



На правах рукописи

НОРСЕЕВ Сергей Александрович

**АЛГОРИТМЫ ПРЕДПОЛЕТНОГО
КВАЗИОПТИМАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МАРШРУТОВ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации (технические системы)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2017

Работа выполнена на кафедре прикладной математики и систем автоматизированного проектирования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева»

Научный руководитель: **Багаев Дмитрий Викторович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Донченко Анатолий Анатольевич**
доктор технических наук, профессор.
Заместитель начальника научно-исследовательского центра в ФКУ «12 ЦНИИ Минобороны России»
Московская область, г. Сергиев Посад-7.

Злотников Константин Аркадьевич
доктор технических наук
Заместитель директора по производству и НИОКР в филиале АО «Концерн радиостроения «Вега» в г. Санкт-Петербурге

Ведущая организация: **Акционерное общество «Концерн «Системпром»**
г. Москва

Защита состоится «24» мая 2017г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д212.211.01 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: **390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» и на сайте <http://www.rsreu.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



В.Н. Пржегорлинский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. С развитием информационных технологий человечество всё активнее использует робототехнические системы (РБТС) для выполнения различных задач, часто связанных с риском для жизни и здоровья.

Дальнейшее усовершенствование одиночных РБТС сопряжено с рядом неразрешимых проблем: ограничения, накладываемые массогабаритными характеристиками РБТС, ограниченность систем технического зрения (СТЗ) и др.

По этим причинам перспективным направлением развития робототехники является групповая робототехника, заключающаяся в разработке методов и алгоритмов группового взаимодействия роботов в целях решения общей задачи, а также практическая реализация этих методов и алгоритмов. Проблемой группового применения роботов занимаются в ведущих научных центрах мира. Однако исследования в этой области до сих пор так и не дошли до практического применения.

Проблемы групповой робототехники будем рассматривать на примере задачи сбора информации о территории. Пусть имеется некоторая ограниченная территория S , состояние которой изменяется с течением времени. Также имеется N беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), на каждом из которых установлен видеодатчик высокого разрешения. Требуется организовать такое взаимодействие группы, при котором за минимальное время будет сфотографирована вся территория. Так как время обследования меньше, чем время изменения состояния территории, то считаем состояние территории квазистатическим.

Поскольку каждый БПЛА оснащается источником энергоресурса, имеющим ограниченную ёмкость, то наибольшую важность приобретает не только обеспечение минимального времени, затрачиваемого на сбор информации, но и обеспечение минимального расхода энергоресурса. Также необходимо гарантировать отсутствие столкновений между БПЛА группы. При использовании группы БПЛА в разведывательных целях важным является обеспечение минимального времени сбора информации об оперативной обстановке на близлежащей территории.

Степень разработанности темы. Проблеме группового управления роботами посвящен ряд крупных научно-исследовательских проектов, выполняемых в США, Японии, Германии, Китае и России. Примерами таких проектов являются: «MARTHA» (Франция), «AMADEUS» (Япония), «DARS» (Япония), «Cognitive Colonies» (США), «Тактические мобильные робототехнические системы» (США), «Kiva Systems» (США). Примерами роботизированных систем, автоматизирующих решение

задачи обследования территории, являются: «MSSMP» (США), «MDARS» (США), «Guardium» (Израиль), «Eyedrive» (Израиль), «Платформа-М» (Россия), БПЛА «Груша» (Россия), «Трал Патруль» (Россия) и др.

В России наиболее заметными работами в области группового взаимодействия роботов являются работы Каляева И.А., Капустяна С.Г., Станкевича Л.А., Юревича Е.И., Шалыто А.А., Городецкого В.И., Павловского В.Е., Швецова А.Н., Лохина В.М., Коршунова Ю.М. и других исследователей. В данных работах предлагаются и развиваются: алгоритм коллективного улучшения плана, алгоритм последовательного выбора целей, многоагентный подход к построению систем управления, системы управления на основе нейронных сетей и когнитивных моделей и др.

Проблемами автоматизации обработки и анализа получаемых изображений в России занимаются Алпатов Б.А., Денисов Д.А., Колмогоров Г.С., Крыловецкий А.А., Костоусов В.Б., Кулешов С.В., Путятин Е.П., Бакут П.А. и другие исследователи.

Целью диссертационной работы является разработка алгоритмов предполетного квазиоптимального определения маршрутов группы беспилотных летательных аппаратов, осуществляющих сбор информации о территории с изменяющейся оперативной обстановкой, не допускающих столкновений между членами группы и обеспечивающих сбор информации об оперативной обстановке на близлежащей территории за минимальное время.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**.

1. Провести анализ существующих алгоритмов разбиения территории на зоны и методов группового взаимодействия РБТС.

2. Разработать математическую модель БПЛА с видеодатчиком на борту.

3. Модифицировать алгоритм последовательного выбора с целью недопущения прохождения по реперным точкам двух или более различных БПЛА при минимальном расходе энергоресурса и обеспечении минимального времени сбора информации об оперативной обстановке на близлежащей территории.

4. Разработать метод идентификации столкновений БПЛА в воздухе.

5. Разработать алгоритм синхронизации движения БПЛА, не допускающий их столкновений.

