

УДК 629.7.05, 004.932.2, 519.687

## БОРТОВОЙ УЗЕЛ ИСУ БЛА АВТОНОМНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧИ ТОЧНОЙ ПОСАДКИ И СБРОСА ГРУЗА

А.Р. Гамаюнов (*agamayunov@le-talo.ru*)

Е.М. Притоцкий (*epritotskiy@le-talo.ru*)

М.С. Ходак (*khodakms@mail.ru*)

Владимирский государственный университет имени А.Г. и  
Н.Г. Столетовых, Владимир

**Аннотация.** В статье предлагается вариант реализации бортового узла, расширяющего базовые возможности типовой СУ БЛА. Рассмотрена задача локального позиционирования над визуальной меткой при посадке и сбросе груза. Описана техническая и программная реализация.

**Ключевые слова:** СУ БЛА, локальное позиционирование, точная посадка, сброс груза, техническая реализация.

### Введение

Полет любого БЛА разделяется на этапы: взлет, выполнение миссии и посадка. Управление полетом при выполнении любого из этих этапов - это сложный процесс, в ходе которого решается широкий круг задач, связанных с определением навигационных параметров полета и выдерживания необходимого пространственного положения. Эффективность действий при решении перечисленных задач определяется большим количеством условий, основными из которых есть своевременность, точность и связанные с ними вопросы построения траекторий движения, которые обеспечивают наиболее эффективное и безопасное достижение цели текущего этапа полета.

Этап посадки является наиболее ответственным участком полета, поэтому системы управления, реализующие автопосадку по заданной траектории патентуются крупными производителями БЛА, такими как DJI [1] и SKYCATCH [2], а также способы точной посадки разрабатывают военные, например, израильская фирма Sky Sapience с проектом HoverMast [3]. Точная посадка в последнем случае обеспечивается тем, что БЛА затягивается в бокс кабелем питания, при этом высота подъема

ограничивается длиной и весом кабеля.

В других случаях автопосадка позволяет приземлиться БЛА по заданным координатам, но точность обеспечивается системой навигации GPS и зависит от числа спутников, видимых над горизонтом. В идеальных условиях (чистом поле) типичная точность современных GPS-приёмников в горизонтальной плоскости при хорошей видимости спутников и использовании алгоритмов коррекции составляет от 1 до 8 м, но на практике точности для автономной, надёжной и безопасной посадки БЛА недостаточно. Для увеличения точности локального позиционирования малых автономных вертолётчиков применяют визуальные методы с погрешностью около 42 см [Mez, 2006], однако используя современные аппаратные и программные средства, результаты можно улучшить. Рассмотрим задачу увеличения точности позиционирования в приложении к поставленным практическим задачам.

### 1.1 Описание задачи

В последнее время всё чаще крупные организации стимулируют объединение отдельных исследователей в команды для решения практических задач данной области, организовывая соревнования и площадки для испытаний БТС. Одна из таких площадок – «Робокросс» предлагает участникам разработать беспилотный летательный аппарат, способный на открытой местности в автономном режиме взлетать, перемещаться по координатам, проводить сброс полезной нагрузки в цель на заданной координатами GPS площадке, вести объективный контроль попадания полезной нагрузки посредством фото или видеофиксации и приземляться с погрешностью не более 1.5 м. Общая схема поставленной задачи показана на рисунке 1.

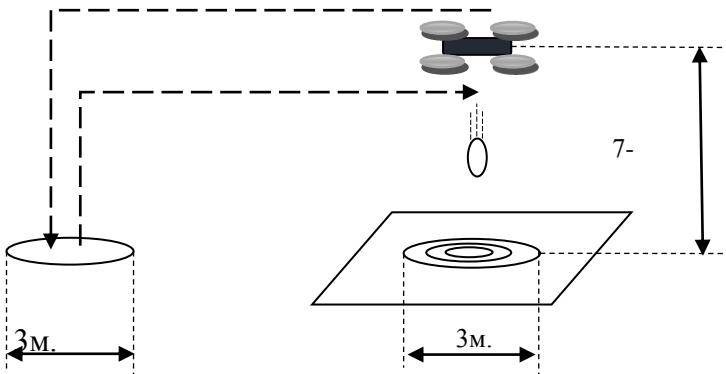


Рис. 1. Схема задачи.

