

УДК 004.896

## АЛГОРИТМ ПЕРЕСТРОЕНИЙ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОПИЛОТА PIXHAWK

Н.А. Михайлов (*mikhailov.mai@gmail.com*)  
Московский авиационный институт (национальный  
исследовательский университет) (МАИ)

**Аннотация.** В статье рассматривается практическая реализация алгоритмов управления автономным беспилотным летательным аппаратом в составе группы с использованием полетного контроллера Pixhawk. Рассматривается задача согласованного перестроения группы по заданным формациям. Каждый участник группы находится под управлением автопилота, который получает команды от бортового компьютера, на борту которого установлено программное обеспечение, реализующее алгоритмы управления. В работе представлена схема построения системы управления БПЛА. Проведено компьютерное моделирование. Результатом моделирования стали графики, демонстрирующие работоспособность алгоритмов;

**Ключевые слова:** система управления, беспилотный летательный аппарат, групповое применение.

### Введение

В последние годы все большее распространение получают задачи по разработке систем управления (СУ) автономными беспилотными летательными аппаратами (БЛА) [Мо 2011], [Moon 2009]. Интерес к данной проблеме объясняется преимуществами данных систем:

- Возможность решать целевые задачи в опасных для человека зонах (зоны радиоактивной опасности, зоны лесных пожаров, зоны военных конфликтов и т.п.);
- Способность совершать полеты на большие расстояния (за пределами зон ручного управления);
- Отсутствие человеческого фактора.

Возрастающая сложность и объемы решаемых современных задач вынуждает разрабатывать СУ БПЛА, согласованно функционирующих в составе группы. Этот факт объясняется основными преимуществами такого подхода:

- Увеличение вероятности успешного выполнения задачи группой;
- Увеличение производительности за счет возможности одновременного обследования территории, с последующей оптимизацией маршрута полета, на основе имеющихся данных с другого члена группы;
- Увеличение производительности за счет возможности постановки различных задач для разных участников группы.

Известно большое количество работ, связанных с решением задачи согласованного управления группой БЛА [Waydo 2006], [Valenti 2004], [Dong 2009], [Crowther 2003]. В то же время ряд задач, например, таких как пространственные перестроения БЛА в группе, реализация алгоритмов управления на конкретных полетных контроллерах и др., требует дополнительных решений.

В данной работе предлагается алгоритм автоматического согласованного перестроения БПЛА в группе за минимальное время и его реализация на бортовом микроконтроллере и автопилоте (полетном контроллере) Pixhawk.

## 1 Полетный контролер Pixhawk

Полетный контроллер Pixhawk – это продвинутая система автопилотирования, разработанная PX4 (проект открытых аппаратных средств) и произведенная компанией 3D Robotics. [Pixhawk 3D Robotics] Спецификация автопилота:

Микропроцессор:

- 32-bit STM32F427 Cortex M4 ядро с FPU;
- 168 MHz/256 KB RAM/2 MB флэш-памяти;
- 32 bit STM32F103 безотказный сопроцессор.

Датчики:

- ST Micro L3GD20 3-axis 16-bit гироскоп;
- ST Micro LSM303D 3-axis 14-bit акселерометр / магнитометр;
- Invensense MPU 6000 3-axis акселерометр/гироскоп;
- MEAS MS5611 барометр.

В качестве прошивки автопилота может выступать одна из следующих:

1. PX4 [PX4,a];
2. APM (ArduPilot Mega) [Ardupilot Mega,a].

Оба проекта прошивки автопилота имеют открытый код, что делает их привлекательными для разработчиков алгоритмов управления БЛА. [PX4,b], [Ardupilot Mega,b].

В данной работе рассматривается прошивка APM (Arducopter 3.3). Данная прошивка позволяет провести имитационное моделирование поведения автопилота Pixhawk с использованием в качестве модели

аппарата встроенные уравнения (SITL режим работы автопилота [SITL]) или внешние (HIL режим работы автопилота [HIL]).

В работе исследуется режим SITL. В этом режиме компьютерная модель автопилота взаимодействует по протоколу TCP/IP с компьютерной моделью БПЛА. В изначальном варианте компьютерная модель БПЛА заложена в исходный код прошивки. При необходимости эту модель можно корректировать.

Математическая модель регуляторов углового и линейного положения представляет собой ПИД регуляторы, коэффициенты которых можно настроить.