Методы исследования. В диссертационной работе использованы методы, основанные на элементах теории множеств, аналитической геометрии, теории алгоритмов, теории вероятностей, а также имитационного моделирования.

Научная новизна работы

1. Разработана математическая модель БПЛА с видеодатчиком высокого разрешения на его борту, позволяющая свести задачу обследования территории к задаче о назначениях.

2. Модифицирован алгоритм последовательного выбора. Модифицированный вариант отличается тем, что он минимизирует прохождение по реперным точкам двух или более различных БПЛА.

3. Предложен метод идентификации столкновений БПЛА в воздухе, основанный на проверке минимального расстояния между БПЛА во время работы.

4. Разработан алгоритм синхронизации движения БПЛА, не допускающий их столкновения. При использовании данного алгоритма вероятность столкновения между двумя БПЛА не превышает 0.05%.

Теоретическая значимость работы заключается в её вкладе в развитие группового взаимодействия РБТС.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанные в ней алгоритмы и методы могут быть использованы при проектировании и построении систем управления группой РБТС, осуществляющих сбор информации об ограниченной территории.

Результаты диссертационной работы использовались в НИР «Удар», выполненной в АО «ВНИИ «Сигнал».

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель БПЛА с видеодатчиком на борту, позволяющая свести задачу обследования территории к задаче о назначениях.

2. Модифицированный алгоритм последовательного выбора, не допускающий прохождения по реперным точкам двух или более различных БПЛА при минимальном расходе времени на обследование близлежащих участков территории.

3. Метод идентификации столкновений БПЛА в воздухе, позволяющий обнаруживать места столкновений членов группы до того, как они приступят к выполнению поставленной задачи.

4. Алгоритм синхронизации движения БПЛА, не допускающий их столкновений.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается корректным использованием математического аппарата и результатами имитационного моделирования.

Внедрение результатов работы. Материалы диссертации внедрены в процесс разработки систем группового управления роботами в ПАО «НПО «Андрюидная техника» и в АО «ВНИИ «Сигнал». Результаты

исследования внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВПО «КГТА им. В.А. Дегтярева».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на: международной конференции (RAIPAP'2013) «Робототехника и искусственный интеллект. Проблемы и перспективы» (Брест, 2013); международной школе-конференции «Тараповские чтения-2013» «Современные проблемы математики, механики, информатики» (Харьков, 2013); международной научно-технической конференции «Современные технологии в системах управления и вооружения» (Ковров, 2013).

Публикации. Основное содержание работы изложено в 13 работах, в том числе в 7 журналах, входящих в перечень ВАК, получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, четырех приложений. Работа изложена на 179 страницах машинописного текста, содержит 67 рисунков и 4 таблицы. Библиографический список содержит 78 наименований, из них 14 иностранных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана и обоснована актуальность работы, сформулирована основная цель и задачи, научная новизна и практическая ценность диссертационной работы.

В первой главе проведен обзор, сравнение и анализ современных алгоритмов группового взаимодействия роботов. Проанализирована задача сбора информации о территории и методы её решения с помощью группы РБТС. Также проведен сравнительный анализ существующих алгоритмов разбиения территории на зоны.

Для разбиения территории на зоны существует несколько алгоритмов. Алгоритмы Ллойда и Morse Decomposition не ограничивают размер одной зоны, что может привести к разбиению территории на слишком большие зоны, выходящие за пределы технических возможностей видеодатчиков. Поэтому в качестве основного алгоритма разбиения территории на зоны был выбран алгоритм наложения прямоугольной сетки. Размер ячейки такой сетки определяется на основе технических характеристик видеодатчика, установленного на борту БПЛА.

Для решения задачи о назначении также существует несколько алгоритмов: случайного выбора, аукциона, коллективного улучшения плана, последовательного выбора и др. На основе проведенного

сравнительного анализа был выбран алгоритм последовательного выбора. Данный выбор обусловлен тем, что данный алгоритм находит квазиоптимальное решение и имеет полиномиальную вычислительную сложность.

В этом алгоритме БПЛА по очереди выбирают себе очередную цель до тех пор, пока не будут разобраны все цели. При каждом выборе БПЛА старается максимизировать некоторую функцию приемлемости:

$$f(t, i_r, i_z) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где t – время; i_r – номер БПЛА, делающего выбор; i_z – номер цели.

Вторая глава посвящена разработке математической модели БПЛА с видеодатчиком высокого разрешения на борту.

Состояние БПЛА B описывается следующим образом:

$$B = (X_{\bar{o}}, Y_{\bar{o}}, Z_{\bar{o}}, \psi_{\bar{o}}, \gamma_{\bar{o}}, \theta_{\bar{o}}, R_{\bar{o}}), \quad (2)$$

где $X_{\bar{o}}, Y_{\bar{o}}, Z_{\bar{o}}$ – пространственные координаты БПЛА; $\psi_{\bar{o}}$ – угол рыскания; $\gamma_{\bar{o}}$ – угол крена; $\theta_{\bar{o}}$ – угол тангажа; $R_{\bar{o}}$ – запас хода.

