

УДК 004.932.2

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЁТОМ БПЛА НАД ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГОЙ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

© А. О. Лебедев, В. В. Васильев

*Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 2/1
E-mail: artem_leb@mail.ru*

Предложен алгоритм управления полётом беспилотного летательного аппарата (БПЛА) над железной дорогой в автоматическом режиме без участия оператора и использования спутниковых навигационных систем. Алгоритм основан на компьютерном анализе видеозаписи с камеры БПЛА, выделении рельсов, определении их направления относительно движения БПЛА и управлении полётными характеристиками (тангаж, рыскание, крен) таким образом, что полёт осуществляется над железной дорогой на заданной высоте. Особенностью алгоритма является его простота, не требующая значительных вычислительных ресурсов. Реализация алгоритма не сказывается на массогабаритных параметрах и энергопотреблении БПЛА и не влияет на дальность и продолжительность его полёта. Лётные испытания подтвердили надёжность алгоритма.

Ключевые слова: БПЛА, дрон, компьютерное зрение, железнодорожные пути, управление полётом БПЛА.

DOI: 10.15372/AUT20210410

Введение. В настоящее время расширяются области применения беспилотных летательных аппаратов, включая инспекцию объектов, находящихся на земле [1–4]. Одним из важных объектов контроля технического состояния являются железнодорожные пути. Сегодня контроль железнодорожных путей осуществляется либо специалистами, инспектирующими пути, либо с помощью специальных вагонов или тележек, на которых размещено необходимое оборудование. Недостатками таких способов контроля является наличие человеческого фактора, дороговизна специализированных вагонов и необходимость вмешательства в расписание движения поездов, создание дополнительной помехи на путях. Решить данную проблему возможно с использованием БПЛА, так как зондирование происходит дистанционно, без создания дополнительных помех движению [5–8]. В таком случае возникает задача организации движения БПЛА вдоль железнодорожных путей.

Цель данной работы — создание алгоритма управления, обеспечивающего полёт БПЛА вдоль железнодорожных путей на заданной высоте в автоматическом режиме без участия оператора управления полётом и без использования привязки к навигационным системам типа GPS/ГЛОНАСС. При этом оператор освобождается от функции управления БПЛА. Инспекция железнодорожного полотна может осуществляться как в реальном времени, так и посредством видеозаписи в течение всего полёта с последующим анализом после возвращения БПЛА. Суть алгоритма заключается в том, что управление БПЛА осуществляется на основе анализа положения рельсов на видеозаписи.

Аппаратная часть устройства. В качестве БПЛА использовался квадрокоптер Phantom 4 фирмы DJI (Китай) [9]. Масса с аккумулятором и пропеллерами составляет 1380 г, размер по диагонали без пропеллеров — 35 см, максимальная скорость — 20 м/с, максимальная высота полёта над уровнем моря — 6000 м, максимальная допустимая скорость ветра — 10 м/с, максимальное время полёта около 28 мин, спутниковые системы

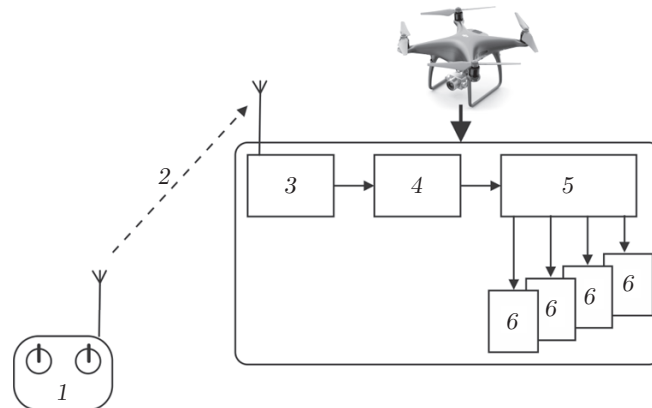


Рис. 1. Стандартная схема управления квадрокоптером: 1 — 13-канальный пульт дистанционного управления, 2 — радиосигнал, 3 — приёмник команд, 4 — полётный контроллер, 5 — контроллер управления двигателями, 6 — винтомоторные группы

позиционирования — GPS/ГЛОНАСС. Квадрокоптер снабжён пультом дистанционного управления с радиопередатчиком, обеспечивающим передачу сигнала до 5000 м.

