УДК 681.58

В. Ю. Мельцов, А. С. Куваев, М. А. Шевяков
Вятский государственный университет

Микропроцессорное устройство управления беспилотным квадрокоптером

Рассмотрены задачи, решаемые с использованием беспилотных дронов. Предложены основные модули системы управления беспилотным четырехроторным вертолетом (квадрокоптером), необходимые для обеспечения безопасности полета, удержания позиции в условиях помещения и улицы, а также уклонения от препятствий. Возможность установки дополнительных датчиков обеспечивает адаптируемость летательного аппарата к различным гражданским и производственным задачам.

Квадрокоптер, блок управления, микропроцессор, метод обратного обхода, стабилизация, акселерометр, гироскоп, адаптивная система

Актуальность применения беспилотных аппаратов. В настоящее время происходит автоматизация практически всех сфер человеческой деятельности с целью повышения производительности труда и ограждения людей от источников опасности. Однако автоматизация некоторых сфер еще только начинает развиваться либо совсем не развита [1].

Например, каждый день вертолет совершает облет газовой трубы с целью обнаружения утечек. Стоимость вертолета, топлива и его обслуживания довольно высока, к тому же существует риск падения вертолета с пилотом. Небольшой беспилотный летательный аппарат с заданным маршрутом облета и датчиком газа является более дешевым и надежным вариантом в данном случае. Кроме того, при его падении исключаются людские жертвы и аварии на газопроводе, так как масса аппарата незначительна.

Другими задачами для летающих дронов могут служить [2]:

– поиск пропавших или заблудившихся людей;

– видеосъемка мероприятий с воздуха;

– охрана объектов;

– удаленный мониторинг и обследование опасных объектов;

– создание карт местности и планов зданий;

– транспортировка объектов на небольшие расстояния и т. д.

Таким образом, существует спрос на небольшие летательные аппараты, автоматически выполняющие какую-либо миссию, с целью обеспечения безопасности людей и значительного сокращения и времени, и стоимости подобных операций.

Основные типы беспилотных аппаратов. Существуют несколько основных типов беспилотных летательных аппаратов. Среди них – самолеты, имеющие обычно большие размер и массу, длительное время полета, но низкие показатели маневрирования. Для использования самолетов необходима взлетная полоса, к тому же они подходят не для всех видов деятельности. Другой вид летательных аппаратов – вертолет. Он обладает преимуществом вертикального взлета, но его недостатком является большой размер основного пропеллера относительно корпуса, что создает опасность при использовании вблизи зданий и людей. Также недостатком является сложная система автомата перекоса, что усложняет управление данным видом аппарата. Существуют многороторные вертолеты, называемые трикоптерами, квадрокоптерами, гексакоптерами в зависимости от количества роторов. Такие вертолеты обладают более высокой надежностью и возможностями маневрирования.

На сегодняшний день наиболее распространена конструкция с четырьмя винтами (рис. 1). Такой аппарат является более дешевым и доступным, но автоматическое управление и стабилизация полета – нетривиальная задача, требующая детального рассмотрения [3].

Особенности систем управления квадрокоптерами. Множество команд разработчиков занимаются данной тематикой, но в результате в коммерческих целях созданы только модули стабилизации многороторных систем удаленного управления без возможности полностью автоматического полета по заданному плану [2]. Также данные системы небезопасны: лопасти вызывают

ранения у людей, а падения из-за сгоревшего двигателя или отказавшего датчика заканчиваются травмами. Этого можно избежать, если ввести систему управления выброса парашюта и алгоритмы аварийной остановки двигателей.

Рис. 1

Рассмотрим наиболее известные проекты по созданию беспилотных квадрокоптеров:

• Команда разработчиков «The flying machine arena», Цюрих, Германия. Особенности: ориентация с помощью внешнего Kinect, удаленные вычисления дифференциальных уравнений движения и пересылка сигналов управления по Wi-Fi, удержание высоты и горизонта, полет по точкам в пределах видимости камеры. Недостатки: применим только для полетов в пределах видимости Kinect-камер и Wi-Fi.