Состояние видеодатчика V описывается следующим образом:

$$V = (X_{\bar{e}}, Y_{\bar{e}}, Z_{\bar{e}}, \psi_{\bar{e}}, \gamma_{\bar{e}}, \theta_{\bar{e}}, \alpha, \beta, R_x, R_y), \quad (3)$$

где $X_{\bar{e}}, Y_{\bar{e}}, Z_{\bar{e}}$ – пространственные координаты видеодатчика; $\psi_{\bar{e}}$ – угол рыскания; $\gamma_{\bar{e}}$ – угол крена; $\theta_{\bar{e}}$ – угол тангажа видеодатчика; α – угол поля зрения объектива видеодатчика; β – угол, значение тангенса которого равно отношению сторон кадра; R_x и R_y – разрешение снимка вдоль горизонтальной и вертикальной сторон кадра соответственно.

Полагаем, что видеодатчик гиросtabilизирован и закреплен на борту БПЛА с помощью карданной подсистемы. Координаты видеодатчика задаются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} X_{\bar{e}} \\ Y_{\bar{e}} \\ Z_{\bar{e}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\bar{o}} \\ Y_{\bar{o}} \\ Z_{\bar{o}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где dX, dY, dZ – смещения центра видеодатчика от центра БПЛА, определяемые конструктивными особенностями БПЛА и креплением к нему видеодатчика, по осям координат.

Каждый кадр, снимаемый видеодатчиком, представляется в виде:

$$C = (X_c, Y_c, H, D_{\bar{o}}, \beta, \gamma, a, \chi_x, \chi_y, t), \quad (5)$$

где X_c и Y_c – координаты центра кадра в плоскости $ХОУ$; H – высота БПЛА во время снимка, равная его координате $Z_{\bar{o}}$; $D_{\bar{o}}$ – размер проекции половины диагонали кадра на плоскость $ХОУ$; β – угол, значение тангенса которого равно отношению сторон кадра; γ – угол крена видеодатчика во время снимка; a – «ценность» кадра; χ_x и χ_y – отношение размера

снимаемого участка (в метрах) к размеру кадра (в пикселях) в направлении сторон кадра; t – время снимка.

В общем случае координаты центра кадра в плоскости XOY задаются в виде:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix} + Z_0 A_0 \begin{bmatrix} tg \psi_0 \\ tg \theta_0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где A_0 – направляющая матрица, зависящая от направления видеодатчика. Данные координаты должны совпадать с координатами центра зоны, охватываемой данным кадром.

Половина проекции диагонали кадра на плоскость XOY составит:

$$D_0 = Z_0 tg \frac{\alpha}{2} \sqrt{tg^2 \psi_0 + tg^2 \theta_0 + 1}. \quad (7)$$

Отношения χ_x и χ_y выражаются следующим образом:

$$\chi_x = \frac{W_c}{R_x}, \quad \chi_y = \frac{H_c}{R_y}, \quad (8)$$

где W_c – размер снимаемого участка в метрах вдоль координатной оси X ; H_c – размер снимаемого участка в метрах вдоль координатной оси Y .

Для обеспечения качественной обработки собранной информации значения отношений χ_x и χ_y должны удовлетворять условию:

$$\chi_x < \chi, \quad \chi_y < \chi, \quad (9)$$

где χ – пороговое значение отношения размера снимаемого видеодатчиком участка (в метрах) к размеру кадра (в пикселях).

Условие (9) накладывает ограничения на высоту БПЛА. Для обеспечения равного размера снимаемых участков, все БПЛА должны осуществлять сбор информации, находясь на одной строго фиксированной высоте.

Пусть задана некоторая ограниченная территория S , которую нужно полностью охватить в виде набора кадров. У нас есть N БПЛА с установленными на них видеодатчиками. Полагаем, что БПЛА идентичны друг другу. Размер каждого кадра, получаемого отдельным видеодатчиком, определяется соотношением (7) с учетом условий (9), а положение – соотношением (6). Каждому кадру ставится в соответствие зона, полностью охватываемая этим кадром. В соответствии с этим исходная территория S разбивается на зоны одинакового размера и формы. Каждая зона соответствует отдельному кадру. Пусть C – множество зон, на которые разбивается территория S ; c_i – отдельная зона; M – количество зон, равное количеству кадров. При этом:

$$C = c_1 \cup c_2 \cup c_3 \cup \dots \cup c_{M-1} \cup c_M. \quad (10)$$

При разбиении необходимо соблюдать следующие условия:

$$S/C = \emptyset, \quad (11)$$

$$cS_{\min} > cS_{\min}^*, \quad (12)$$

где cS_{\min} – минимальная площадь пересечения между двумя соседними зонами, полученная в результате разбиения; cS_{\min}^* – минимально допустимая площадь пересечения между двумя соседними зонами. Значение cS_{\min}^* равно:

$$cS_{\min}^* = \begin{cases} 2 * dp_X * H_c, & \text{зоны соседствуют вдоль оси } X, \\ 2 * dp_Y * W_c, & \text{зоны соседствуют вдоль оси } Y, \end{cases} \quad (13)$$

где dp_X, dp_Y – максимальная ошибка позиционирования БПЛА в заданной точке вдоль координатной оси.