Стандартная схема управления квадрокоптером показана на рис. 1. Каждая винтомоторная группа (ВМГ) состоит из бесщёточного 3-фазного двигателя и двухлопастного винта.

Пульт дистанционного управления (1) содержит необходимый набор органов управления, обеспечивающих оператору возможность ручного управления полётом квадрокоптера. Каждые 7 мс пульт передаёт текущее состояние всех элементов управления (кнопки, тумблеры, рычаги) по радиоканалу (2) на приёмник команд (3), который находится на квадрокоптере.

Принятые приёмником команд (3) данные передаются по последовательному цифровому интерфейсу на полётный контроллер (4), который обеспечивает стабилизацию квадрокоптера в пространстве и выполнение поступающих с пульта дистанционного управления команд оператора. Для получения полётным контроллером (4) информации о движении квадрокоптера в пространстве используются два датчика ускорения (3-осевой акселерометр и 3-осевой гироскоп) и 3-осевой магнитометр (компас). Обработывая данные с датчиков и данные, полученные от пульта дистанционного управления, полётный контроллер (4) регулирует тягу каждой ВМГ (6) так, чтобы получить требуемые в данный момент времени параметры полёта, такие как ускорение и скорость движения, углы крена, рысканья и тангажа. Регулировка тяги осуществляется изменением скорости вращения двигателя ВМГ. Для согласования силовой части управления двигателями и управляющим выходом полётного контроллера используется контроллер управления двигателями (5).

Автоматическое управление полётом подразумевает генерацию управляющих сигналов внутри самого БПЛА (рис. 2). Для этого в корпусе квадрокоптера размещён микрокомпьютер, принимающий видеопоток с ТВ-камеры (7), обрабатывающий его и формирующий управляющие сигналы для ВМГ, которые поступают на полётный контроллер вместо сигналов от пульта дистанционного управления. Переключение между ручным и автоматическим управлением полёта БПЛА производится с помощью тумблера, расположенного на пульте дистанционного управления. В режиме ручного управления микрокомпьютер без изменения пересылает данные с приёмника команд на полётный контроллер. При включении режима автоматического управления микрокомпьютер заменяет часть данных, три параметра, отвечающих за управление ВМГ, данными, получаемыми в результате обра-

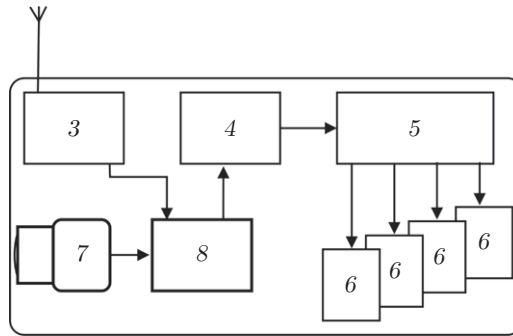


Рис. 2. Предлагаемая схема управления квадрокоптером: 7 — видеокамера, 8 — микрокомпьютер, остальные обозначения, как на рис. 1

ботки видеоизображения, и пересылает их на полётный контроллер. Остальные данные (ещё 11 параметров), не связанные с ВМГ, передаются в полётный контроллер без изменений. Таким образом, управление полётом переходит на микрокомпьютер.

В качестве микрокомпьютера (8), который ведёт обработку изображения и генерирует сигналы управления ВМГ в автоматическом режиме, используется плата Orange Pi PC [10], содержащая НЗ 4-ядерный процессор Cortex-A7 1600 МГц с объёмом оперативной памяти 1 Гб, обладающий относительно небольшой производительностью, но при этом малым энергопотреблением, не требующим его охлаждения. Интерфейс USB2.0 использовался для ввода видеоизображения с видеокамеры Logitech C270. Параллельно происходит запись видеоизображения на флэш-память microSD.

Связь между приёмником команд и полётным контроллером осуществляется через интерфейс UART платы микрокомпьютера. Для передачи команд между приёмником команд и полётным контроллером используется протокол последовательной передачи данных I-Bus. Данный протокол определяет передачу кодовой посылки в следующем виде: заголовок (2 байта), массив данных (28 байт), контрольная сумма (2 байта). Период передачи кодовой посылки 7 мс. Скорость передачи 115200 bps. Массив данных кодовой посылки содержит информацию о текущем положении стиков и переключателей пульта управления.

