

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 623.746.4-519:621.395.64

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).408-421

Поступила в редакцию / Received 05.05.2025

ГРНТИ 49.43.29+49.37.33

Специальность ВАК 2.2.13.

Принята к публикации / Accepted 28.09.2025

Научная статья

АЛГОРИТМ ВЗЛЕТА И РАЗМЕЩЕНИЯ РОЯ БПЛА

Иванов В. С., Грачев. Н. Н., Шеденко В. В.

МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия)

Аннотация. В статье проведен анализ отечественных беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа, используемых в качестве ретрансляторов связи. Представлены достоинства и недостатки каждого решения. Целью работы является оперативное развертывание системы связи в заданной территории путем разработки алгоритма взлета и размещения роя беспилотных летательных аппаратов. Рассмотрены ручной и автоматический режимы управления квадрокоптерами. Описаны датчики, использующиеся при управлении квадрокоптером в автоматическом режиме. Рассмотрена технология роя беспилотных летательных аппаратов, позволяющая покрыть связью большие территории. Разработанный алгоритм взлета и размещения роя беспилотных летательных аппаратов будет применяться при оперативной организации связи на территориях страны, где нет средств радиоэлектронной борьбы. Применение квадрокоптеров в качестве ретрансляторов связи позволяет в кратчайшие сроки развернуть систему связи в ситуациях, в которых установка ретрансляторов на опоры невозможна в силу сложного рельефа местности или не оправдана с экономической точки зрения. Представлены результаты моделирования разработанного для размещения наземных базовых станций программного обеспечения, которое будет адаптировано под размещение беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, квадрокоптеры, рой БПЛА, ретранслятор связи

Для цитирования: Иванов В. С., Грачев Н. Н., Шеденко В. В. Алгоритм взлета и размещения роя БПЛА // Вестник НовГУ. 2025. 3 (141). 408–421. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).408-421

Research Article

ALGORITHM FOR TAKE-OFF AND DEPLOYMENT OF A UAV SWARM

Ivanov V. S., Grachev N. N., Shedenko V. V.

MIREA – Russian technological university (Moscow, Russia)

Abstract. The article presents an analysis of domestic multirotor-type unmanned aerial vehicles used as communication relays. The advantages and disadvantages of each solution are described. The purpose of our work is to explore the rapid deployment of a communication system in a designated area by developing an algorithm for the takeoff and deployment of a UAV swarm. Both manual and automatic modes of quadcopter control are considered. We not only described the sensors used in automatic quadcopter control, but also examined UAV swarm technology, which makes it possible to provide communication coverage over large areas. The developed algorithm for the takeoff and deployment of a UAV swarm will be applied for the rapid organization of communications in regions of the country where electronic warfare systems are absent. The use of quadcopters as communication relays enables the swift deployment of communication systems in situations where installing relay equipment on fixed supports is impossible due to difficult terrain or unjustified from an economic standpoint. The results of software simulation developed for the deployment of ground base stations, which will be adapted for UAV deployment, are presented.

Keywords: unmanned aerial vehicles, quadrocopters, a swarm of UAVs, a communications repeater

For citation: Ivanov V. S., Grachev N. N., Shedenko V. V. Algorithm of take-off deployment of a UAV swarm // Vestnik NovSU. 2025. 3 (141). 408–421. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.3(141).408-421

Введение

Идея использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в качестве альтернативы наземным базовым станциям и ретрансляторам не является новой. Разные страны на протяжении последних 10 лет ведут работы в этом направлении, проектируются новые БПЛА, разрабатываются алгоритмы взаимодействия между ними, адаптируются под задачу размещения БПЛА в воздухе известные алгоритмы (муравьиный, пчелиный, жадный и т.д.). Конечно, полностью заменить наземные станции не получится в силу ограниченного времени нахождения БПЛА в воздухе, но с их помощью появляется возможность оперативного развертывания системы связи в требуемых местах, будь то зона чрезвычайной ситуации или проведение исследовательских работ. В данной статье рассматриваются именно квадракоптеры, которые могут зависать в определенной точке на некоторое время.

Сравнение отечественных образцов

Рассмотрим подробнее известные на данный момент отечественные решения.