Общение с автопилотом происходит с использованием протокола MAVLink [MAVLink].

## 2 Математическая модель группы

Для математического описания группы разобьем пространство в горизонтальной плоскости на сетку размером  $N \times N$ , где  $N$  – количество аппаратов в группе (см. Рис. 1). Размер сетки соответствует требуемым значениям интервалов и дистанций между аппаратами. Тогда положение каждого аппарата в сетке будет определяться двумя числами от 1 до  $N-1$ .

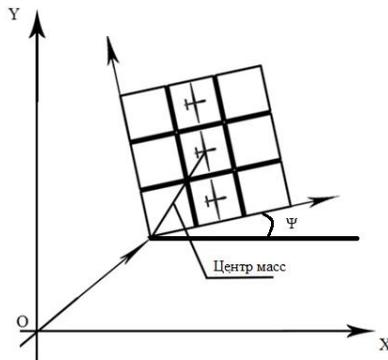


Рис. 1. Математическая модель строя.

При таком описании строя важными характеристиками так же будут центр масс строя и курс. Эти две характеристики необходимы для выработки такого управления, чтобы совершать групповой маневр не нарушая строя. Т.е. для того, чтобы развернуть строй на требуемый угол курса необходимо рассчитать положения аппаратов относительно центра масс соответствующие этому углу, а после развернуть сами аппараты в том же направлении.

В дальнейшем построение группы в пространстве можно выполнять относительно центра масс формации. Это удобно для предполетного планирования, в качестве промежуточного пункта маршрута (ППМ) задавать центр масс формации (см. Рис. 2).

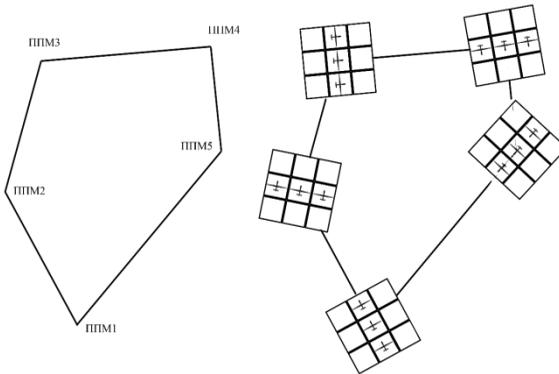


Рис. 2. Вариант предполетного задания.

На рис. 3. показаны возможные варианты построения

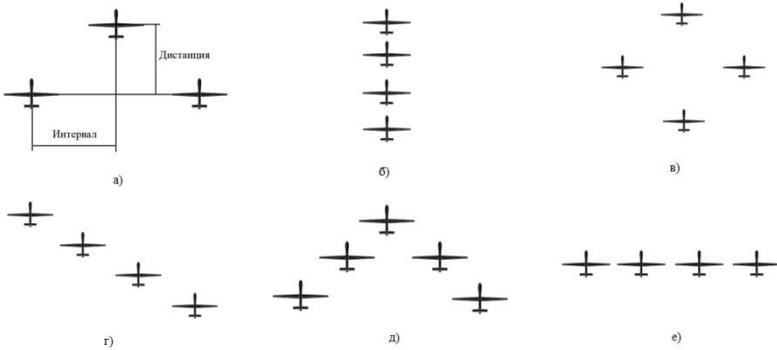


Рис. 3. а) Дистанция и интервал; б) «Колонна»; в) «Ромб»; г) «Пеленг»; д) «Клин»; е) «Фронт»

### 3 Алгоритм перестроения

Пусть имеется набор штатных «формаций» - пространственных построений БПЛА: «строй», «колонна», «ромб», «клин», «пеленг». Расстояния между отдельными БПЛА (интервал и дистанция) для определенных условий заданы.

Необходимо за минимальное время перестроится из исходной в требуемую формацию. При этом безопасность перестроений БПЛА, связанная с вероятностью столкновений, задается допустимым сближением (расстоянием между БПЛА).

Вариантом перестроения является набор частных траекторий (переходов) полета каждого БПЛА от исходной позиции в текущей формации к некоторой конкретной позиции в требуемой формации.