Для отладки алгоритма использовались интерфейсы Ethernet, HDMI, USB2.0.

Программная часть устройства. Для реализации алгоритма на микрокомпьютер была установлена операционная система Pubuntu на основе Linux. Данная система отличается лёгкостью конфигурирования и подходит для установки на выбранный микрокомпьютер Orange Pi PC. На рис. 3, *a* приведён исходный кадр изображения железной дороги с высоты около 10 м. Кадр имеет формат RGB, в котором каждый пиксель имеет 3 цветовые координаты. Данный формат создан для восприятия изображения человеческим глазом [11]. При изменении освещённости объекта контроля (например, при изменении погодных условий и времени суток) цветовая гамма объекта может сильно меняться, но головной мозг способен это учитывать и сохранять функцию распознавания. При использовании технического зрения лучше подходит альтернативный цветовой формат — HSV. Удобство формата HSV заключается в том, что железная дорога при любом освещении имеет розово-пурпурный оттенок, который, как правило, не содержится в объектах, не связанных с железной дорогой: растительность, постройки, яркие таблички (рис. 3, *b*). На основе экспериментальных данных, полученных в [12], можно утверждать, что если объект не содержит розово-пурпурного оттенка, то это точно не железная дорога и данный объект может быть исключён из анализа. На основе этого создавалась маска, в которой розово-пурпурному оттенку (в цилиндрических координатах HSV диапазон Hue

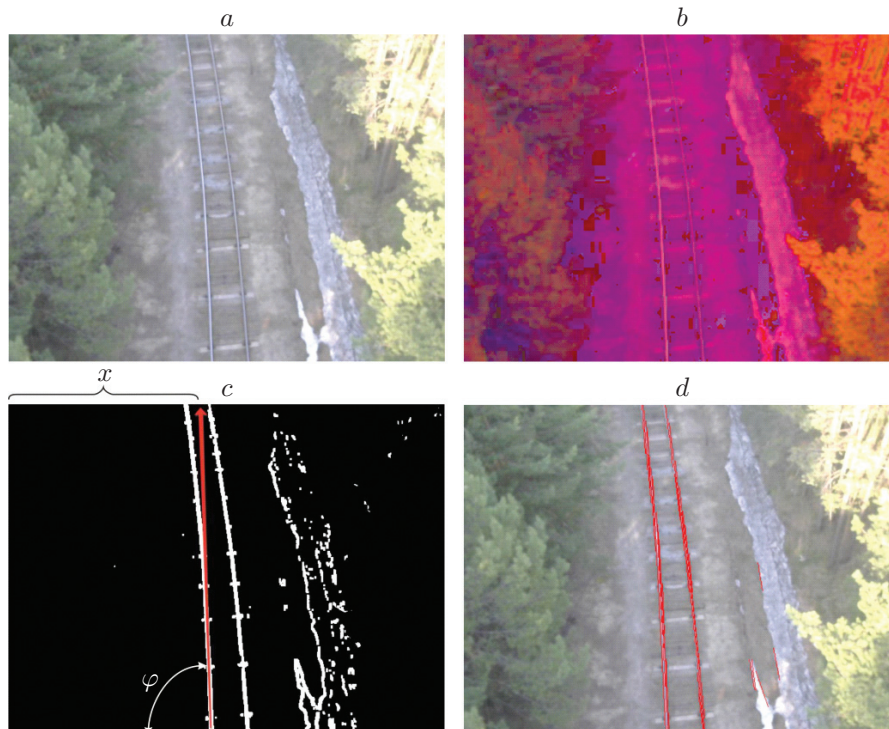


Рис. 3. Изображения с видеокamеры квадрокоптера: *a* — исходное изображение с видеокamеры в формате RGB; *b* — то же изображение в формате HSV; *c* — бинарное изображение с маской, полученное из изображения *b*; *d* — исходное изображение с положением рельсов, определённым с помощью алгоритма

206 — 360°, Saturation 0 — 100, Value 0 — 100) соответствует 1, а всем остальным — 0. Затем к исходному изображению применяется оператор Собеля по одной переменной, в данном случае по горизонтальной координате x . Дифференцирование только по горизонтальной координате убирает все горизонтальные линии, оставляя вертикальные, к которым относится изображение рельсов.

