

УДК 004.02

Разработка алгоритма перестроения группы беспилотных летательных аппаратов для уменьшения заметности

Михайлов Н.А.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ). 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., д. 4

e-mail: mikhailov.mai@gmail.com

Аннотация.

В работе представлены разработанные алгоритмы решения задачи уменьшения заметности группы беспилотных летательных аппаратов (БЛА), за счет применения различных построений. Проведен сравнительный анализ различных сценариев применения группы в различных построениях. Предложен алгоритм перестроения группы, ориентированный на использование малоразмерных мультироторных БЛА. Продемонстрированы результаты компьютерного моделирования работы алгоритма перестроения.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, заметность, групповое управление.

Введение

Одной из актуальных задач группового применения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (МБЛА) является задача уменьшения заметности группы при прохождении систем наблюдения ПВО. Разработки систем борьбы с МБЛА ведутся достаточно давно [1-3]. Известны работы, в которых рассматривается вопрос уменьшения заметности группы беспилотных летательных аппаратов и крылатых ракет в радиолокационном диапазоне [4]. Сложность обнаружения современных МБЛА связана с малой эффективной площадью рассеяния (ЭПР) в радиолокационном диапазоне. В оптическом и ИК диапазонах наблюдения малые размеры МБЛА также затрудняют их обнаружение. Современные беспилотные системы, при одиночном использовании способны достаточно успешно преодолевать системы противовоздушной обороны (ПВО) противника [5], но применение группы МБЛА существенно увеличивает вероятность их обнаружения, за счет большей заметности группы и меньшей маневренности, по сравнению с одиночным МБЛА. Поэтому задача уменьшения заметности группы МБЛА в оптическом диапазоне является актуальной на сегодняшний день.

Как отмечается в [6], заметность может быть снижена за счет «уменьшения габаритов летательного аппарата». Относительно группового применения МБЛА, в этом смысле, следует говорить об уменьшении суммарной площади, занимаемой МБЛА на изображении. Эта задача может быть решена соответствующим перестроением группы МБЛА для уменьшения ее заметности.

Постановка задачи

Имеется группа однотипных МБЛА мультироторного типа. Каждый МБЛА оснащен одинаковым набором аппаратных и программных средств, обеспечивающих, в т.ч. реализацию полета группы в различных штатных формациях. Полет, при котором МБЛА удерживает свое положение относительно других МБЛА с заданными значениями интервалов и дистанции, называется полетом строем, а совокупность положений МБЛА называется формацией.

Примем, что заданный набор штатных формаций МБЛА включает: «Фронт», «Колонна», «Ромб», «Клин», «Пеленг» (рис. 1). Безопасность перестроений, связанная с вероятностью столкновений, задается допустимыми значениями интервала и дистанции между МБЛА.

Требуется разработать алгоритм оперативного перестроения группы МБЛА с целью уменьшения ее заметности, с минимизацией суммарной длины траекторий перестроения.

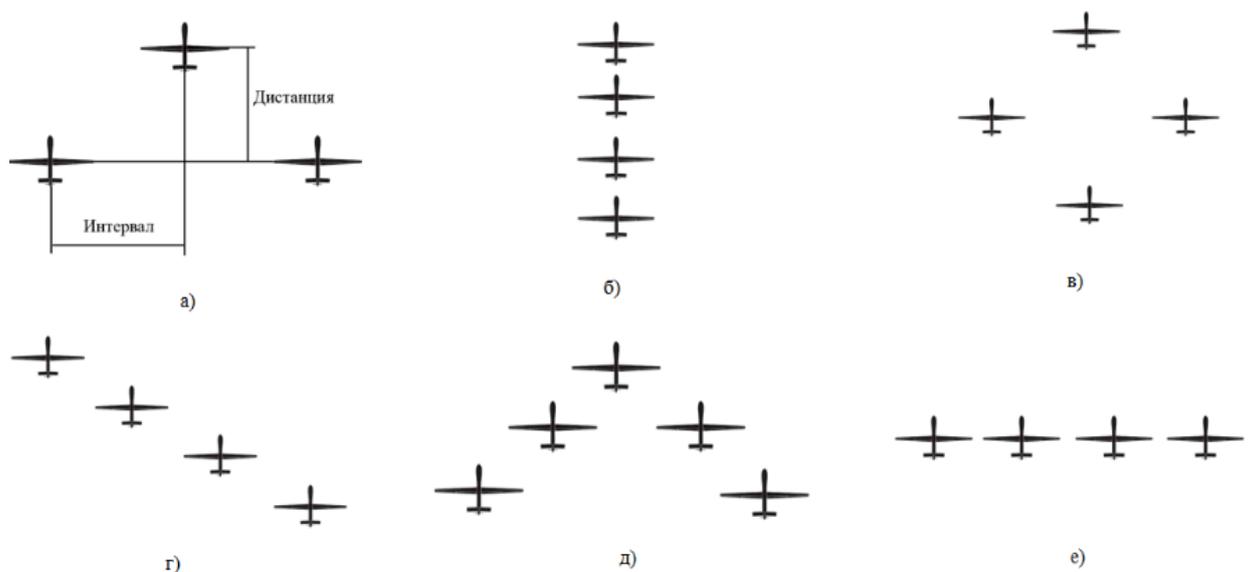


Рис. 1 а) Дистанция и интервал; б) «Колонна»; в) «Ромб»; г) «Пеленг»;