1. Опытный образец дрона-ретранслятора «Настасья», разработанный «Обуховским заводом», впервые представлен на Национальной выставке и форуме инфраструктуры гражданской авиации NAIS-2024. Дрон имеет возможность вертикального взлета и посадки, как квадракоптер, но при этом оснащен самолетным крылом для повышения скорости и дальности полета. БПЛА выполняет роль ретранслятора между оператором и ударным или разведывательным дроном. «Настасья» (рисунок 1) отличается высокой скоростью полета, достигающей 100 км/ч, и большим радиусом действия – до 100 км. Безусловно, данный дрон не является именно квадракоптером, но за счет наличия вертикального взлета и посадки, представлен в данном обзоре [1].



Рисунок 1. Дрон-ретранслятор «Настасья»

2. В конце 2023 г. специалистами Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН (СПб ФИЦ РАН) разработан специализированный БПЛА «Ворон» (рисунок 2), предназначенный для расширения зоны беспроводной связи, не охваченной другими видами связи. Для удобного управления квадракоптером создан специальный шлем, на который выводится картинка с камеры и джойстика. Вместе с полезной нагрузкой до 2 кг «Ворон» может находиться в воздухе до 30 минут [2].



Рисунок 2. Квадракоптер «Ворон»

3. Беспилотный многофункциональный летательный аппарат вертикального взлета и посадки «Гранад ВА-1000» от компании «ЮВС Авиа» (рисунок 3). Данный БПЛА предназначен для решения широкого спектра задач: мониторинг закрепленных территорий, поисково-спасательные операции, ретрансляция сигналов. Также существует привязной вариант данного БПЛА «Гранад ВА-1000ПП», который использует кабель для передачи электропитания. «Гранад ВА-1000» отличается продолжительным временем полета – до 90 минут при весе полезной нагрузки – до 2,5 кг [3].



Рисунок 3. Квадракоптер «Гранад ВА-1000»

4. Квадрокоптер «Бласкор» компании «Беспилотные летательные аппараты» (рисунок 4) предназначен для визуального наблюдения за объектами с воздуха. При этом спектр его применения ограничен только максимальной полезной нагрузкой – 2 кг при максимальном времени полета – 30 минут. Управление аппаратом осуществляется с помощью стационарной, передвижной или носимой станции управления [4].



Рисунок 4. Квадрокоптер «Бласкор»

5. Мультикоптер «Нелк» (рисунок 5) предназначен для воздушной разведки местности, ретрансляции радиосигналов, доставки и сброса малогабаритных грузов. Управление полетом беспилотного воздушного судна (БВС) осуществляется с наземного пункта управления (НПУ) оператором в автоматическом или полуавтоматическом режиме с возможностью корректировки параметров полета и режимов работы целевых нагрузок. Максимальное время полета при весе полезной нагрузки 3 кг составляет 40 минут [5].



Рисунок 5. Мультикоптер «Нелк»

В таблице 1 представлены характеристики рассмотренных БПЛА. Из приведенных данных видно, что максимальное время нахождения в воздухе

с полезной нагрузкой не превышает 90 минут, а максимальная масса полезной нагрузки составляет 3 кг. Указанные параметры наиболее сильно влияют на решение задачи оперативного покрытия заданной территории связью. Если время, в течение которого необходимо обеспечить связь, превышает указанные значения, то БПЛА отправляется в базовую точку с целью смены аккумулятора, при этом оставляя без связи определенную территорию. Прежде чем перейти к алгоритму взлета и нахождения роя БПЛА в воздухе, рассмотрим подробнее способы управления квадрокоптерами.

Таблица 1. Характеристики отечественных квадрокоптеров-ретрансляторов

Наименование	Радиус действия, км	Максимальная полезная нагрузка, кг	Максимальная скорость, км/ч	Время полета, мин
Настасья	100	3	100	Нет информации
Ворон		2		30
Гранад ВА-1000	15	2,5	54	90
Бласкор	5	2	45	30
Нелк	5	3	50	40

Способы управления роем БПЛА

Использование одного квадрокоптера для ретрансляции сигналов позволяет покрыть связью определенную территорию, не превышающую 50 км, в зависимости от типов окружающей местности, высоты полета, характеристики приемопередающего оборудования. Для покрытия связью больших территорий целесообразно применять несколько коптеров, объединенных в рой. Рой квадрокоптеров предполагает интеграцию БПЛА с полезной нагрузкой для решения различных задач [6].