Далее к бинарному изображению вертикальных контуров применялась маска, полученная из порогового преобразования HSV кадра (только розово-пурпурные значения HSV). Результирующее изображение показано на рис. 3, *c*, на котором хорошо просматриваются рельсы, но также присутствуют и объекты, не связанные с рельсами. Затем к изображению применялось вероятностное преобразование Хафа (РНТ) [13, 14], которое является одним из наиболее часто используемых алгоритмов для определения линий. Результирующее изображение рельсов, наложенное на исходное изображение (см. рис. 3, *a*), показано на рис. 3, *d*. На рисунке видно, что положение рельсов, полученное компьютерной обработкой, хорошо совпадает с положением рельсов на исходном изображении.

Алгоритм основан на параметрическом представлении линии в виде

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta,$$

где ρ — длина перпендикуляра, опущенного от начала координат к линии, θ — угол между горизонтальной осью x и данным перпендикуляром.

Результатом применения алгоритма является набор линий с параметрами (ρ, θ) , который анализируется на возможность определения основного направления. Анализ подвергалась величина $\varphi = 90^\circ + \theta$. Далее сортировался массив (ρ, φ) по φ и выбиралось медианное

значение. Все предыдущие действия с кадром [13, 15] выполнялись для того, чтобы максимизировать количество линий, находящихся на рельсах, поэтому большинство линий находится на одном из рельсов. Медианная фильтрация линий по угловой координате выявляет одну линию (ρ, φ) , которая вычисляется на каждом кадре, и на неё ориентируется направление квадрокоптера. Движение квадрокоптера с параметрами $\varphi = 90^\circ$ и $\rho = W/2$, где W — ширина кадра, является движением вдоль рельсов. В этом случае квадрокоптер летит прямолинейно без рысканья и крена. Второй анализируемой величиной является координата $x = \rho \cos \theta$, т. е. координата пересечения прямой с осью абсцисс (см. рис. 3, с). В случае если x попадает в первую (левую) четверть кадра, подаётся сигнал крена влево, если в четвёртую (правую) четверть кадра, подаётся сигнал крена вправо. При $\varphi < 75^\circ$ подаётся сигнал рысканья влево, а при $\varphi > 105^\circ$ — вправо. Сигналы корректируются на каждом кадре, пришедшем с камеры, т. е. 30 раз в секунду.

Результаты и обсуждение. Во время экспериментальных полётов получился следующий результат: предложенный и реализованный алгоритм определения положения и направления железнодорожного полотна по видеоизображению позволяет уверенно вести БПЛА вдоль железной дороги. Однако следует заметить, что основная линия находится на одном из рельсов, поэтому возможны перескакивания основной линии с левого рельса на правый и наоборот. Это может привести к незначительным рысканиям во время полёта, но не влияет на направление движения.

Также интересным результатом оказалась ситуация с пересечением рельсов и ситуация с железнодорожными станциями. В случае пересечения рельсов при остром угле алгоритм может за основной рельс определить именно пересекающий путь, но это скорее единичная ошибка, чем закономерность. При полёте над железнодорожной станцией с множеством параллельных путей алгоритмом определяется много линий, что может привести к перескакиванию БПЛА на параллельный путь. Если этот путь будет уходить вправо или влево от основного, то БПЛА последует именно по этому пути и уйдёт с маршрута. Данная проблема должна решаться усложнением алгоритма.

Предложенный алгоритм обеспечивает устойчивый полёт над железнодорожными путями в случае благоприятных погодных условий: отсутствия осадков, бокового ветра и порывов выше 10 м/с. При сильном боковом ветре, больше 10 м/с, БПЛА сносит с видимости путей. При благоприятных условиях алгоритм определяет основную линию достаточно надёжно, так как контраст железной дороги достаточно высок. В условиях снегопада пролетающие снежинки оставляют на изображении непрерывные линии, которые могут восприниматься алгоритмом как основная линия, поэтому при сильном снегопаде надёжность алгоритма уменьшается. Так как использованный квадрокоптер не предназначен для эксплуатации во время дождя, эксперименты в этих условиях не проводились. Однако можно предположить, что при дожде отражательная поверхность земли уменьшается, меняется контраст и алгоритм может давать сбой при выделении основной линии. В итоге данный алгоритм будет работать надёжно только в погодных условиях без осадков.