д) «Клин»; е) «Фронт»

Заметность группы МБЛА

Заметность группы МБЛА в оптическом и ИК диапазоне определяется количеством видимых пикселей объекта интереса (ОИ) на изображении. Рассмотрим различные сценарии, когда группа попадает в область видимости систем наблюдения ПВО противника, находясь в различных штатных формациях (рис. 2).

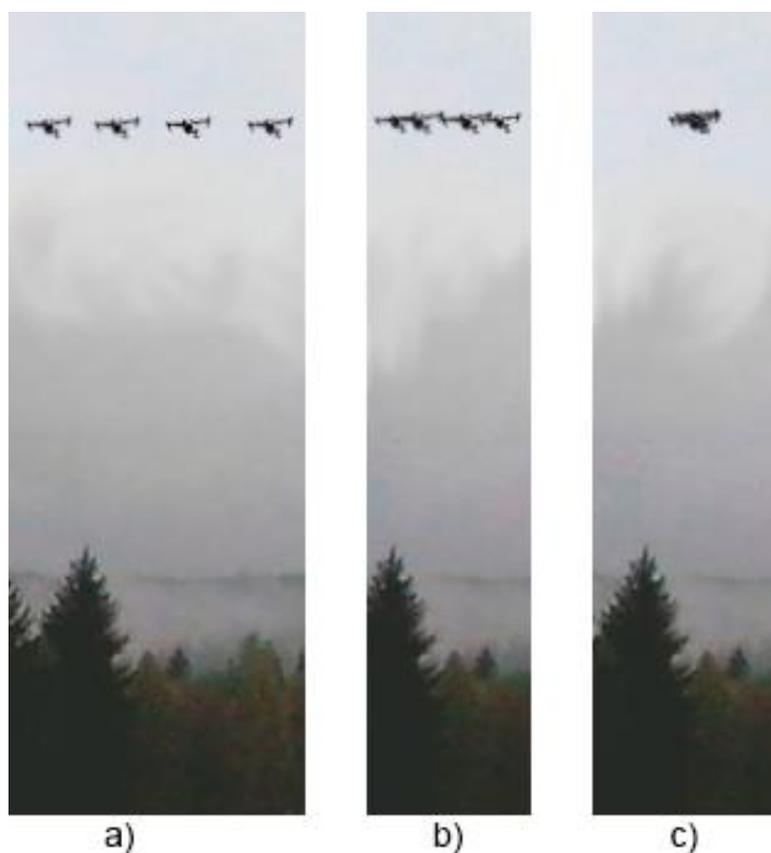


Рис. 2. Наблюдаемые изображения группы в различных построениях. а) «Фронт»; б) «Клин»; с) «Колонна».

В работе не обсуждается техническое использование 3D эталонов, производительность вычислительных машин, которые используются для

обнаружения и распознавания группы. Основными характеристиками группы, которые может определить система наблюдения ПВО противника, являются: количество аппаратов в группе, тип летательных аппаратов, ракурс, дальность до группы, вариант построения.

Рассмотрим случай, когда система наблюдения ПВО противника работает на основе корреляционных алгоритмов, так как подобные алгоритмы относительно просты в реализации и обладают высокой помехоустойчивостью. Примем, что обнаружение объектов реализуется на основе оценки значений нормированного коэффициента корреляции [7]:

$$K(\Delta i, \Delta j) = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (I_{ucx.}(\Delta i + n, \Delta j + m) - \bar{I}_{ucx.}) (I_{эм.}(n, m) - \bar{I}_{эм.})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (I_{ucx.}(n, m) - \bar{I}_{ucx.})^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (I_{эм.}(n, m) - \bar{I}_{эм.})^2}}, \quad (1)$$

где $I_{ucx.}$ – исходное изображение, на котором осуществляется поиск эталона;

$I_{эм.}$ – эталонное изображение;

N, M – размеры эталонного изображения;

$\Delta i, \Delta j$ – смещение на исходном изображении, для которого рассчитывается коэффициент;

$\bar{I}_{ucx.}$ и $\bar{I}_{эм.}$ – математические ожидания исходного и эталонного изображения, соответственно, которые определяются по формуле:

$$\bar{I} = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I(n, m)}{N \cdot M}. \quad (2)$$

Решение об обнаружении объектов принимается при выполнении условия

$$K(\Delta i, \Delta j) > K_{\text{треб.}}, \quad (3)$$

где $K_{\text{треб.}}$ заданный минимальный порог значения коэффициента корреляции, при котором принимается решение, что искомый объект обнаружен. Как правило, $K_{\text{треб.}}$ равно 0.5 ~ 0.55, и зависит от конкретной задачи [7]. В работе примем $K_{\text{треб.}} = 0.55$.