• Команда технического университета в Мюнхене, Германия. Особенности: в основу взят квадрокоптер Parrot AR.drone с открытым программным обеспечением, содержащий дальномер для измерения высоты, акселерометры, гироскопы, а также две видеокамеры. Для обработки данных с передней камеры необходимы сложные вычисления, для чего используется Wi-Fi и ноутбук. Недостатки: неприменим на больших высотах и при плохом освещении, а также вдали от ноутбука.

• Модули управления мультикоптерами NAZA, компания DJI. Особенности: блок управления вертолетами с количеством винтов 3, 4, 6 или 8, точное удержание высоты и горизонта, возврат к точке старта, удержание позиции. Недостатки: нет уклонения от препятствий, закрытое ПО.

• Команда разработчиков компании КРОК, Россия. Особенности: все вычисления производятся на борту, облетает препятствия с помощью лидара, обнаруживает с помощью видеокамеры маркер взлета и посадки. Недостатки: высокая стоимость, низкая маневренность из-за большой массы, обусловленной тяжестью мощного устройства управления.

Предлагаемое решение проблемы. Для того чтобы исправить указанные недостатки наиболее известных проектов, необходимо создать собственную систему стабилизации, обеспечивающую автономный полет и безопасность при отказах датчиков и двигателей с возможностью адаптации системы к различным назначениям [4].

Для решения всех ранее перечисленных проблем предлагается разработать устройство управления беспилотным четырехроторным вертолетом, реализующее следующие функции:

– стабилизацию углов наклона и поворота с автоматической настройкой коэффициентов регулятора и адаптацией под различные условия полета;

– удержание позиции в условиях помещения и улицы посредством получения как локальных, так и глобальных координат;

– автоматический взлет и посадку, получение данных о высоте как над уровнем моря, так и над поверхностью;

– обнаружение и уклонение от препятствий;

– выполнение планов полета, состоящих из команд, полученных от наземной станции;

– обеспечение безопасности летательного аппарата посредством самодиагностики работоспособности двигателей как перед выполнением взлета, так и в полете, аварийное отключение двигателей, управление выбросом парашюта при отказе датчиков, двигателей, аккумулятора или всего устройства управления в воздухе.

На рис. 2 представлена обобщенная структура комплекса, которая включает собственно устройство управления, объекты управления (элементы квадрокоптера) и наземную станцию.

В составе комплекса особо стоит отметить следующие блоки:

1. Навигационный блок, опрашивающий основные датчики для получения навигационных данных, вычисляющий отклонение летательного аппарата от требуемого состояния и управляющих функций, подаваемых на двигатели.

2. Блок вычислений, получающий данные от фронтальной и нижней камер, вычисляющий относительные координаты посредством сравнения изображений нижней камеры и общающийся с наземной станцией через радиомодули.

3. Блок управления выбросом парашюта, являющийся автономным относительно блока управления, служащий для выброса парашюта при отказе датчиков, двигателей, блока управления или основного аккумулятора.

4. Наземная станция, получающая навигационные данные и видео от блока управления, анализирующая видеопоток для определения препятствий, отсылающая команды управления летательным аппаратом.