Разработанный алгоритм не требует больших вычислений, поэтому есть возможность выполнять корректировку полёта в каждом кадре, в нашем случае 30 кадр/с. Кроме того, снижаются массогабаритные параметры и энергопотребление БПЛА, что положительно сказывается на времени и дальности полёта.

Заключение. Таким образом, в данной работе предложен относительно простой и не требующий больших вычислительных ресурсов алгоритм управления БПЛА при полёте над железной дорогой в автоматизированном режиме без участия оператора и использования спутниковых навигационных систем. Алгоритм заключается в последовательном выделении основной линии, связанной с рельсами на видеоизображении железной дороги и управлении двигателями БПЛА таким образом, чтобы линия рельсов находилась максимально близко к середине кадра с минимальным углом отклонения от вертикали.

Это обеспечивает движение БПЛА вдоль железной дороги. Экспериментальные испытания БПЛА показали надёжность работы алгоритма. Ограничениями работы алгоритма является наличие осадков и множества параллельных железнодорожных путей.

Благодарность. Авторы выражают благодарность А. Г. Паулишу и Б. Н. Новгороду за полезные обсуждения статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов Ю. А.** Разработка локомотивной системы технического зрения: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2014. 152 с.
2. **Рязанов С. Н.** Транспортная безопасность объектов железнодорожной инфраструктуры // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 6. С. 23–25.
3. **Гриценко П. А., Кремлев А. С., Шмигельский Г. М.** Управление движением квадрокоптера по заранее заданной траектории // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 4 (86). С. 22–25.
4. **Karakose M., Yaman O., Baygin M. et al.** A new computer vision based method for rail track detection and fault diagnosis in railways // Intern. Journ. Mechanical Eng. and Robotics Research. 2017. 6, N 1. P. 22–27.
5. **Besada J., Bergesio L., Campaña I. et al.** Drone mission definition and implementation for automated infrastructure inspection using airborne sensors // Sensors. 2018. 18. P. 1170. DOI: 18.1170.10.3390/s18041170.
6. **Flammini F., Pragliola C., Smarra G.** Railway infrastructure monitoring by drones // Proc. of the Intern. Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification (ESARS-ITEC). Toulouse, France, 2–4 Nov., 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841398.
7. **Engel J., Sturm J., Cremers D.** Camera-based navigation of a low-cost quadcopter // Proc. of the IEEE/RSJ Intern. Conference on Intelligent Robots and Systems. Vilamoura, Portugal, 7–12 Oct., 2012. P. 2815–2821. DOI: 10.1109/IROS.2012.6385458.
8. **Trinh H., Haas N., Li Y. et al.** Enhanced rail component detection and consolidation for rail track inspection // Proc. of the IEEE Workshop on the Applications of Computer Vision (WACV). Breckenridge, USA, 9–11 Jan., 2012. P. 289–295. DOI: 10.1109/WACV.2012.6163021.
9. **Квадрокоптер Phantom 4 dji.** URL: <https://www.dji.com/ru/products/phantom?site=brandsite&from=nav> (дата обращения: 08.06.2021).
10. **Микрокомпьютер Orange Pi PC.** URL: <http://www.orangepi.org/Orange%20Pi%203/> (дата обращения: 08.06.2021).
11. **Гонсалес Р., Вудс Р.** Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. М.: Техносфера, 2005. 1070 с.
12. **Singh A. K., Swarupa A., Agarwalb A., Singha D.** Vision based rail track extraction and monitoring through drone imagery // ICT Express. 2018. 5, Iss. 4. DOI: 10.1016/j.ict.2017.11.010.
13. **Páli E., Máthé K., Tamás L., Busoniu L.** Railway track following with the AR.Drone using vanishing point detection // Proc. of the IEEE Intern. Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics. Cluj-Napoca, Romania, 22–24 May, 2014. P. 1–6. DOI: 10.1109/AQTR.2014.6857870.
14. **Kiryati N., Eldar Y., Bruckstein A. M.** A probabilistic hough transform // Patt. Recogn. 1991. 24, N 4. P. 303–316.
15. **Fung H. K., Wong K. H.** A robust line tracking method based on a multiple model Kalman filter model for mobile projector systems // Proc. of the 4th Intern. Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI 2013). Selangor, Malaysia, 24–25 June, 2013. Vol. 11. P. 996–1002.

Поступила в редакцию 08.06.2020

После доработки 29.04.2021

Принята к публикации 08.06.2021