Первый случай – группа МБЛА находится в формации «Фронт» (рис. 3).

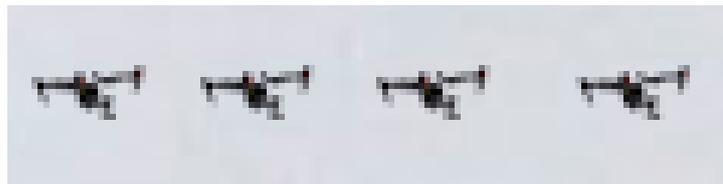


Рис. 3. Группа в формации «Фронт»

На кадре отчетливо видно всю группу целиком. Современные системы наблюдения способны с достаточно высокой вероятностью обнаружить и распознать угрозу, установив точное количество целей.

Порог бинаризации изображения (для выбранных в примере условий наблюдения) выбран равным 0.8. При заданном пороге количество пикселей, принадлежащих группе МБЛА, находящейся в формации «Фронт», равно 325 (рис. 4).



Рис. 4. Бинаризованное изображение группы МБЛА в формации «Фронт»

В качестве эталонного изображения одного МБЛА принят бинарный образ первого (крайний левый) МБЛА из бинаризованного изображения группы в формации «Фронт» (рис. 5).



Рис. 5. Эталонное изображение одного МБЛА

Количество пикселей, относящихся к одному эталонному образу МБЛА, примерно равно 80. Потенциальный предел минимальной заметности группы определяется заметностью одного МБЛА.

На рис. 6 представлена поверхность нормированных коэффициентов корреляции при сплошном поиске, для формации «Фронт».

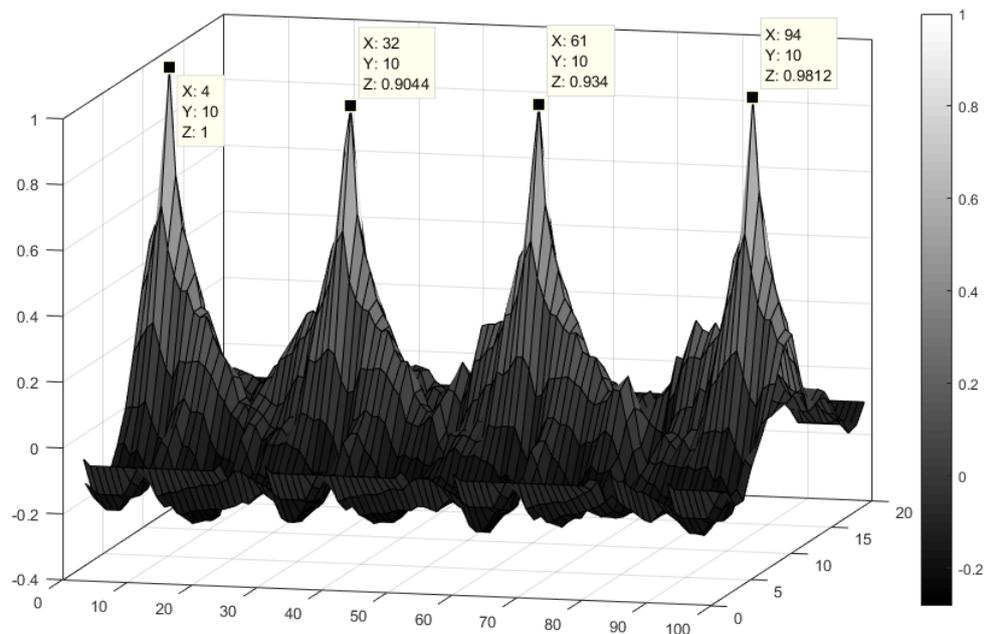


Рис. 6. Поверхность нормированных коэффициентов корреляции для формации «Фронт»

На графике поверхности выделяются четыре пика, соответствующих расположению каждого МБЛА на изображении. Значения пиков соответствуют нормированным коэффициентам корреляции более 0.9, что означает высокую степень схожести фрагмента и эталонного образа.

Так, например, будет выглядеть поверхность нормированных коэффициентов корреляции для построение «Клин» (рис. 7).