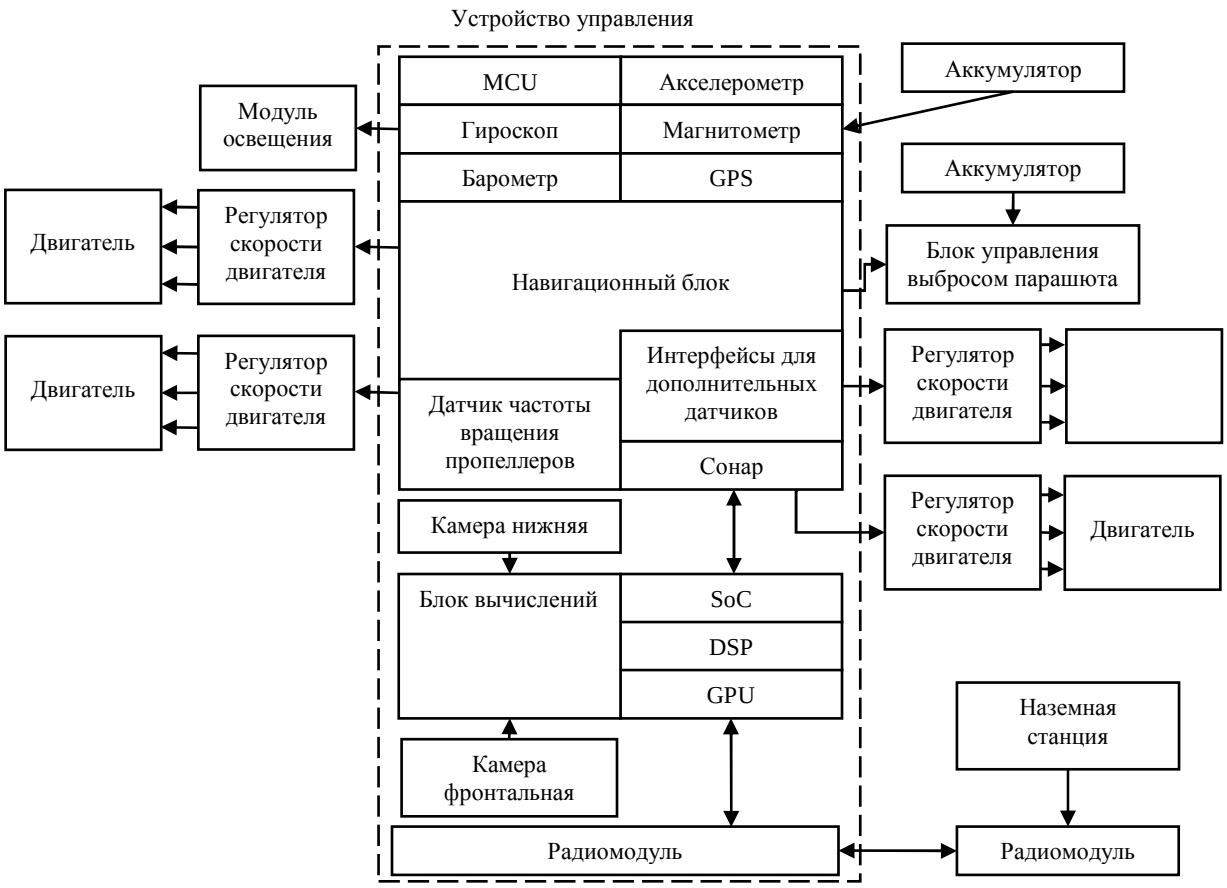

Рис. 2

Для стабилизации полета вертолета необходимо решить следующие задачи:

– определить углы наклона аппарата относительно поверхности земли, а также угол поворота относительно вертикальной оси, высоту над уровнем моря и над поверхностью, локальные и глобальные координаты;

– вычислить отклонение аппарата от требуемого состояния;

– вычислить значения функций управления, приводящих систему в требуемое состояние;

– подать управляющие сигналы на двигатели для компенсации отклонения.

Для определения углов наклона и направления необходимо использовать акселерометр, гироскоп и магнитометр, показания которых обрабатываются фильтром С. Мадгуика [5]. На выходе фильтра получаем кватернион [1], характеризующий положение летательного аппарата относительно гравитационного поля Земли. Отклонение аппарата является разностью между требуемым значением параметра и измеренным.

Функции стабилизации углов крена, тангажа и рысканья, выведенные по методу обратного обхода интегратора с учетом математической модели, имеют вид:

$$u_\varphi = \left[\left(1 - c_1^2 + \lambda_1\right)e_1 + \left(c_1 + c_2\right)e_2 - c_1\lambda_1\chi_1\right];$$

$$u_\theta = \left[\left(1 - c_3^2 + \lambda_2\right)e_3 + \left(c_3 + c_4\right)e_4 - c_3\lambda_2\chi_2\right];$$

$$u_\psi = \left[\left(1 - c_5^2 + \lambda_3\right)e_5 + \left(c_5 + c_6\right)e_6 - c_5\lambda_3\chi_3\right],$$

где $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – положительные константы; χ_1, χ_2, χ_3 – интегралы ошибок крена, тангажа и рысканья соответственно; e_1, e_3, e_5 – отклонения от заданных углов крена, тангажа и рысканья соответственно; e_2, e_4, e_6 – отклонения скорости изменения углов от требуемых по осям *x*, *y* и *z* соответственно.