В квадрокоптере установлено большое количество датчиков, которые не позволяют ему сваливаться на землю и достигать заданных пилотом точек, среди которых:

- гироскопы и акселерометры, предназначенные для регистрации положения устройства в пространстве. Они отслеживают наклон и ускорение БПЛА;
- GPS-модуль, передающий точное местоположение коптера;
- камеры и датчики расстояния, предназначенные для распознавания и огибания препятствий;
- барометр и ультразвуковые сенсоры, контролирующие высоту и стабилизирующие полет.

Управление БПЛА осуществляется оператором в ручном режиме или режиме автопилот. При ручном управлении оператор управляет квадрокоптером напрямую. GPS, данные с компьютерного зрения и барометр не используются. Для полетов в этом режиме необходимы хорошие навыки пилотирования коптеров.

В режиме автопилота показатели со всех датчиков анализируются и передаются команды двигателям. Простой пример: во время зависания коптера на месте сбоку подул ветер. Автопилот меняет обороты пропеллеров, чтобы коптер находился на месте. Данный режим облегчает работу оператора и, например, позволяет не контролировать наклон коптера, анализируя направление ветра. При этом работа оператора ничуть не обесценивается, так как во время полета может сломаться какой-то датчик, и тогда автопилот не сможет корректно справляться со своими задачами.

В режиме автопилот коптер выполняет заранее загруженную в квадрокоптер миссию, которая загружается через специальные приложения, например, QGroundControl, MAVROS. Квадрокоптер будет следовать по заранее запрограммированному сценарию, хранящемуся в памяти автопилота (рисунок 6).

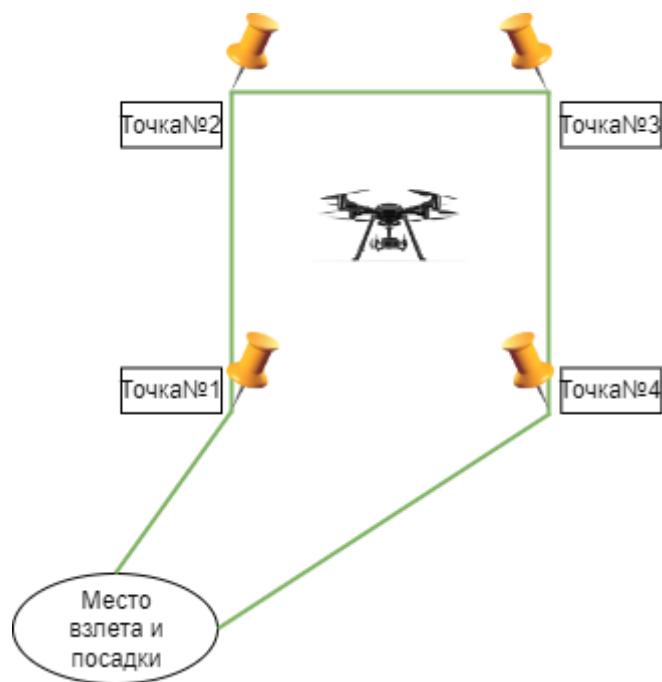


Рисунок 6. Режим полета квадракоптера «по точкам»

У каждого производителя есть определенные режимы работы для своих моделей. Например, у мультикоптера «Нелк» существуют следующие режимы работы:

1. Автоматический – оператор задает полетную программу на наземной станции управления (ноутбуке); без пульта управления в автоматическом режиме от взлета до посадки осуществляется полет по заданному маршруту различной конфигурации с учетом рельефа местности.
2. Полуавтоматический (директорный) – оператор имеет возможность изменять высоту, скорость, направление полета БВС пультом ручного управления; стабилизация БВС осуществляется автоматически.

3. Управление одной кнопкой – оператор вводит полетную программу непосредственно в бортовую систему БВС при выключенном наземном пункте управления. Полет БВС выполняется при полном радиомолчании.

4. Следование за радиомаяком – выполняется автоматический полет БВС на заданном оператором удалении и высоте от объекта, на которой установлен радиомаяк.