Задачи автономного взлета, перемещения по координатам и видеофиксации с воздуха будем считать решенными [Bin, 2009]. Таким образом основные задачи, которые необходимо решить командам исследователей, это, во-первых, задача точной посадки, поскольку, как показала практика, точности позиционирования по данным GPS при посадке недостаточно, во-вторых, задача автоматического сброса полезной нагрузки на цель. Хотя заранее известны координаты сброса, их недостаточно для точного позиционирования. Для решения данной задачи необходимо обнаружить цель и точно над ней зависнуть.

## **1. Реализация**

### **1.1 Описание платформы**

Для решения поставленных задач будет использоваться мультироторный летательный аппарат вертикального взлёта. Задачу взлёта, полёта по точкам, управление механизмом сброса и приземления выполняет стандартный полётный контроллер. Необходимые датчики определения положения в пространстве обычно присутствуют в составе полётного контроллера. GPS и магнитометр выносятся в отдельном корпусе как можно дальше от источников помех. Так же в отдельно снизу корпуса БЛА устанавливается акустический сонар.

Поскольку точности определения местоположения при посадке и сбросе полезной нагрузки, используя только данные GPS, недостаточно, то установленный на борту дополнительный компьютер определяет точное положение БЛА относительно визуальных меток посадочной площадки и площадки для сброса, используя данные с камеры и данные полётного контроллера [Ginkel, 2013].

Не менее важной задачей бортового компьютера является построение списка заданий для полётного контроллера во время исполнения автономной миссии. Для решения задачи видеофиксации на борту БЛА установлена вторая видеокамера, направленная в сторону земли.

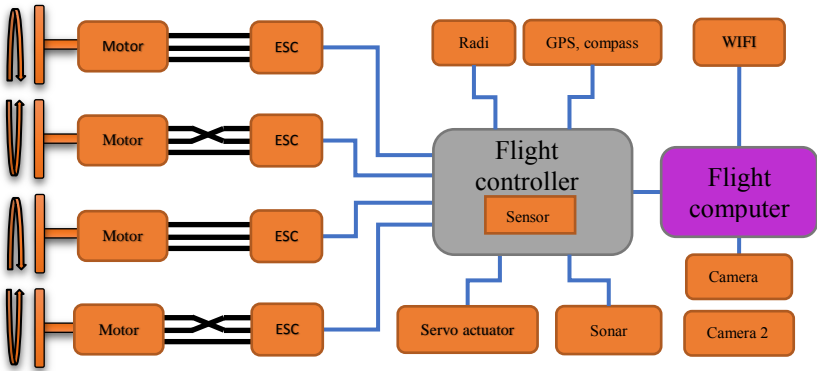


Рис. 2. Аппаратная часть.

На полётном контроллере установлена операционная система реального времени для обеспечения быстрой реакции на изменение положения БЛА в пространстве и корректировку его в соответствии с сигналом задания. Всю необходимую логику управления исполнительными механизмами и обработки данных датчиков реализует программа с открытым исходным кодом *ArduCopter*.

Бортовому компьютеру не обязательно выдерживать строгие временные интервалы, но решение его задач требует специализированных библиотек программного кода для распознавания образа посадочной площадки и площадки для сброса в видеопотоке с камеры, поэтому на нём установлена наиболее удобная для подобных разработок *OS Ubuntu*.

На бортовом компьютере в виде процесса демона работает наземная станция управления (*GCS*) в режиме прокси сервера между последовательным портом, к которому подключён полётный контроллер и управляющей программой. *GCS* организывает логику общения с полётным контроллером согласно протоколу *MAVLink*. Таким образом управляющая программа получает удобный интерфейс управления БЛА. Данные с камеры управляющая программа получает по протоколу *UVC*. Для дальнейшей обработки графических данных управляющая программа использует библиотеку технического зрения *OpenCV* [Bradski, 2008].

Так же в системе имеется канал обмена данными по последовательному порту полётного контроллера для возможности ручного управления БЛА и доступ к полётному компьютеру по *SSH* через *WIFI/Ethernet* для отладки управляющей программы.