Суть перестроения заключается в определении положения БПЛА в новой формации. Для этого необходимо совместить начало координатной сетки одной формации с другой. Таким образом каждый БПЛА в новой формации может занимать  $N$  различных положений. Но не все они целесообразны, поэтому необходимо использовать некоторый алгоритм распределения, который нашел бы такую совокупность положений в новой формации («БЛА-Цель»), при которой суммарная длина переходов была минимальна. Данная задача известна в комбинаторике как «Линейная задача о назначениях» [Асанов 2001], так как количество БПЛА равно количеству мест в новой формации.

Одним из классических подходов решения задачи о назначениях является «Венгерский алгоритм». Он позволяет решить задачу за полиномиальное время

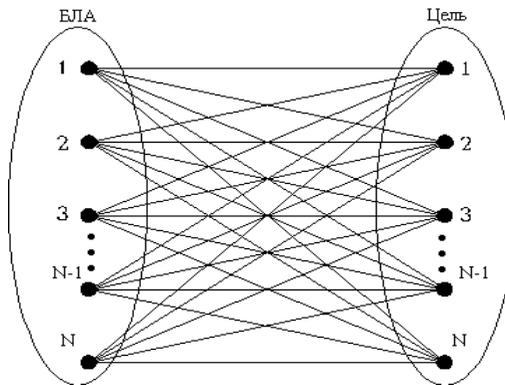


Рис. 3. Полный двудольный граф переходов.

Таким образом можно сформировать базу данных (БД) по всем возможным перестроениям варьируя значения интервалов, дистанций, количества БПЛА и форму построений

В дальнейшем каждый БПЛА оснащается такой БД. Алгоритм перестроения можно описать следующим образом:

1. Приходит сигнал о необходимости перестроения в некоторую формацию по ключу;

2. Из памяти извлекается текущий ключ формации, а также значения интервалов, дистанции и количества БПЛА в строю  $I, D, N$ ;
3. По данным параметрам из БД извлекается массив назначений  $i_{треб.}, j_{треб.}$ ;
4. Из памяти извлекается текущий положение в построении  $i_{тек.}, j_{тек.}$ ;
5. С учетом текущего и требуемого положения в формации определяем необходимое смещение  $\Delta i, \Delta j$ :

$$\Delta i = i_{треб.} - i_{тек.}$$

$$\Delta j = j_{треб.} - j_{тек.}$$

6. Из собственной навигационной системы извлекаем собственное положение  $x_{БЛА}, y_{БЛА}$ ;
7. Определяем требуемое положение относительно рассчитанного в пункте 5 смещения, текущего положения и разворота на угол  $\Psi_{форм.}$ ;

$$\begin{pmatrix} \Delta x_{форм.} \\ \Delta y_{форм.} \end{pmatrix} = A_z(\Psi_{форм.}) \begin{pmatrix} I & D \\ D & I \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta j \\ \Delta i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{БЛА} \\ y_{БЛА} \end{pmatrix}, \text{ где}$$

$\Delta x_{форм.}, \Delta y_{форм.}$  – требуемые смещения для БПЛА по оси X и Y стартовой СК соответственно;

$A_z(\Psi_{треб.})$  – матрица поворота относительно оси Z стартовой системы координат;

$I, D$  – заданные значения интервала и дистанции.

8. Отправляем на автопилот рассчитанное значение;
9. Опрос навигационной системы автопилота до достижения требуемого положения. Выработка сигнала о достижении требуемого положения и отправка его по каналу связи.