Условие (12) необходимо для компенсации ошибок позиционирования БПЛА в заданной точке.

В качестве алгоритма разбиения территории на зоны выбран алгоритм наложения прямоугольной сетки. Размер ячейки такой сетки определяется соотношением (7) с учетом ограничений (9) и (12). На рисунке 1 показан пример такого разбиения.

Выражения (2)-(9) составляют математическую модель БПЛА с видеодатчиком на борту.

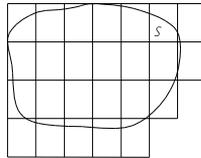


Рис. 1. Разбиение территории S на зоны

В третьей главе осуществляется разработка алгоритмов предполетного квазиоптимального определения маршрутов группы беспилотных летательных аппаратов, не допускающих столкновений между БПЛА и гарантирующих минимальное время сбора информации об оперативной обстановке на близлежащей территории.

Множество зон C , соответствующее множеству кадров, на основе выражения (6) приводится к множеству реперных точек P . Реперная точка $p_j \in P$ – это точка в пространстве, в которой должен находиться БПЛА для того, чтобы сформировать изображение (кадр), охватывающее зону c_j .

При посещении реперных точек БПЛА должен:

- достигнуть каждой реперной точки;
- остановиться в ней и сделать снимок (без остановки кадр может получиться смазанным);
- после посещения всех реперных точек вернуться на базу.

Допустим, что БПЛА нужно посетить M реперных точек. В этом случае расход энергоресурса составит:

$$R^* = k_1 + (k_2 + k_3) * (M + 1) + k_4 M + k_5 L + k_6 \sum_{j=0}^M \varphi_j + k_7, \quad (14)$$

где k_1 – расход энергоресурса на набор нужной высоты; k_2 – расход энергоресурса на трогание и набор скорости; k_3 – расход энергоресурса на торможение; k_4 – расход энергоресурса на изготовление снимка; k_5 – расход энергоресурса на единицу пути при движении с постоянной скоростью; L – пройденный с постоянной скоростью путь; k_6 – расход энергоресурса при повороте на один градус; φ_j – суммарный поворот в j -й реперной точке (складывается из поворота при ориентировании видеодатчика и при ориентировании БПЛА на следующую цель); k_7 – расход энергоресурса на посадку в стартовой точке.

Путь L рассчитывается по формуле:

$$L = \sum_{k=0}^M \sqrt{(X_k - X_{k+1})^2 + (Y_k - Y_{k+1})^2} - (M + 1) * (L_r + L_s), \quad (15)$$

где $(X_0; Y_0)$ и $(X_{M+1}; Y_{M+1})$ – координаты стартовой точки, из которой стартуют и в которую возвращается БПЛА группы; L_r и L_s – расстояние, проходимое БПЛА во время набора скорости и остановки в реперной точке соответственно.

Необходимое количество энергоресурса должно удовлетворять условию

$$R^* < R_\sigma, \quad (16)$$

где R^* – расход энергоресурса (14), R_σ – имеющийся на борту БПЛА запас энергоресурса.

Если оно не выполнено, то БПЛА не сможет выполнить поставленную перед ним задачу.

Для гарантирования минимального времени сбора информации об оперативной обстановке на близлежащей территории введем для каждой зоны понятие ценности:

$$a_k = \frac{1}{L_k}, \quad (17)$$

где L_k – расстояние между стартовой точкой, из которой стартует группа, и центром k -й зоны.

Пусть $CP_i(t)$ – множество реперных точек, проверенных i -м БПЛА к моменту времени t . Данное множество удовлетворяет следующим условиям:

$$\begin{aligned} CP_i(t) &= \emptyset, \text{ при } t < t_{i, \min}; \\ CP_i(t) &\subset P_i, \text{ при } t_{i, \min} < t < t_{i, \max}; \\ CP_i(t) &= P_i, \text{ при } t > t_{i, \max}; \end{aligned}$$

где $t_{i, \min}$ – время, необходимое i -му БПЛА для того, чтобы посетить свою первую реперную точку; $t_{i, \max}$ – время, необходимое i -му БПЛА для того,

чтобы посетить все реперные точки; P_i – множество реперных точек, принадлежащих i -му БПЛА.

Суммарная ценность, накопленная i -м БПЛА к моменту времени t , составит:

$$A_i(t) = \sum_{k=1}^{|CP_i(t)|} a_k. \quad (18)$$

Для всей группы накопленная сумма ценностей составит:

$$A(t) = \sum_{j=1}^N A_j(t), \quad (19)$$

где N – количество БПЛА в группе.

Для максимизации накапливаемой ценности каждый БПЛА должен использовать функцию приемлемости:

$$f_1(t, i, j) = \sum_{k=1}^{|CP_i(t) \cup j|} a_k \rightarrow \max, \quad (20)$$

где i – номер БПЛА, делающего выбор; j – реперная точка доступная для выбора. Такие реперные точки будем называть потенциальными.

Однако, как показывает моделирование, гораздо эффективнее использовать функцию приемлемости не на основе ценности, а на основе расстояния:

$$f_2(t, i, j) = \frac{1}{\sqrt{(X_{i,k} - X_j)^2 + (Y_{i,k} - Y_j)^2}} \rightarrow \max, \quad (21)$$

где $(X_{i,k}; Y_{i,k})$ – координаты последней реперной точки i -го БПЛА; $(X_j; Y_j)$ – координаты потенциальной j -й реперной точки.