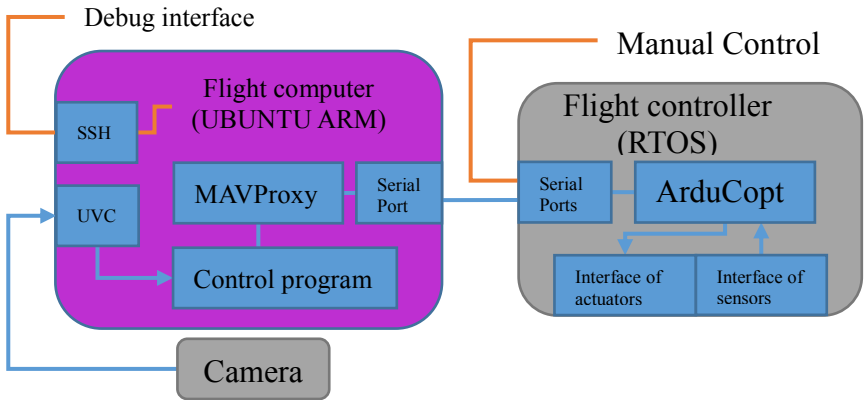


Рис. 3. Программная реализация.

## 1.2 Способ точной посадки

Предлагаемый способ точной посадки заключается в том, что бортовой компьютер БЛА при помощи алгоритмов компьютерного зрения обрабатывает временную последовательность кадров, получаемую с оптической камеры, установленной на БЛА, и содержащую данные об оптической метке, в точке посадки, для определения двух углов смещения. Бортовой компьютер также получает от полетного контроллера данные о двух углах наклона (крен и тангаж) и высоте, обрабатывает полученные данные и направляет сигналы управления на полетный контроллер для корректировки траектории и обеспечения точной посадки БЛА. Скорость регулирования и устойчивость системы зависит от параметров ПИД регулятора.

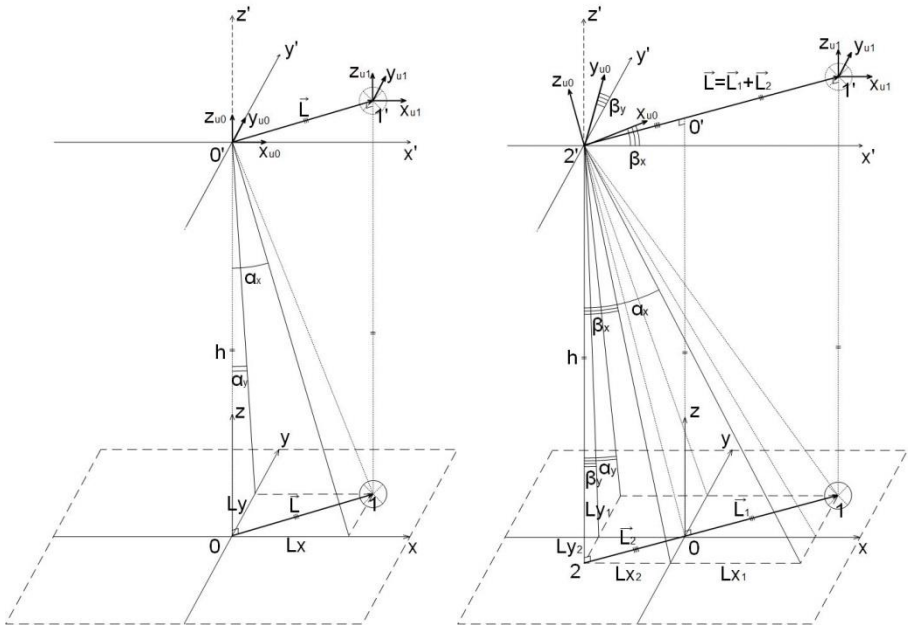


Рис. 4. Частный и общий случаи.

На рисунке 4 слева представлен частный случай, при котором углы крена и тангажа равны нулю. БЛА завис над оптической меткой на высоте  $h$ . Сигналы управления  $L_x$  и  $L_y$ , направляемые от бортового компьютера на полетный контроллер, зависят только от углов смещения  $\alpha_x$  и  $\alpha_y$  и высоты  $h$ . Вектор смещения  $L$  задает направление движения в плоскости  $x'0'y'$ .