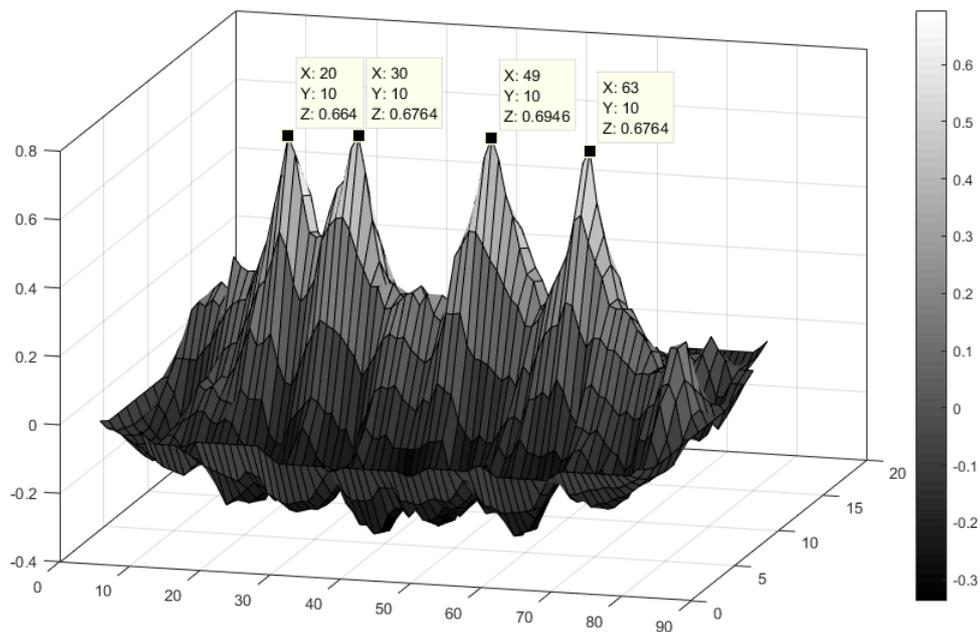


Рис. 7. Поверхность нормированных коэффициентов взаимной для формации «Клин»

Из рис. 7 видно, что значения нормированных коэффициентов корреляции уменьшились, но позволяют распознать группу и определить ее характеристики, в соответствии с критерием (3).

Еще меньшей заметности можно добиться если построить группу в формацию «Колонна», причем таким образом, чтобы направление движения построения совпадало с линией визирования системы наблюдения ПВО противника (рис. 8).

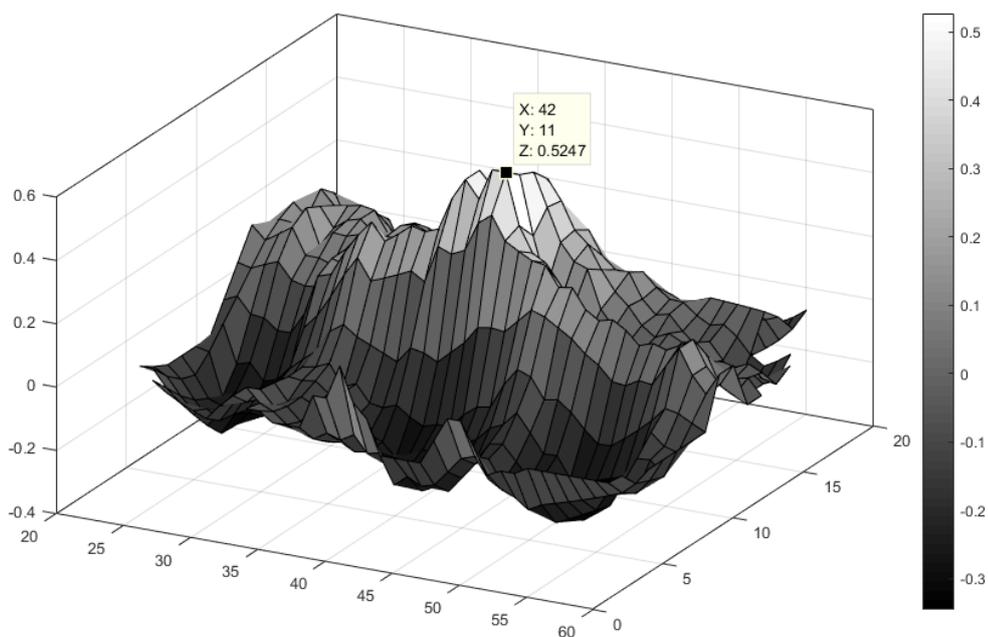


Рис. 8. Поверхность нормированных коэффициентов корреляции для формации «Колонна»

Для формации «Колонна» количество пикселей, принадлежащих группе МБЛА, равно 143. На графике поверхности можно выделить только один пик, значение коэффициента корреляции которого не удовлетворяет критерию (3) (объект не обнаружен).

Таким образом, если группа будет обладать информацией о наличии ПВО противника, т.е. обладать информацией о местоположении системы наблюдения $x_{ПВО}, y_{ПВО}, z_{ПВО}$ в стартовой системе координат и ориентации линии визирования в пространстве $\psi_{ПВО}, \delta_{ПВО}$, то возможно рассчитать оптимальное построение группы, в соответствии со схемой рис. 9. На схеме начало отсчета стартовой системы координат перемещено в точку $x_{ПВО}, y_{ПВО}, z_{ПВО}$. Ось OX совпадает с направлением на север, ось OZ перпендикулярна плоскости горизонта, ось OY дополняет систему до правой тройки. Зная координаты некоторой опорной точки