Технология роя – это один из самых впечатляющих аспектов современного развития коптеров. Каждый коптер, работающий в рое, отслеживает положение соседей и корректирует свое поведение, чтобы вся группа двигалась синхронно и эффективно. Это называется децентрализованное управление, когда нет одного лидера, а все участники принимают решения исходя из поведения друг друга. Существуют также и другие варианты управления, например централизованное или сеть Adhoc [7]. Управление роем дронов – это технически сложная задача. Координация множества дронов требует мощных алгоритмов, которые способны учитывать множество переменных: скорость ветра, препятствия, возможность потери связи [8]. Использование нескольких квадракоптеров позволяет обеспечить связью большую территорию (рисунок 7). При этом БПЛА необходимо заменять, так как ресурс батареи ограничен. Разработка алгоритма запуска и взаимозаменяемости БПЛА является актуальной задачей.

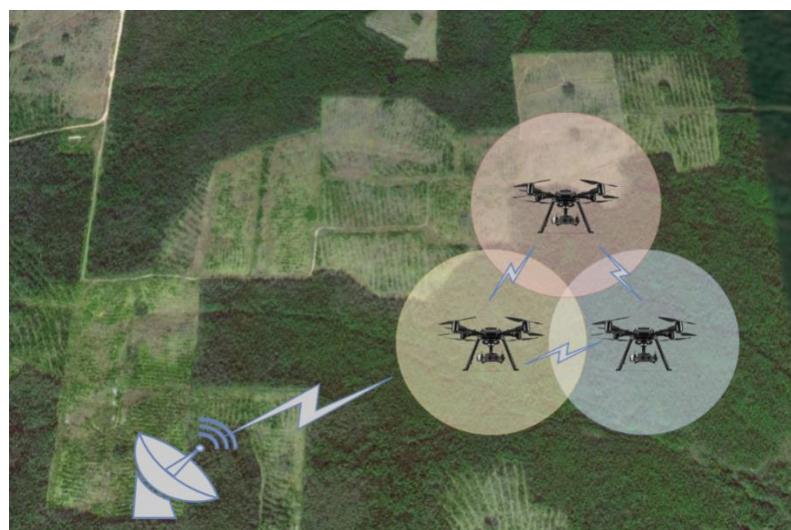


Рисунок 7. Покрытие связью роем БПЛА заданной территории

Рассчитать зоны покрытия связью БПЛА можно, используя статистические модели расчета зон покрытия, среди которых выделим следующие.

1) Модель Лонгли-Райса, созданная в 1960-х годах, которая позволяет спрогнозировать ослабление радиосигналов для телекоммуникационной линии связи в диапазоне частот от 40МГц до 100ГГц. Данная модель больше всего подходит для расчетов зоны покрытия на территориях со сложным рельефом

и плотной городской застройкой. В общем случае мощность полезного сигнала на приемной стороне можно представить в виде следующего выражения [9]:

$$Prx = Ptx - \eta_{tx} + Gtx - A_0 - \eta_{rx} + Grx. \quad (1)$$

2) Модель Окумура-Хата, которая основана на значительных эмпирических измерениях распространения радиосигнала в городских условиях. Стандартная формула для средних потерь на трассе в городской среде в соответствии с моделью Хата имеет вид [10]:

$$L = 69,55 + 26,16 \log_{10} (f_c) - 13,82 \log_{10} (h_r) - C_H + (44,9 - 6,65 * \log_{10} (h_t) \log_{10} (d)). \quad (2)$$

3) Модель COST231-Хата, которая является расширенной версией модели Окумура-Хата. Данная модель учитывает эффективную высоту подвеса антенн БС и ПС, применяется в более высоком диапазоне частот от 1500 до 2000МГц [11]:

$$L = 46,3 + 33,9 \log_{10} (f_c) - 13,82 \log_{10} (h_{\text{эбс}}) - a(h_{\text{пс}}) + (44,9 - 6,65 * \log_{10} (h_{\text{эбс}}) \log_{10} (r) + C). \quad (3)$$

4) Модель Уолфиша-Икегами подходит для расчетов в городской среде. Потери на стороне получателя, вызванные рассеиванием радиосигнала при отражении от поверхности «конечной» улицы, на которой находится приемник [12]:

$$L_{\text{rts}} = -16,9 - 10 \log_{10} (w) + 10 \log_{10} (f) + 20 \log_{10} (\Delta h m) + L_{\text{0ri}}. \quad (4)$$

Существуют также детерминированные методы, которые учитывают факторы, влияющие на препятствия на пути распространения электромагнитных волн от мобильных до базовых станций расчета зон покрытия БС, среди которых:

– рекомендация МСЭ-R Р.1812-4 «Метод прогнозирования распространения сигнала на конкретной трассе для наземных служб из пункта в зону в диапазонах УВЧ и ОВЧ». Потери за счет дифракции вычисляются путем сочетания метода, основанного на конструкции Буллингтона, и метода расчета дифракции над сферической Землей [13].