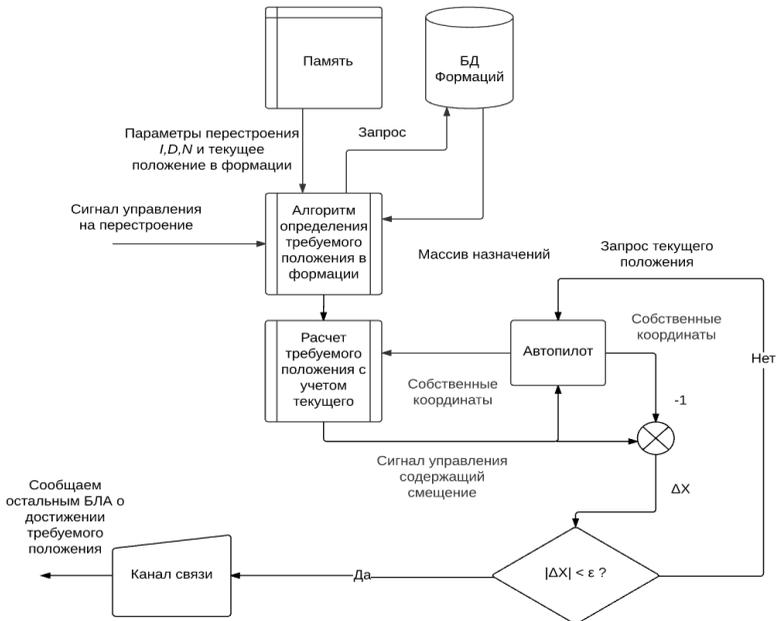


Рис. 4. Блок-схема алгоритма перестроения.

## 4 Компьютерное моделирование работы алгоритмов

Для проверки работоспособности алгоритма, был разработан программно-вычислительный комплекс на базе прошивки автопилота Pixhawk, и проведен эксперимент, моделирующий выполнение группой полетного задания. Программный комплекс можно разделить на три большие части:

1. ПО, отвечающее за моделирование работы автопилота и физической модели БЛА. Данное ПО является частью прошивки автопилота Pixhawk;
2. ПО, отвечающее за работу алгоритмов согласованного управления группой БПЛА. Именно это ПО устанавливается на борт микрокомпьютера и отдает команды на автопилот;
3. ПО, отвечающее за визуализацию работы алгоритмов и системы в целом. В данной работе визуализация осуществляется с помощью инструментов Matlab.

Экспериментальное полетное задание определим следующим образом:

1. Начальное построение «Колонна»;
2. Первая точка ППМ координаты  $X = 0$ ,  $Y = 30$ ;
3. В первой точке ППМ сменить формацию на «Фронт»;

4. Вторая точка ППМ координаты  $X = 30, Y = 30$ ;
5. Во второй точке ППМ сменить формацию на «Клин»;
6. Третья точка ППМ координаты  $X = 30, Y = 0$ ;

Количество БПЛА в группе  $N = 3$ , значение интервалов и дистанций между БПЛА  $I = D = 5$ .

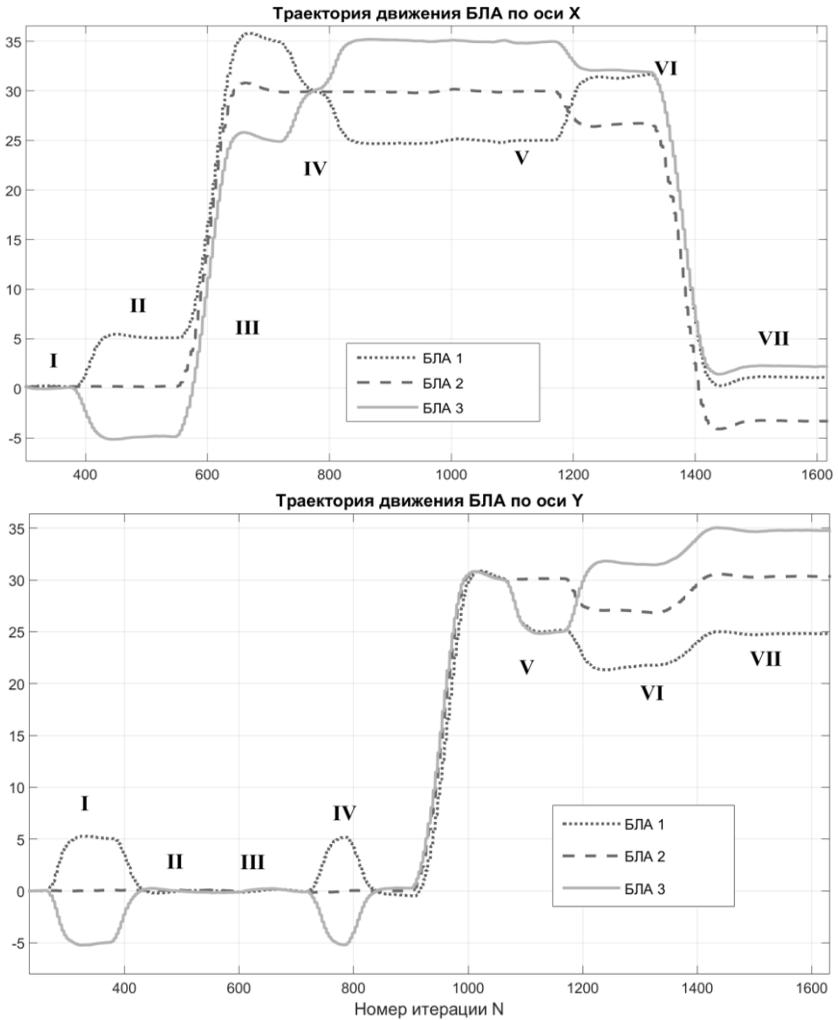


Рис. 5. Траектории движения группы.