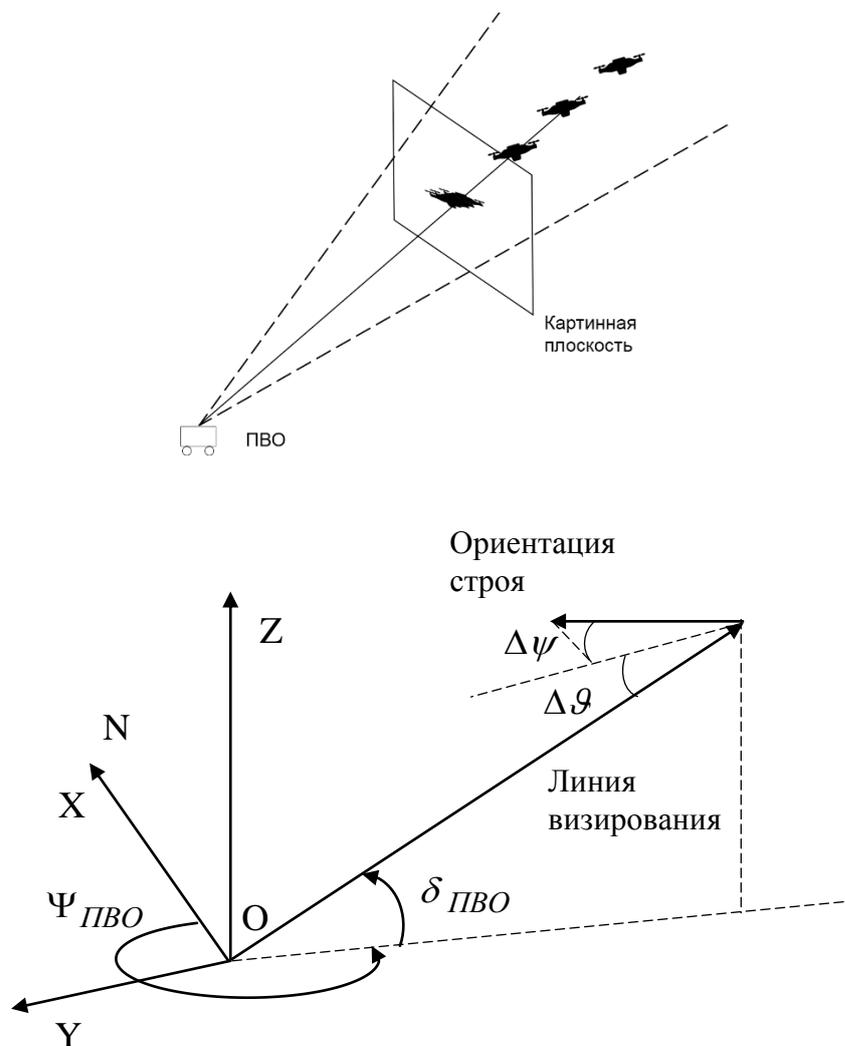


Рис. 9. Векторная схема процесса обнаружения группы

группы $x_{центр.}, y_{центр.}, z_{центр.}$ (центр формации или координаты ведущего БЛА), можно построить прямую, соединяющую эту точку и точку ПВО противника, и определить углы $\psi_{ПВО}$ и $\delta_{ПВО}$, воспользовавшись соотношениями перехода от декартовой к сферической системе координат:

$$\delta_{ПВО} = \arctan \left(\frac{\sqrt{(x_{центр.} - x_{ПВО})^2 + (y_{центр.} - y_{ПВО})^2}}{(z_{центр.} - z_{ПВО})} \right) \quad (4)$$

$$\psi_{ПВО} = \arctan \left(\frac{y_{центр.} - y_{ПВО}}{x_{центр.} - x_{ПВО}} \right)$$

Требуемые углы курса $\psi_{БЛА}$ и наклона траектории $\vartheta_{БЛА}$ определяются по формулам

$$\begin{aligned}\vartheta_{БЛА} &= \delta_{ПВО} + \pi \\ \psi_{БЛА} &= \psi_{ПВО} + \pi\end{aligned}\tag{5}$$

В дальнейшем группе необходимо оптимальным образом выстроиться вдоль этой прямой, т.е. решить задачу перестроения.

Алгоритм управления согласованным перестроением

Суть задачи перестроения заключается в определении траектории движения каждого МБЛА, с учетом некоторого критерия оптимальности, при котором обеспечивается переход от одной формации к другой. Задача перестроения имеет различные способы решения [8–10]. Рассмотрим случай, применения МБЛА мультироторного типа. Особенность таких аппаратов – возможность «зависнуть» в определенной точке пространства, что позволяет реализовать алгоритм оперативного перестроения.

Для математического описания формации разобьем пространство в горизонтальной плоскости на сетку размером $N \times N$, где N – количество аппаратов в группе (рис. 12). Размер сетки соответствует требуемым значениям интервалов и дистанций между аппаратами. Тогда, положение каждого аппарата в сетке будет определяться двумя числами i, j от 1 до $N-1$. В соответствии со схемой обнаружения (рис. 9), основными характеристиками строя будут: геометрический

центр формации $x_{центр.}, y_{центр.}, z_{центр.}$, углы курса $\psi_{БЛА}$ и наклона траектории $\vartheta_{БЛА}$ формации.