Основные потери передачи (дБ), которые не превышаются в течение $p\%$ времени и в $L\%$ местоположений, определяются выражением:

$$L_b = \max [L_{b0p}, L_{bc} + L_{loc} - I(\frac{p_l}{100})\sigma_{loc}], [\text{дБ}]. \quad (5)$$

Напряженность поля E_p дБ(мкВ/м), приведенная к эффективной излучаемой мощности 1 кВт, превышаемая в течение $p\%$ времени и в 50% местоположений, может быть рассчитана с использованием формулы:

$$E = 199,36 + 20 \log_{10} f - L_b, [\text{дБ(мкВ/м)}]. \quad (6)$$

– расчет зон покрытия на основе детерминированной модели напряженности поля сигнала. Дифракционные потери, вызванные одним препятствием, могут быть рассчитаны по формуле [14]:

$$a(m) = 6,4 + 20 \log_{10} (\sqrt{v^2 + 1} + v); [\text{дБм}], \quad (7)$$

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)}. \quad (8)$$

Напряженность поля в точке приема рассчитывается по формуле:

$$E = E_{\text{сн}} - a m_1 - a m_2; \quad (9)$$

где $E_{\text{сн}}$ – напряженность поля свободного пространства; $a m_1$ – дифракционные потери первого препятствия; $a m_2$ – дифракционные потери первого препятствия.

Алгоритм взлета и размещения роя БПЛА

Данный алгоритм (рисунок 8) направлен на квадракоптеры, которые управляются операторами. В дальнейшем алгоритм будет адаптирован под режим автоматического управления коптерами. На первом этапе требуется задать полетное задания для каждого квадракоптера, указать координаты мест размещения, высоту и длительность нахождения. Затем запустить все БПЛА в указанные места. Если какой-то коптер не взлетел из-за неизвестной неисправности, то в течение 5 минут необходимо решить данную ошибку, либо заменить коптер на новый. Значение времени, затраченного на диагностику и исправление ошибки, задано как время, не превышающее 20% от максимального времени нахождения коптеров (в среднем 30 минут). Если все БПЛА смогли взлететь, но по каким-то причинам некоторые не смогли долететь до заданных точек, то неисправные коптеры возвращаются на базу и заменяются на новые.

После прибытия всех коптеров в заданные точки требуемая территория покрывается связью. Важным этапом является организация бесперебойного покрытия, в связи с чем необходимо в кратчайшие сроки организовать взаимозаменяемость беспилотников. На данном этапе логичным выглядит запуск заменяющего коптера заранее, в момент, когда у заменяемого осталось 20% заряда аккумулятора. Заменяющий коптер размещается в точке с заданными координатами,

но выше заменяемого по высоте. После того, как заменяемый коптер отправляется на базу, на его место встает заменяющий коптер. При этом успешным будет считаться результат, когда связь на определенном участке заданной территории отсутствовала менее 1 минуты.

На заключительном этапе достигается задача покрытия заданной территории связью в течение требуемого времени и рой БПЛА отправляется на базу.