Функция стабилизации высоты выражается следующим соотношением:

$$u_z = \frac{m}{\cos\theta\cos\varphi} \times$$

$$\times\left[g + \left(1 - c_7^2 + \lambda_4\right)e_7 + \left(c_7 + c_8\right)e_8 - c_7\lambda_4\chi_4\right],$$

где c_7, c_8, λ_4 – положительные константы; $e_7 = z_d - z$ – отклонение высоты от заданной; $e_8 = c_7 e_7 + \dot{z}_d + \lambda_4\chi_4 - \dot{z}$ – отклонение скорости по оси *Z*; χ_4 – интеграл отклонения высоты.

Функции стабилизации положения:

$$u_x = \frac{m}{u_z}\left[\left(1 - c_9^2 + \lambda_5\right)e_9 + \left(c_9 + c_{10}\right)e_{10} - c_9\lambda_5\chi_5\right];$$

$$u_y = -\frac{m}{u_z}\left[\left(1 - c_{11}^2 + \lambda_6\right)e_{11} + \left(c_{11} + c_{12}\right)e_{12} - c_{11}\lambda_6\chi_6\right],$$

где $e_9 = x_d - x$, $e_{11} = y_d - y$ – отклонения координат; $e_{10} = c_9 e_9 + \dot{x}_d + \lambda_5\chi_5 - \dot{x}, e_{12} = c_{11}e_{11} + \dot{y}_d + \lambda_6\chi_6 - \dot{y}$ – отклонения скорости изменения координат; $c_9, c_{11}, \lambda_5, \lambda_6, c_{10}, c_{12}$ – положительные константы; χ_5, χ_6 – интегралы ошибок e_9 и e_{11} соответственно.

Окончательные управляющие функции для каждого мотора при стабилизации углов, высоты и положения представлены следующими соотношениями:

$$m_1 = u_z + u_\theta - u_\psi + u_x;$$
$$m_2 = u_z - u_\theta - u_\psi + u_x;$$
$$m_3 = u_z + u_\varphi + u_\psi + u_y;$$
$$m_4 = u_z - u_\varphi + u_\psi + u_y,$$

где m_1, m_2, m_3, m_4 – управляющие директивы для двигателей квадрокоптера.

Схематично направление вращения двигателей, их нумерация и переднее направление движения летательного аппарата показаны на рис. 3.

Обеспечение безопасности беспилотного летательного аппарата – важнейший фактор разработки, поскольку подобные аппараты при отказе в воздухе угрожают здоровью людей и целостности конструкций.

Основными причинами падений являются:

– отказ двигателей;
– отказ датчиков;
– отказ устройства управления (УУ);
– отказ аккумулятора;
– ошибка пилотирования.

В каждом из этих случаев необходимо предотвратить разрушение самого летательного аппарата и нанесение травм людям, обеспечив безопасную посадку. Для этого используется система выброса парашюта, которая активируется только при определенных условиях.

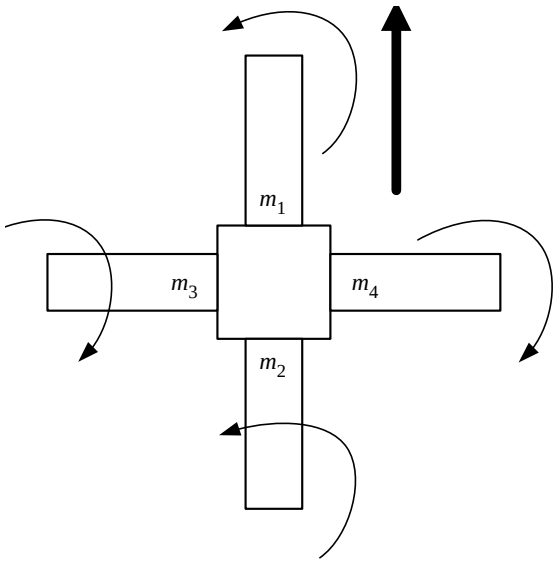

Рис. 3

Для определения отказа двигателя необходимо постоянно измерять частоту вращения каждого двигателя. Отказ датчиков определяется программно. Ошибка пилотирования часто заключается в слишком быстром снижении, что также можно контролировать программно. Отказ устройства управления или аккумулятора является более сложным, так как в данном случае УУ не сможет подать управляющий сигнал на подсистему выброса парашюта. Следовательно, сама подсистема выброса парашюта должна являться автономной и получать питание от отдельного источника питания [6].