На рисунке 2 представлены графики нарастания суммарной ценности (19) при использовании функции приемлемости (20) (график зеленого цвета) и (21) (график красного цвета).

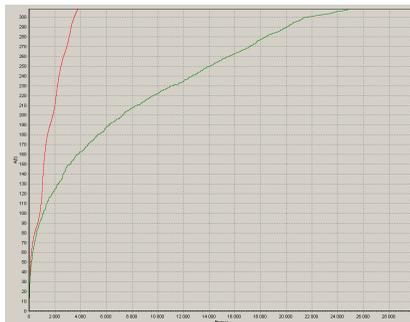


Рис. 2. Нарастание ценности при использовании функции (20) (график зеленого цвета) и (21) (график красного цвета)

На рисунке 2 по оси абсцисс откладывается время, а по оси ординат – значение функции (19).

Из графиков, изображенных на рисунке 2 видно, что при использовании функции приемлемости (21) время работы группы оказывается в 6.5 раз меньше, чем при использовании функции (20).

Однако использование функции приемлемости (21) имеет один существенный недостаток: при его использовании есть риск несвоевременного обнаружения противника. Данная проблема проиллюстрирована на рисунке 3. При использовании функции (20) такой проблемы не возникает.

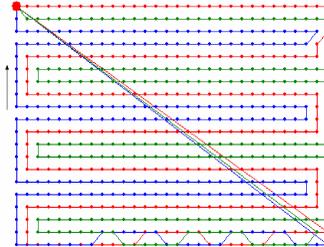


Рис. 3. Если противник наступает в направлении стрелки, то он может оказаться незамеченным вовремя

Поэтому решено использовать двухэтапную оптимизацию. В ней вначале выбирается K реперных точек, наилучших с точки зрения функции (21), а потом из них выбирается точка, наилучшая с точки зрения функции (20). Исследование данного метода при различных значениях K показало, что наилучший результат достигается при K равном 2. На рисунке 4 представлены графики нарастания ценности при двухэтапной оптимизации (график красного цвета) и при использовании функции (21) (график зеленого цвета). На нём по оси абсцисс откладывается время, а по оси ординат – значение функции (19).



Рис. 4. График нарастания ценности при двухэтапной оптимизации (график красного цвета) и при использовании функции (21) (график зеленого цвета)

Время работы группы оказывается на 21.5% больше, чем при использовании функции (21). Но при этом решается проблема, изображенная на рисунке 3.

Однако метод двухэтапной оптимизации не проверяет наличие возможных столкновений между членами группы. Для этого нужно сформировать траектории БПЛА таким образом, чтобы ни один БПЛА не проходил через реперные точки, которые отданы другим БПЛА группы. Для реализации этого предлагается модифицированный алгоритм последовательного выбора, в котором к условию (16) добавлено еще одно ограничивающее условие: пересекать реперные точки, отданные другому члену группы, нельзя.

Такая модификация алгоритма позволяет исключить потенциально опасные участки траектории, в которых могут произойти столкновения. На рисунке 5 представлены траектории БПЛА без ограничения на прохождение через реперные точки других БПЛА (рис. 5(а)) и с ограничением на прохождение (рис. 5(б)). Красными прямоугольниками помечены потенциально опасные места.

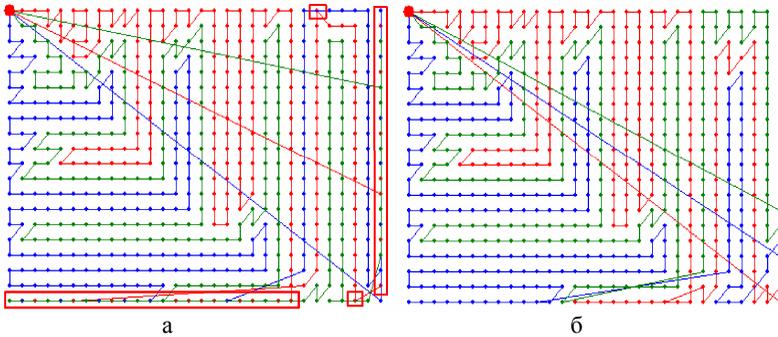


Рис. 5. Траектории БПЛА: а – без ограничения; б – с ограничением на прохождение через реперные точки других БПЛА

Маршрут каждого БПЛА задается в виде функции времени t :

$$\begin{bmatrix} X_{i,\delta} \\ Y_{i,\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i(t_{i,0}, \bar{v}_i, t) \\ y_i(t_{i,0}, \bar{v}_i, t) \end{bmatrix}, \quad (22)$$

где $t_{i,0}$ – момент времени начала движения i -го БПЛА; \bar{v}_i – вектор временных задержек.

Каждый элемент вектора \bar{v}_i определяет, на какой интервал времени i -й БПЛА останавливается в соответствующей реперной точке. Он должен удовлетворять условию:

$$v_{i,k} \geq v_{\min}, i = \overline{1, N}, k = \overline{1, M_i}, \quad (23)$$

где $v_{i,k}$ – время остановки i -го БПЛА в своей k -й реперной точке; v_{min} – время остановки БПЛА в реперной точке, необходимое для того, чтобы сделать снимок.