Каждый МБЛА в новой формации может занимать N различных положений, таким образом можно составить полный двудольный граф переходов. Так как количество МБЛА равно количеству возможных положений в новой формации и требуется минимизировать суммарную длину переходов, то подобная задача известна в комбинаторике как «Линейная задача о назначениях» [11, с. 249].

Одним из классических алгоритмов решения задачи о назначениях является «Венгерский алгоритм» [11, с. 251]. Решением задачи является массив назначений, в котором для каждого порядкового номера МБЛА будет указан номер ячейки в формации, которую необходимо занять $i_{треб.}, j_{треб.}$.

В дальнейшем можно оснастить каждый МБЛА базой данных (БД), в которой будет информация по всем возможным перестроениям в зависимости от: значения интервалов, дистанций, количества МБЛА и формы построений.

С учетом вышеизложенного, алгоритм перестроения можно описать следующим образом:

1. С внешнего контура управления поступает сигнал о необходимости перестроения в некоторую формацию по ключу новой формации (например, порядковый номер – n);
2. Из памяти извлекается текущий ключ формации $n_{тек.}$, а также значения интервала, дистанции и количества МБЛА в группе, которые обозначим как I, D, N соответственно;

3. По параметрам, указанным в п. 2, из БД извлекается массив назначений, в соответствии с порядковым номер МБЛА в формации определяется требуемое положение $i_{треб.}, j_{треб.}$;
4. Из памяти извлекается текущее положение в формации $i_{тек.}, j_{тек.}$;
5. С учетом текущего и требуемого положения в формации, а также значениями интервалов и дистанции вычисляется необходимое смещение $\Delta x_{форм.}, \Delta y_{форм.}$:

$$\begin{aligned}\Delta x_{форм.} &= D \cdot (j_{треб.} - j_{тек.}) \\ \Delta y_{форм.} &= I \cdot (i_{треб.} - i_{тек.})\end{aligned}\tag{6}$$

6. С учетом требуемого положения в формации каждого МБЛА вычисляется геометрический центр формации:

$$\begin{aligned}x_{центр} &= \frac{I}{N} \sum_{m=1}^N j_{треб., m} \\ y_{центр} &= \frac{D}{N} \sum_{m=1}^N i_{треб., m},\end{aligned}\tag{7}$$

где m – индекс МБЛА в формации.

7. Из навигационной системы автопилота запрашивается положение МБЛА в стартовой СК $x_{БЛА}, y_{БЛА}, z_{БЛА}$;
8. Вычисляется требуемое смещение:

$$\begin{pmatrix} \Delta x_{БЛА} \\ \Delta y_{БЛА} \\ \Delta z_{БЛА} \end{pmatrix} = C(\psi_{БЛА}, \vartheta_{БЛА}) \cdot \begin{pmatrix} \Delta x_{форм.} - x_{центр} \\ \Delta y_{форм.} - y_{центр} \\ 0 \end{pmatrix},\tag{8}$$

где $C(\psi, \vartheta)$ – переходная матрица, необходимая для учета разворота относительно оси Z стартовой СК на угол ψ и оси Y стартовой СК на угол ϑ , которая определяется следующим образом:

$$C(\psi, \vartheta) = \begin{pmatrix} \cos \vartheta \cos \psi & -\cos \vartheta \sin \psi & \sin \vartheta \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ -\sin \vartheta \cos \psi & \sin \vartheta \sin \psi & \cos \vartheta \end{pmatrix}, \quad (9)$$

9. Рассчитанные значения передаются на автопилот как команда управления.

Блок-схема предложенного подхода представлена на рис. 11.

Для проверки работоспособности алгоритма, был разработан программно-вычислительный комплекс на базе прошивки автопилота Pixhawk, и проведен эксперимент, моделирующий выполнение группой полетного задания.

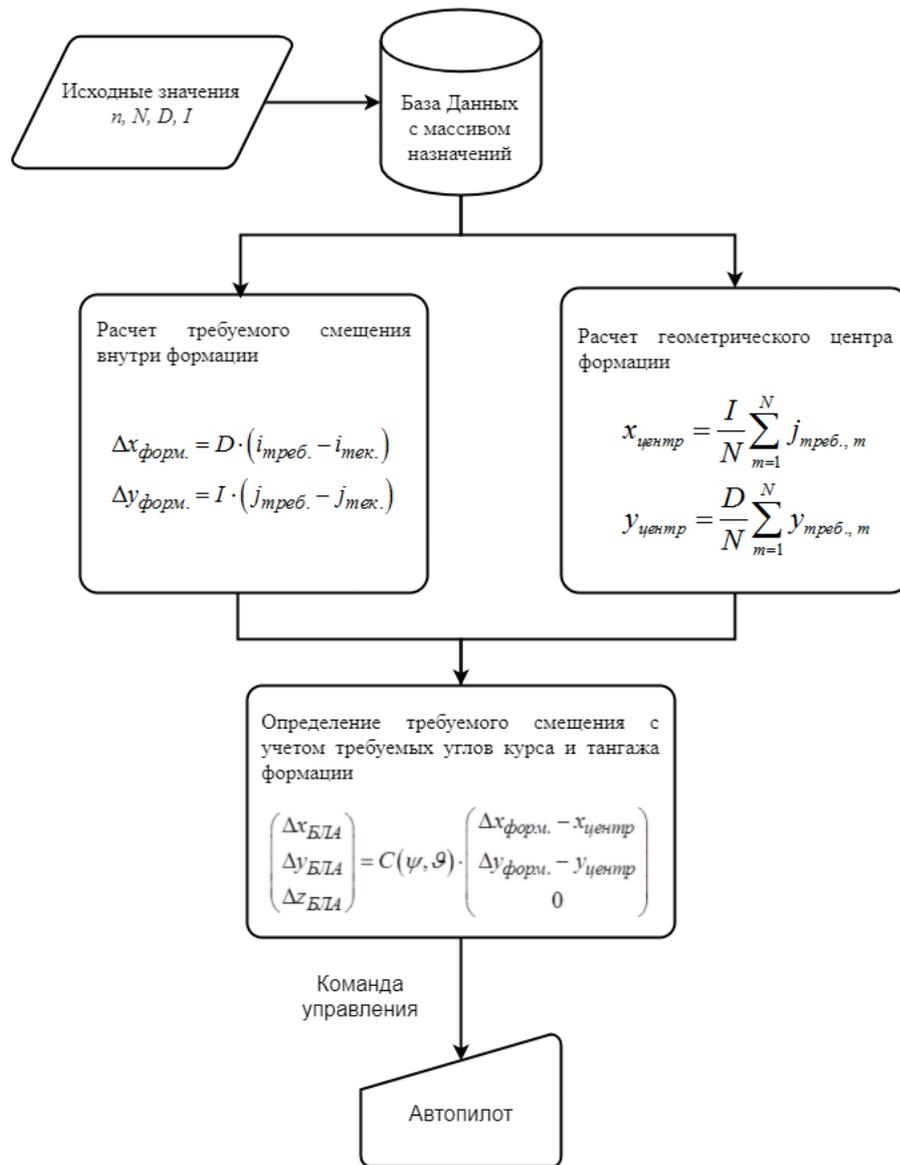


Рис. 10. Блок-схема алгоритма перестроения

Экспериментальное полетное задание определим следующим образом:

1. Начальное построение «Колонна»;
2. Первая точка маршрута координаты $X = 0, Y = 30$;
3. В первой точке маршрута сменить формацию на «Фронт»;
4. Вторая точка маршрута координаты $X = 30, Y = 30$;
5. Во второй точке маршрута сменить формацию на «Клин»;
6. Третья точка маршрута координаты $X = 30, Y = 0$;

Количество МБЛА в группе $N = 3$, значение интервалов и дистанций между МБЛА $I = D = 5$, координаты и расстояния указаны в метрах.