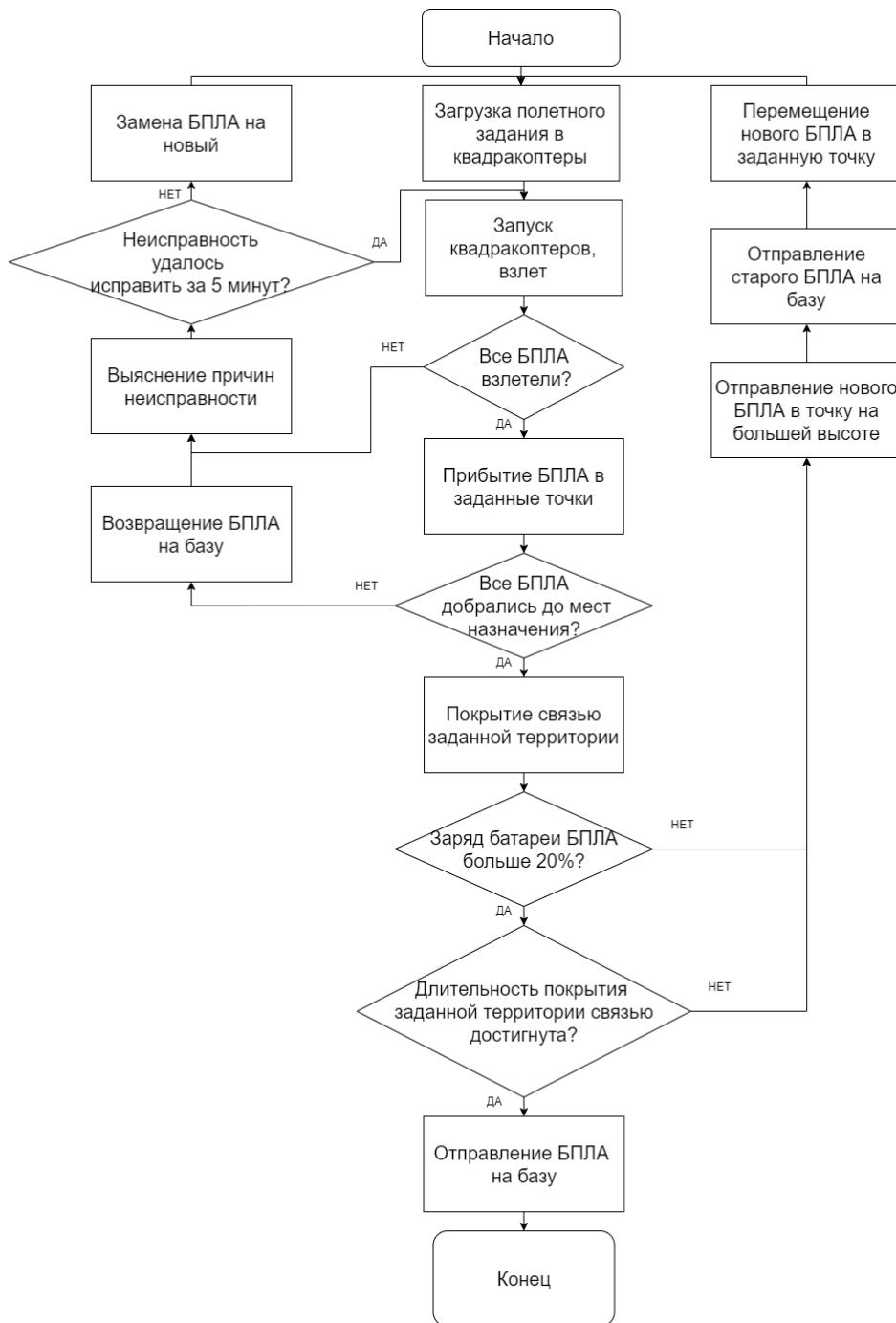


Рисунок 8. Алгоритм взлета и размещения роя БПЛА

Важным условием является то, что заданную территорию необходимо покрыть связью, используя минимальное количество квадрокоптеров. Для этого будет адаптирован и модернизирован алгоритм размещения на основе известных, например, генетического алгоритма. Также необходимо предоставить пользователю программное обеспечение, в котором он сможет ввести технические характеристики приемопередающего оборудования и получить координаты мест размещения квадрокоптеров (рисунок 9). Решая в диссертационном исследовании задачу размещения базовых станций транкинговых систем связи, одним из авторов было разработано программное обеспечение, которое при небольшой доработке будет адаптировано под размещения роя БПЛА. В данном ПО пользователь имеет возможность указать следующие параметры:

- территорию, которую необходимо обеспечить связью;
- мощность передатчиков базовой и портативной (абонентской) станций (дБм);
- чувствительность приемников базовой и портативной (абонентской) станций (мкВ);
- высоту подвеса антenn базовой и портативной (абонентской) станций (м);
- количество абонентов сети (чел);
- частотный ресурс;
- коэффициент усиления антenn базовой и портативной (абонентской) станций;
- затухания в фидере.