Метод идентификации столкновений заключается в следующем: если существует два БПЛА B_i и B_j ($i \neq j$), для которых система неравенств (24) имеет хотя бы одно решение, то имеет место столкновение между ними:

$$\begin{cases} |x_i(t_{i,0}, \bar{v}_i, t) - x_j(t_{j,0}, \bar{v}_j, t)| < X_{min}; \\ |y_i(t_{i,0}, \bar{v}_i, t) - y_j(t_{j,0}, \bar{v}_j, t)| < Y_{min}; \end{cases} \quad (24)$$

где X_{min} и Y_{min} – минимальное предельно допустимое расстояние между двумя БПЛА по осям координат X и Y соответственно.

Поиск аналитического решения системы неравенств (24) – трудная задача, поэтому предлагается проверять ее истинность для всех пар БПЛА через фиксированные моменты времени dt . Если в какой-то момент времени система неравенств (24) истинна, то значит имеет место столкновение.

Метод идентификации столкновений позволяет обнаружить столкновение, но не предотвратить его. Поскольку БПЛА в каждой реперной точке делает остановку на некоторый фиксированный интервал времени, то представляется разумным настроить эти интервалы таким образом, чтобы не допустить столкновений между БПЛА. Это реализуется алгоритмом синхронизации.

Алгоритм синхронизации через фиксированные малые промежутки времени dt , просматривает положение всех БПЛА и проверяет разрешимость системы неравенств (24). Если обнаружено столкновение, то из двух сталкивающихся БПЛА выбирается БПЛА, имеющий наименьший расход энергоресурса (14), и корректируется функция (22) выбранного БПЛА. Корректировка состоит в увеличении значения временной задержки на величину dv в его последней перед «столкновением» реперной точке. На рисунке 6 представлена схема разработанного алгоритма синхронизации.

Из расчета, что значение констант X_{min} и Y_{min} равно 30м, вероятность столкновения двух БПЛА составляет менее 0.051%. Для её уменьшения рекомендуется использовать более точные системы управления и увеличивать значения констант X_{min} и Y_{min} .

На рисунке 7 приведена структура системы предполетного квазиоптимального определения маршрутов группы БПЛА на основе разработанных алгоритмов.

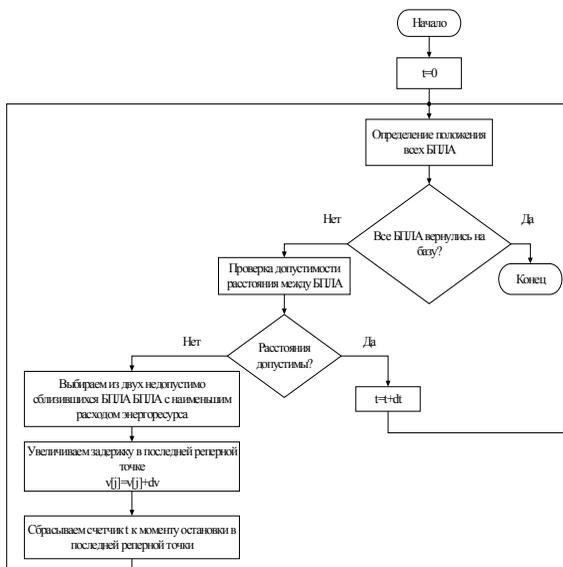


Рис. 6. Алгоритм синхронизации

Четвертая глава посвящена программному моделированию и экспериментальной проверке разработанных алгоритмов. Для проведения программного моделирования была разработана специальная программа, позволяющая устанавливать количество БПЛА в группе и размер территории, информацию о которой необходимо собрать, а также выбирать алгоритм, по которому строятся траектории БПЛА. На рисунке 8 представлена UML диаграмма классов разработанной программы моделирования.

Логика программы моделирования реализована посредством шести основных классов.

- «GUI» реализует интерфейс взаимодействия с пользователем.
 - «Группа БПЛА» описывает группу БПЛА и реализует поведение группы.
 - «БПЛА» описывает отдельный БПЛА в составе группы.
 - «Изображение территории» реализует графическое отображение территории и группы БПЛА на экране.
 - «Территория» представляет территорию в виде множества кадров. Осуществляет пересчет виртуальных координат реперных точек в пиксели на экране.
 - «Кадр» описывает отдельный кадр и реперную точку.
- На рисунке 9 представлено главное окно программы.