На рисунке 4 справа представлен общий случай, при котором углы наклона (крена и тангажа)  $\beta_x$  и  $\beta_y$  не равны нулю. БЛА движется путем изменения углов наклона над оптической меткой на высоте  $h$ . Сигналы управления зависят не только от углов смещения  $\alpha_x$  и  $\alpha_y$  и высоты  $h$ , но и от углов наклона  $\beta_x$  и  $\beta_y$ . Вектор смещения  $L$  задает направление движения в плоскости  $x'2'y'$ .

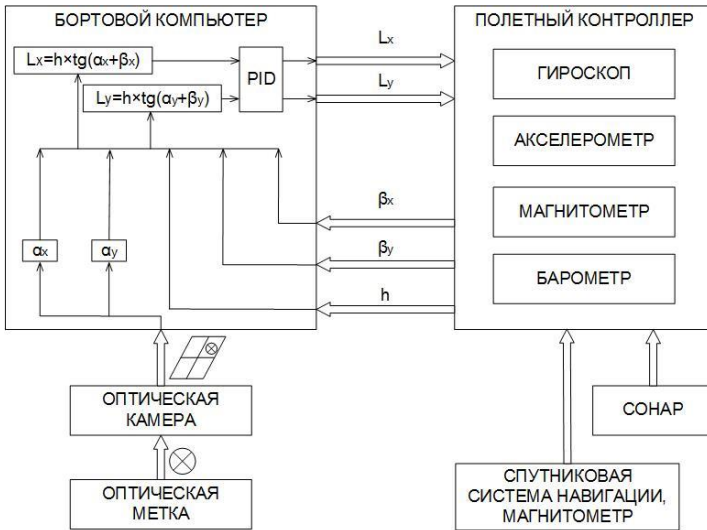


Рис. 5. Общая структурная схема взаимодействия отдельных элементов.

На рисунке 5 изображена схема взаимодействия отдельных элементов. Данные о высоте  $h$ , полученные со спутниковой системы навигации, барометра и сонара, и данные об углах наклона  $\beta_x$  и  $\beta_y$ , рассчитанные исходя из данных с гироскопа, акселерометра и магнитометра, с целью увеличения достоверности полетный контроллер обрабатывает при помощи рекурсивного фильтра, например, фильтра Калмана. Данные об углах смещения  $\alpha_x$  и  $\alpha_y$  рассчитываются в результате обработки фильтрами библиотек компьютерного зрения OpenCV и операциями математической морфологии временной последовательности кадров. Бортовой компьютер формирует сигналы управления, на основании данных о векторе смещения, определенного в соответствии со следующими формулами:

$$L_x = h \times \text{tg}(\alpha_x + \beta_x) \quad (1)$$

$$L_y = h \times \text{tg}(\alpha_y + \beta_y) \quad (2)$$

где  $L$  – вектор смещения БЛА,  $L_x$  – смещение БЛА по оси  $x$ ,  $L_y$  – смещение БЛА по оси  $y$ ,  $h$  – высота,  $\alpha_x$  – угол смещения по оси  $x$ ,  $\alpha_y$  – угол смещения по оси  $y$ ,  $\beta_x$  – угол наклона по оси  $x$  (крен),  $\beta_y$  – угол наклона по оси  $y$  (тангаж).

Для быстрого действия корректировки и достаточной точности посадки подбираются коэффициенты ПИД регулятора ручной настройкой, методом Зиглера–Никольса или методом СНР. Бортовой компьютер передает сформированные сигналы управления на полетный контроллер, который осуществляет корректировку курса БЛА во время его посадки в центр

оптической метки.

### 1.3 Способ точного сброса полезной нагрузки

Позиционирование над целью производится аналогично способу точной посадки, т.е. отслеживаются углы наклона и высота БЛА, а также отслеживается цель на изображении, получаемого с оптической камеры. При совмещении заданной цели с центром изображения в процессе позиционирования над ней и при углах наклона близких к нулю можно полагать, что БЛА находится прямо над целью и бортовой компьютер может подать команду на сброс груза.