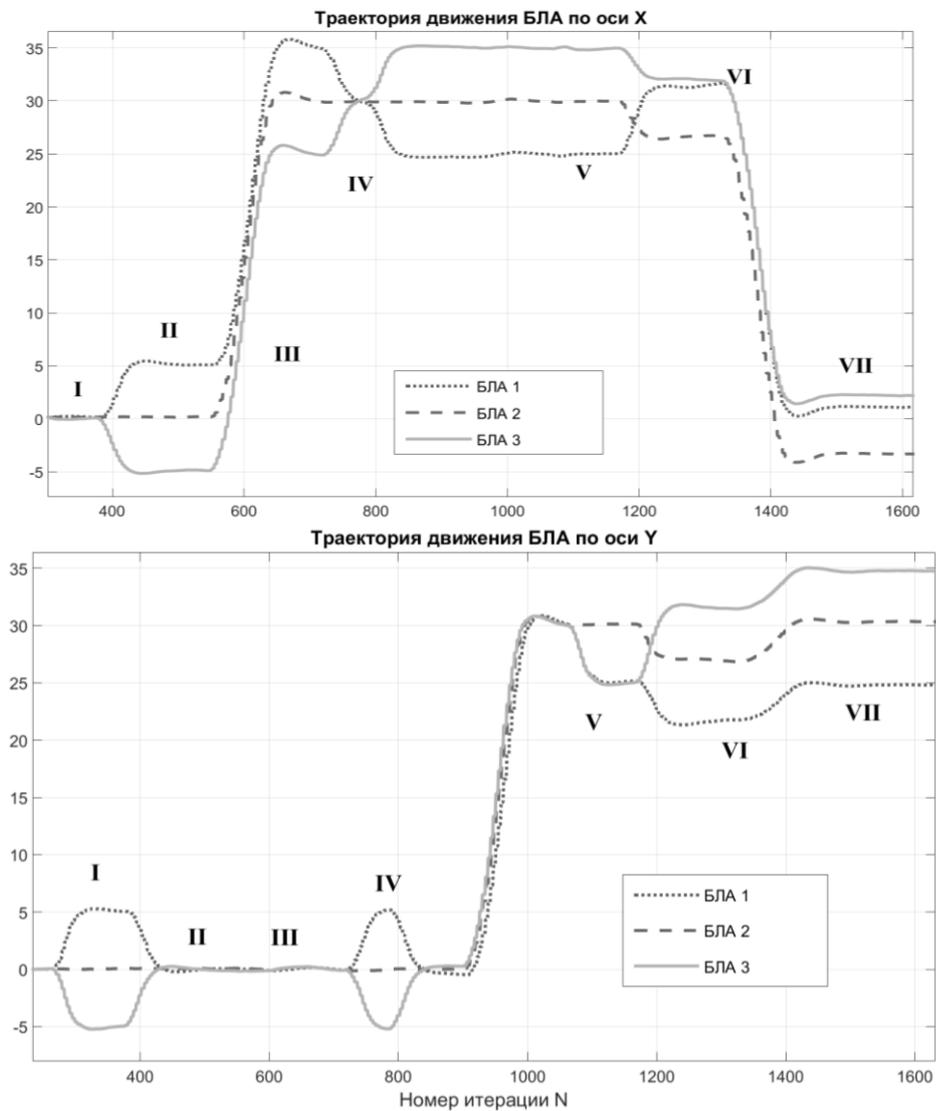


Рис. 11. Траектории движения группы МБЛА

Результаты компьютерного моделирования эксперимента представлены на графиках (рис. 12), размерность координат на плоскостях X и Y метры: **I** - начальное построение «Колонна», **II** - разворот на первую точку маршрута, **III** = группа достигла первой точки маршрута (во время движения аппараты не столкнулись), **IV** - смена формации с «Колонна» на «Фронт» и движение ко второй точки маршрута,

V - смена формации с «Колонна» на «Клин», VI - разворот на третью точку маршрута, VII - движение к третьей точке маршрута. По достижению третьей точки маршрута каждый МБЛА занял требуемую позицию, что можно считать успешным завершением миссии.

Заключение

В отличии от [4] работе рассматривается вопрос уменьшения заметности в оптическом диапазоне для МБЛА мультироторного типа. Также продемонстрировано, каким образом различные построения могут уменьшить заметность группы МБЛА в оптическом диапазоне.

Рассмотрены возможные сценарии попадания группы в область видимости систем наблюдения ПВО противника и проведен сравнительный анализ эффективности различных штатных формаций. Выработана методика выбора оптимального построения для уменьшения заметности в случае одного наблюдателя в составе системы наблюдения ПВО противника.

Разработан алгоритм, обеспечивающий оперативное перестроение группы МБЛА мультироторного типа. Проведено компьютерное моделирование с использованием компьютерной модели автопилота Pixhawk и МБЛА мультироторного типа, которое показало работоспособность предложенного алгоритма перестроения.

Библиографический список

1. Ерёмин Г.В., Гаврилов А.Д., Назарчук И.И. Организация системы борьбы с малоразмерными БПЛА // Арсенал Отечества. 2015. № 6(14). URL: <http://arsenal-otechestva.ru/article/389-antidrone>
2. Ананенков А.Е., Марин Д.В., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Соколов П.В. К вопросу о наблюдении малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75662>
3. Аменитский М.В. Анализ потенциальных угроз системы управления беспилотных летательных аппаратов средних и тяжелых классов // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=81066>
4. McFarland M.B., Zachery R.A., Taylor B.K. Motion planning for reduced observability of autonomous aerial vehicles // IEEE International Conference on Control Applications, 22-27 Aug. 1999, Hawaii. Vol. MP 5, no. 3, pp. 231-235.
5. Израиль безрезультатно направил две ракеты Patriot на перехват БЛА на Голанах. URL: <http://tass.ru/mezhdunarodnaya-panorama/3462479>
6. Свищев Г.П. Авиация: Энциклопедия. - М.: Большая Российская Энциклопедия, 1994. - 736 с.
7. Ким Н.В. Обработка и анализ изображений в системах технического зрения. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 164 с.
8. Дьяченко А.А. Задача формирования строя в группе БПЛА // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2012. Т. 128 № 3. С. 22 – 30.

9. Ефанов В.Н., Мизин С.В., Неретина В.В. Управление полетом БПЛА в строю на основе координации взаимодействия группы летательных аппаратов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2014. Т. 18. № 1(62). С. 1-10.
10. J. Barreiro-Gomez, I. Mas, C. Ocampo-Martínez, R. Sánchez Peña and N. Quijano. Distributed formation control of multiple unmanned aerial vehicles over time-varying graphs using population games // 55th IEEE Conference on Decision and Control. 2016, Las Vegas, EEUU, pp. 5245-5250,
11. Асанов М.О., Баранский В.А., Расин В.В. Дискретная математика: графы матроиды, алгоритмы. - Ижевск: НИЦ "РХД", 2001. - 288 с.