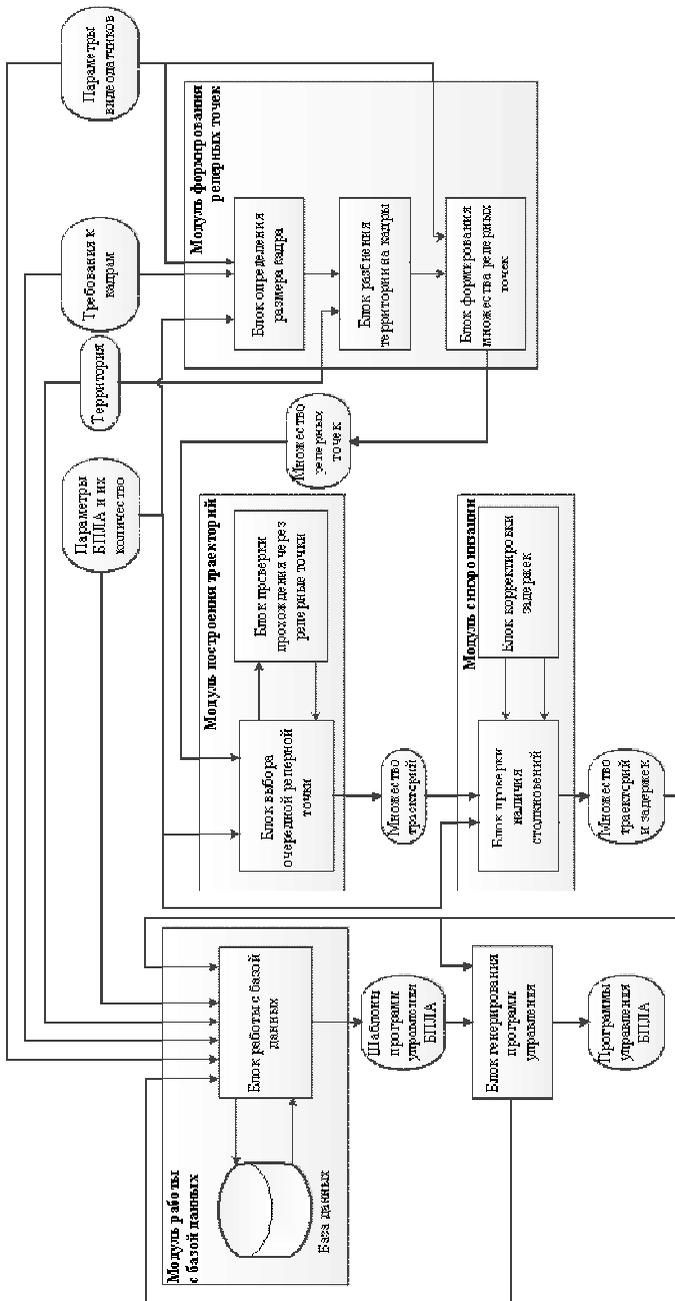


Рис. 7. Структура предоптимального квазиоптимального определения маршрутов группы БППА

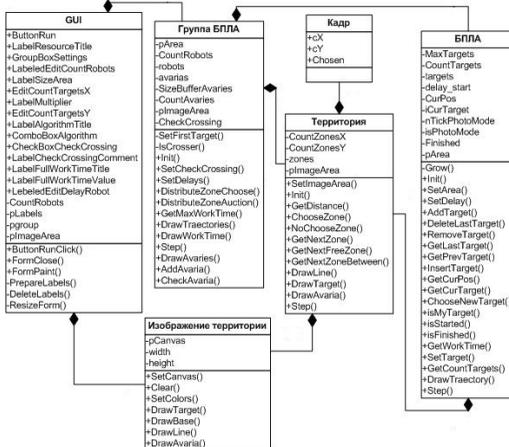


Рис. 8. UML диаграмма классов программы моделирования

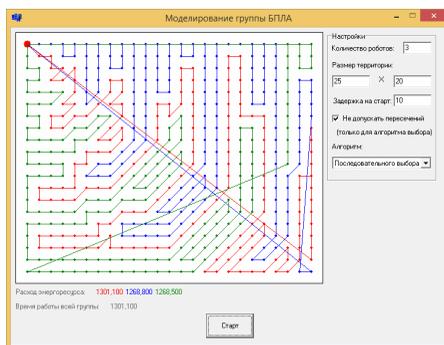


Рис. 9. Главное окно программы моделирования

В данной программе реализованы алгоритмы: наложения прямоугольной сетки; посещения реперных точек на основе классического и модифицированного алгоритмов последовательного выбора; синхронизации движения БПЛА. Также программа отображает столкновения в случае их обнаружения.

Дополнительно была осуществлена экспериментальная проверка разработанных алгоритмов. В эксперименте использовалось два БПЛА и специально разработанная программа «SwarmProtocol», позволяющая в реальном времени отслеживать работу группы БПЛА. На рисунке 10 представлено главное окно программы.

Проведенное моделирование и экспериментальная проверка доказали работоспособность и применимость разработанных алгоритмов.

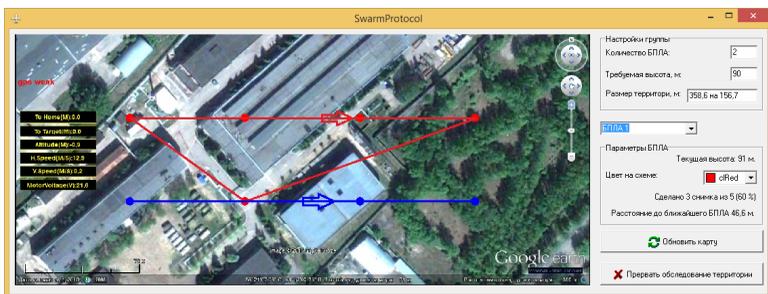


Рис. 10. Интерфейс программы проведения эксперимента

Основные результаты и выводы.