Результаты компьютерного моделирования эксперимента представлены на графиках (см. Рис. 5), размерность координат на плоскостях X и Y метры: **I** начальное построение «Колонна», **II** разворот на ППМ1, **III** группа достигла ППМ1 (во время движения аппараты не столкнулись), **IV** смена формации с «Колонна» на «Фронт» и движение к ППМ2, **V** смена формации с «Колонна» на «Клин», **VI** разворот на ППМ3, **VII** движение к ППМ3. По достижению ППМ3 каждый БПЛА занял требуемую позицию, что можно считать успешным завершением миссии.

## Заключение

Новизна представленной работы состоит в том, что здесь рассматривается случай построения системы управления БЛА в составе группы для решения задачи согласованного перестроения с использованием конкретного типа автопилота.

В работе представлен алгоритм согласованного перестроения и разработанный программный комплекс, с помощью которого проверяется работоспособность алгоритма.

По результатам компьютерного моделирования, было показано, что группа БПЛА успешно выполнила задание.

Исходный код программы размещен в открытом доступе [Source 2016].

## Список литературы

- [Mo 2011] Mo Jamshidi, Jose Gome1, Aldo S. Jaimes B. – «Intelligent control of UAVs for consensus-based and network controlled applications» // Applied and Computational Mathematics, 10(1), 35-64. 2011
- [Moon 2009] Moon J. – «Mission-based guidance system design for autonomous UAVs» // Georgia Institute of Technology. 2009.
- [Waydo 2007] Waydo S., Hauser J., Bailey R., Klavins E., Murray R.M. – «UAV as a Reliable Wingman: A Flight Demonstration» // IEEE Transactions on Control Systems Technology; p. 680 – 688. 2007.
- [Valenti 2004] Valenti M., Schouwenaars T., Kuwata Y., Feron E., How J. and Paunicka J. – «Implementation of a Manned Vehicle - UAV Mission System» // Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, The Boeing Company, St. Louis, MO 63166. 2004.
- [Dong 2009] Xiangxu Dong, Ben M. Chen, Guowei Cai, Hai Lin and Tong H. Lee – «Development of a comprehensive Software system for implementing Cooperative control of multiple Unmanned aerial vehicles» // IEEE International Conference on Control and Automation, p. 1629 – 1634, 2009.
- [Crowther 2003] Crowther B. – «Flocking of autonomous unmanned air vehicles» // School of Engineering University of Manchester, UK. 2003.
- [Pixhawk 3D Robotics] Pixhawk 3D Robotics официальная страница магазина <https://store.3drobotics.com/>
- [PX4,a] Официальная страница разработчиков прошивки PX4

- <https://pixhawk.org/start>
- [**Ardupilot Mega,a**] Официальная страница разработчиков прошивки Ardupilot Mega <http://ardupilot.com/>
- [**PX4,b**] Исходный код прошивки PX4 <https://github.com/PX4/Firmware>
- [**Ardupilot Mega,b**] Исходный код прошивки Ardupilot Mega <https://github.com/diydrones/ardupilot>
- [**SITL**] Описание работы режима SITL прошивки автопилота Ardupilot Mega <http://dev.ardupilot.com/wiki/setting-up-sitl-on-windows/>
- [**HIL**] Описание работы HIL режима прошивки автопилота Ardupilot Mega <http://copter.ardupilot.com/wiki/hil-quad/>
- [**MAVLink**] MAVLink протокол <https://github.com/mavlink/mavlink>
- [**Асанов и др. 2001**] М.О.Асанов, В.А.Баранский, В.В.Расин – «Дискретная математика: графы матроиды, алгоритмы.» - // Ижевск: НИЦ "РХД", 288 стр. 2001.
- [**Source 2016**] Исходный код программы <https://github.com/MihailovJava/UavControl>