В целом введение множества датчиков обеспечивает полноту навигационных данных (углы наклона и поворота, высота над поверхностью и над уровнем моря, относительные и глобальные координаты), а следовательно, лучшую устойчивость летательного аппарата в различных условиях. Предлагаемое решение, в первую очередь, обеспечит безопасность эксплуатации летательного аппарата с помощью подсистемы облета препятствий, а также посредством выброса парашюта при отказах датчиков, двигателей или всего блока управления.

Применение как GPS-приемника, так и нижней видеокамеры позволит выполнять стабилизацию положения в условиях как хорошего сигнала от спутников, так и при его отсутствии (в помещении). Возможность установки дополнительных датчиков обеспечивает адаптируемость летательного аппарата к различным назначениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев В. В., Распопов В. Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ „Электроприбор“». СПб., 2009. 280 с.

2. Квадрокоптеры и дроны. URL: http://kvadrokoptery.com/category/obzoryi-kvadrokopterov/, свободный. (Дата обращения: 06.06.2015)

3. Дао Зуй Нам, Ивановский С. А. Оптимизация алгоритма локализации мобильного робота с использованием триангуляции карты // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 2. С. 30–34.

4. Куприянов М. С., Кочетков А. В. Принципы построения технических самоорганизующихся систем // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 8. С. 34–40.

5. Sebastian O. H. Madgwick. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. URL: http://www.samba.org/tridge/UAV/madgwick_internal_report.pdf, свободный. (Дата обращения: 06.06.2015)

6. Система управления роботами на подвижном основании / М. М. Копычев, В. В. Путов, А. В. Путов, К. В. Игнатьев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 5. С. 56–60.

V. Yu. Meltsov, A. S. Kuvaev, M. A. Shevyakov
Vyatka State University

THE MICROPROCESSOR CONTROL DEVICE FOR UNMANNED QUADROCOPTER

Problems to be solved with the use of unmanned drones are considered. The basic control modules for unmanned four-rotary helicopter (quadrocopters) necessary to ensure the safety of the flight, hold a position in a room and the street, as well as the avoidance of obstacles, were proposed. Ability to install additional sensors provides the adaptability of the aircraft to the various civil and industrial problems.

Quadrocopter, control device, microprocessor, backstepping, stabilization, accelerometer, gyroscope, adaptive system

УДК 519

Т. Л. Заляев
Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

Алгоритм выделения аномалий в вариациях космических лучей в периоды гелиосферных возмущений

Предложен алгоритм детального анализа вариаций космических лучей и выделения локальных аномальных изменений, возникающих в периоды гелиосферных возмущений. Алгоритм основан на совмещении вейвлет-преобразования с пороговыми функциями. В работе на основе обработки данных нейтронных мониторов (анализировались данные нейтронных мониторов станций Апатиты и Мыс Шмидта) показана эффективность алгоритма. Выполнен анализ вариаций космических лучей в периоды повышенной солнечной активности и выделены аномальные изменения, возникающие накануне и в моменты сильных геомагнитных возмущений.

Вейвлет-преобразование, космические лучи, гелиосферные возмущения, форбуш-эффект, магнитные бури

В статье описывается вычислительный алгоритм детального анализа вариаций космических лучей (КЛ) и выявления разномасштабных положительных и отрицательных изменений, проявляющихся в периоды гелиосферных возмущений. Модуляция первичных галактических космических лучей (ГКЛ) происходит в результате их взаимодействия с неоднородностями магнитного поля в солнечном ветре. Регистрируемый поток первичных частиц несет в себе информацию о состоянии межпланетной среды и отражает информацию о имеющихся в ней возмущениях.