1. Проведенный анализ современных алгоритмов разбиения исходной территории на зоны, показал, что некоторые из них (например, алгоритм Ллойда и Morse Decomposition) могут приводить к формированию недопустимо больших зон. Поэтому в качестве алгоритма разбиения территории на зоны был выбран алгоритм наложения прямоугольной сетки.

2. Разработана математическая модель БПЛА с установленным на его борту видеодатчиком высокого разрешения, позволяющая свести задачу обследования территории к задаче о назначениях с учетом технических характеристик БПЛА и видеодатчика на его борту, а также ограничений, накладываемых на получаемые видеодатчиком кадры.

3. Предложена модификация алгоритма последовательного выбора, позволяющая исключить прохождение по реперным точкам двух или более различных БПЛА при обеспечении минимального времени сбора информации об оперативной обстановке на близлежащей территории.

4. Разработан метод идентификации столкновений БПЛА в воздухе на основе определения расстояния между БПЛА в произвольном моменте времени. Считается, что столкновение имеет место, если два или более БПЛА сближаются на недопустимо малое расстояние.

5. Предложен алгоритм синхронизации движения БПЛА, не допускающий их столкновений. Он устанавливает временные задержки БПЛА в реперных точках таким образом, чтобы не допустить их столкновения. При использовании этого алгоритма, основанного на методе идентификации столкновений, вероятность столкновения не превышает 0.05%. Данная вероятность может быть уменьшена путем использования более точных систем позиционирования и более жестких ограничений в методе идентификации столкновений.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Норсеев, С.А. Алгоритмы исследования неизвестной области с большим числом препятствий / С.А. Норсеев, Д.В. Багаев // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – №2.1(56). – С. 166-168.
2. Норсеев, С.А. Алгоритм распределённого исследования неизвестной местности / С.А. Норсеев, Д.В. Багаев // Автоматизация и современные технологии. – 2014. – № 7. – С. 13-16
3. Норсеев, С.А. Разработка алгоритма распределенного исследования неизвестной местности с помощью группы мобильных роботов / С.А. Норсеев, Д.В. Багаев // Автоматизация процессов управления – 2014. – №2(36). – С. 67-71.
4. Математические зависимости группового управления роботами в условиях неизвестной области / С.А. Норсеев, Д.В. Багаев // Автоматизация и современные технологии – 2014. – №10. – С. 18-22.
5. Принципы группового управления роботами / С.А. Норсеев, Д.В. Багаев // Известия РАН. – 2014. – №4. – С. 30-33.
6. Норсеев, С.А. Алгоритм распределенного покрытия неизвестной территории группой роботов / С.А. Норсеев, Д.В. Багаев, В.А. Соловьев, Д.В. Казанцев // Оборонная техника. – 2015. – №5-6. – С. 86-90.
7. Норсеев, С.А. Метод комплексирования навигационных данных с прогнозированием/ С.И. Филиппов, Д.Ю. Тютюгин, С.А. Норсеев // Оборонная техника. – 2015. – №11-12. – С. 78-82.

В других изданиях:

8. Норсеев, С.А. Задача исследования неизвестной местности и методы её решения с применением многоагентной системы / С.А. Норсеев, Д.В. Багаев // Информационные технологии моделирования и управления. – 2014. – № 2(86). – С. 110-117.
9. Норсеев, С.А. Обзор алгоритмов группового управления робототехническими комплексами / С.А. Норсеев, Д.В. Багаев // Электротехнические системы и комплексы: междунар. сб. науч. трудов / под ред. Г.К. Корнилова, Е.А. Пановой. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2013. – Вып. 21. – С. 137-145
10. Norseev, S.A. Review of group control algorithms / S.A. Norseev, D.V. Bagaev // Proc. of Int. Conference on Robotics and Artificial Intelligence. Problems and perspective. (RAIPAP'13). – Brest, Belarus, 4-6 November 2013. – С. 30-34.

11. Норсеев, С.А. Архитектуры многоагентных систем: сб. статей международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию высшего образования в г. Коврове / С.А. Норсеев, Д.В. Багаев // Современные технологии в системах управления и вооружения. – Ковров: ФГБОУ ВПО «КГТА им. В.А. Дегтярёва». – 2013. – С.81-86.

12. Норсеев, С.А. Обзор алгоритмов группового управления / С.А. Норсеев, Д.В. Багаев // Современные проблемы математики, механики, информатики: сборник тезисов докладов междунар. школы-конф. «Тараповские чтения – 2013» / под ред. Н.Н. Кизиловой, Г.Н. Жолткевича. – Харьков: Изд-во Цифровая типография № 1. – 2013. – С. 134

13. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2014660765. SwarmProtocol / С.А. Норсеев, Д.В. Багаев. – 15.10.2014 г. – М.: Роспатент, 2014.

НОРСЕЕВ Сергей Александрович

**АЛГОРИТМЫ ПРЕДПОЛЕТНОГО
КВАЗИОПТИМАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МАРШРУТОВ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук