °С. Следует отметить, что дифракция оптического излучения светодиодов зависит от длины волны (при одном и том же значении градиента температуры). Погрешности измерений для красного, зеленого и синего светодиодов отличаются на 20—50 %.

Заключение. Полученные результаты исследований подтвердили принципиальную возможность использования оптико-электронного устройства (бортовых ТВ-камер) в качестве

датчиков навигации и ориентации малогабаритных автономных летающих роботов, а также возможность разработки на основе ОЭУ математических моделей и методов построения системы автоматического управления полетом и посадкой АЛР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Распопов В. Я.* Концепция построения и проектирования авионики малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 10. С. 54—54.
2. *Зиновьев А. В., Гузий А. Г.* Информационные комплексы для автономных автоматических систем посадки // Проблемы безопасности полетов. 2008. № 8. С. 40—49.
3. *Иванов В.П.* Оптимизация управления динамическими системами на границе допустимого множества управлений методом огибающих // Тр. СПИИРАН. 2007. Вып. 4. С. 270—276.
4. *Иванов В. П.* Оптимизация вырожденного управления динамическими системами методом огибающих // Тр. СПИИРАН. 2006. Вып. 3, т. 2. 2006. С. 358—365.
5. *Михалев И. А., Окоёмов Б. Н., Чукулаев М. С.* Системы автоматической посадки. М.: Машиностроение, 1975. 216 с.
6. *Юревич Е. И.* Интеллектуальные роботы. М.: Машиностроение, 2007. 360 с.
7. *Мамаев В. Я., Сняков А. Н., Петров К. К., Горбунов Д. А.* Воздушная навигация и элементы самолетовождения. СПб: СПбГУАП, 2002. 256 с.
8. *Черный М. А., Кораблин В. И.* Самолетовождение. М.: Транспорт, 1973. 368 с.
9. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / Под ред. *М. Н. Красильщикова и Г. Г. Себрякова.* М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 280 с.
10. *Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю.* Проблемы технического зрения в современных авиационных системах // Механика, управление и информатика, 2011. № 6. С. 11—44.
11. *Алферев Г. В., Иванов В. О., Чернакова С. Э.* Устройство интеллектуального управления и обучения андроидными роботами // Процессы управления и устойчивость: Тр. 39-й науч. конф. аспирантов и студентов; Под ред. *Н. В. Смирнова, Г. Ш. Тамасяна.* СПб: Изд-во СПбГУ, 2007. С. 97—104.
12. *Севостьянов Р. А., Заблоцкая А. В., Румянцев Н. Н., Иванов В. О.* Моделирование автоматической посадки АЛР с использованием интеллектуальной системы автоматического управления // Проблемы механики и управления: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь: Изд-во Пермского гос. нац. исслед. ун-та, 2009. С. 148—155.
13. *Якушенков Ю. Г., Луканцев В. Н., Колосов М. П.* Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах. М.: Радио и связь, 1981. 180 с.

Сведения об авторе

Валерий Олегович Иванов — аспирант; СПИИРАН, лаборатория прикладной информатики и проблем информатизации общества; E-mail: ivanov4mail@gmail.com

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию
10.06.12 г.