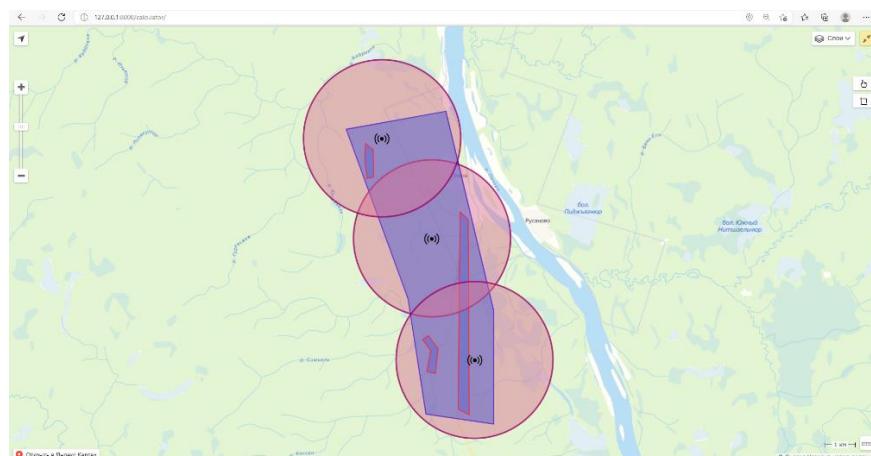


Рисунок 9. Скриншот из разработанного программного обеспечения

Результатом моделирования являются координаты мест размещения базовых станций. Зоны покрытия рассчитываются по модифицированной модели COST231-Хата и имеют разного размера формы (радиусы) [15].

Заключение

Безусловно, наземные базовые станции, стационарные ретрансляторы не утратили и не утратят в будущем своей популярности. Важно разрабатывать альтернативные способы установки приемопередающего оборудования, т. к. не всегда возможно установить вышки. В случаях, когда связь необходимо организовать на непродолжительный период времени, установка вышки является нецелесообразным и дорогим решением. Стоимость установки мачты высотой 40 м варьируется от 3–4 млн рублей, нужно также учесть время, затраченное на установку мачты. Решение с квадракоптером позволяет сэкономить время и деньги, используя БПЛА в различных местах, требующих организации связи.

Применение квадрокоптеров в качестве носителей приемопередающего оборудования является хорошим вариантом, позволяющим покрыть связью большие территории из-за возможности взлета на разные высоты. При данном способе организации связи есть свои ограничения по максимальной полезной нагрузке квадрокоптера, максимальном времени нахождения в воздухе и, конечно, стоимости БПЛА. Если говорить про организацию связи в приграничных территориях либо в территориях проведения военных операций, то серьезным ограничением являются комплексы радиоэлектронной борьбы. Данный вопрос требует отдельной проработки.

Список литературы

1. «Алмаз-Антей» разработал дрон для ретрансляции сигнала // РИА Новости: сайт. 2024, 6 февраля. URL: <https://ria.ru/20240206/dron-1925621328.html?ysclid=m85gq7cu0919202502> (Дата обращения: 02.03.2025).
2. Исследователи СПб ФИЦ РАН разработали дрон, позволяющий оперативно расширить территорию покрытия беспроводной связью // СПб ФИЦ РАН: сайт. 2023, 11 июля. URL: https://spcras.ru/news/detail_news.php?ID_NEWS=650116 (Дата обращения: 02.03.2025).
3. Гранада BA-1000 // Drone-catalog: сайт. URL: <https://drone-catalog.ru/product/%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%B4-%D0%B2%D0%B0-1000/?ysclid=m85hs5e9vn828937895> (Дата обращения: 02.03.2025).
4. Drone-catalog: Бласкор. URL: <https://drone-catalog.ru/product/%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%81%D0%BA%D0%BE%D1%80/?ysclid=m85i5odpjv852330049> (Дата обращения: 02.03.2025).
5. НЕЛК: нестандартная электроника: официальный сайт. URL: https://nelk.ru/catalog/robototekhnicheskie_sistemy/bespilotnye_aviatsionnye_sistemy/nelk_v6_m1/?ysclid=m85n42gdq3920288803 (Дата обращения: 02.03.2025).
6. Как дроны роя в Китае общаются друг с другом? URL: <https://www.iwavecomms.com/ru/news/how-do-china-swarming-drones-communicate-with-each-other/> (Дата обращения: 04.03.2025).
7. Довгаль В. А. Интеграция сетей и вычислений для построения системы управления роем дронов как сетевой системы управления // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4. Естественно-математические и технические науки. 2022. 1 (296). 62–76. DOI: 10.53598/2410-3225-2022-1-296-62-76

8. Как работает «мозг» дрона? Алгоритм управления // LIVE: сайт. 2024, 26 ноября. URL: <https://www.ixbt.com/live/drones/kak-rabotaet-mozg-drona-algoritm-upravleniya.html?ysclid=m8h32q4a4i859191366> (Дата обращения: 04.03.2025).