Чем уже диапазоны разрешенных углов наклона и диаметр цели, тем больше возможность того, что они не выполняются одновременно в заданный промежуток времени, но тем выше точность попадания груза в цель. Данные параметры следует подбирать экспериментально в ходе практических исследований.

При сбросе груза с ненулевой горизонтальной скоростью, задача превращается в классическую задачу бомбометания, как показано на рисунке 6. Траектория движения груза представляет собой параболу с вершиной в точке сбрасывания (3), а величина его относительна без учёта сопротивления воздуха, которым можно пренебречь на малой высоте сброса, будет рассчитываться по формуле (4) [Шейгас, 2014]:

$$y = \frac{gx^2}{2V_0^2}, \quad (3)$$

$$\vec{A} = \vec{V}_0 \times t, \quad (4)$$

$$t = \sqrt{\frac{2H}{g}} \quad (5)$$

где  $t$  - время падения,  $\vec{V}_0$  – вектор скорости БЛА в момент сброса груза.

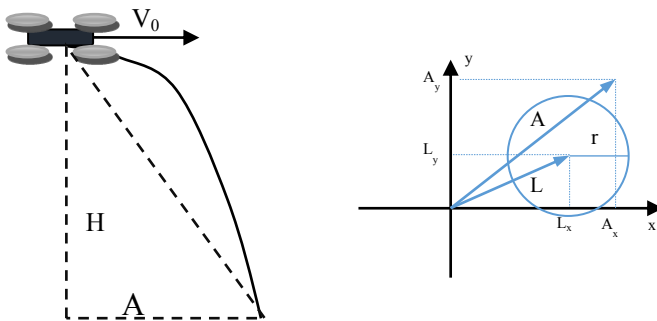


Рис. 6. Сброс полезной нагрузки.

Вектор  $L$  (1,2) указывает на центр оптической метки.  $r$  – это



доверительный радиус попадания. Как только конец вектора сноса А попадает в доверительный радиус попадания вокруг оптической метки сброса груза, полётный компьютер может давать команду на сброс полезной нагрузки.

## Заключение

Предложенный способ точной посадки и сброса полезной нагрузки являются практически применимыми, так как для их реализации подходят известные современные компоненты и открытые библиотеки программного кода. В ходе соревнований Робокросс 2015 авторами статьи был использован предложенный способ точной посадки, что позволило достигнуть погрешности при автономном приземлении около 15 см. Способ точного сброса полезной нагрузки будет испытываться в ходе соревнований Робокросс 2016.

## Список литературы

- [1] US 20140236390 A1, МПК B64C29/00, B64D47/08, B64C19/00, Vertical takeoff and landing (vtol) small unmanned aerial system for monitoring oil and gas pipelines, Mohamadi, August 21, 2014.
- [2] CN 204250382 U, МПК B64F1/02, Positioning mechanism and UAV (Unmanned Aerial Vehicle) base station using positioning mechanism, April 8, 2015.
- [3] US20130233964 A1, МПК B64D17/80, H02G11/00, B64D25/00, G05D1/00, B64C37/02, Tethered aerial system for data gathering, Woodworth, Peverill, September 12, 2013.
- [Шейгас, 2014] Факторы, влияющие на элементы траектории бомбы: учет в перспективных системах бомбометания // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил, 2014. – №.3. – С.44-46.
- [Bin, 2009] Bin H., Justice A. The design of an unmanned aerial vehicle based on the ArduPilot //Indian Journal of Science and Technology. – 2009. – Т. 2. – №. 4. – С. 12-15.
- [Bradski, 2008] Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library. – " O'Reilly Media, Inc.", 2008.
- [Ginkel, 2013] Robbert van Ginkel, Iris Meerman, Timo Mulder, Jorn Peters // Autonomous Landing of a Quadcopter on a Predefined Marker, 2013.
- [Merz, 2006] Merz T., Duranti S., Conte G. Autonomous landing of an unmanned helicopter based on vision and inertial sensing // Experimental Robotics IX. – Springer Berlin Heidelberg, 2006. – С. 343-352.