9. Perez-Fontan F., Hernando-Rabanos J. M. Comparison of irregular terrain propagation models for use in digital terrain data based radiocommunication system planning tools // IEEE Transactions on Broadcasting. 1995. 41 (2). 63–68. DOI: 10.1109/11.392833

10. Дворников С. В., Балыков А. А., Котов А. А. Упрощенная модель расчета потерь сигнала в радиолинии, полученная путем сравнения квадратичной формулы Введенского с существующими эмпирическими моделями // Системы управления, связи и безопасности. 2019. 2. 87–99. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10204

11. Кисель Н. Н. Моделирование распространения радиоволн в пакете Wireless InSite: учебное пособие. Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2018. 107 с.

12. Владимиров С. С. Беспроводные системы передачи данных. Расчет потерь на трассе радиоканала: практикум. Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2020. 32 с.

13. Метод прогнозирования распространения сигнала на конкретной трассе для наземных служб «из пункта в зону» в диапазонах УВЧ и ОВЧ: рекомендация МСЭ-R P.1812-4. Женева: Международный союз электросвязи, 2015. 34 с.

14. Бабков В. Ю., Вознюк М. А., Михайлов П. А. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. 2-е изд., испр. Москва: Горячая линия–Телеком, 2007. 224 с.

15. Иванов В. С., Увайсов С. У., Иванов И. А. Алгоритм автоматического размещения базовых станций транкинговых систем связи // Труды учебных заведений связи. 2023. 9 (5). 25–34. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-5-25-34

References

1. RIA Novosti: Almaz-Antey has developed a drone for signal relay. URL: <https://ria.ru/20240206/dron-1925621328.html?ysclid=m85gq7cu0919202502> (Accessed: 02.03.2025). (In Russian).
2. St. Petersburg FIT RAS: Researchers at St. Petersburg FIT RAS have developed a drone that allows for rapid expansion of the wireless coverage area. URL: https://spcras.ru/news/detail_news.php?ID_NEWS=650116 (Accessed: 02.03.2025). (In Russian).
3. Drone-catalog: Granada VA-1000. URL: <https://drone-catalog.ru/product/%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%B4-%D0%B2%D0%B0-1000/?ysclid=m85hs5e9vn828937895> (Accessed: 02.03.2025). (In Russian).
4. Drone-catalog: Blascor. URL: <https://drone-catalog.ru/product/%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%81%D0%BA%D0%BE%D1%80/?ysclid=m85i5odpjv852330049> (Accessed: 02.03.2025). (In Russian).
5. NELK: unusual electronics official website. URL: https://nelk.ru/catalog/robototekhnicheskie_sistemy/bespilotnye_aviatsionnye_sistemy/nelk_v6_m1/?ysclid=m85n42gdq3920288803 (Accessed: 02.03.2025). (In Russian).
6. How do swarm drones in China communicate with each other? URL: <https://www.iwavecomms.com/ru/news/how-do-china-swarming-drones-communicate-with-each-other/> (Accessed: 04.03.2025). (In Russian).
7. Dovgal V. A. Integration of networks and computing to build a drone swarm management system as a network management system // The Bulletin of the Adyge

State University, the series "Natural-Mathematical and Technical Sciences". 2022. 1 (296). 62–76. DOI: 10.53598/2410-3225-2022-1-296-62-76 (In Russian).

8. How does the drone's "brain" work? The control algorithm. URL: <https://www.ixbt.com/live/drones/kak-rabotaet-mozg-drona-algoritm-upravleniya.html?ysclid=m8h32q4a4i859191366> (Accessed: 04.03.2025). (In Russian).

9. Perez-Fontan F., Hernando-Rabanos J. M. Comparison of irregular terrain propagation models for use in digital terrain data based radiocommunication system planning tools // IEEE Transactions on Broadcasting. 1995. 41 (2). 63–68. DOI: 10.1109/11.392833

10. Dvornikov S. V., Balykov A. A., Kotov A. A. The simplified model for radio signal path loss computation, which was developed by comparing the Vvedensky quadratic equation with existing empirical models // Systems of control, communication and security. 2019. 2. 87–99. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10204 (In Russian).

11. Kisel N. N. Modeling of radio wave propagation in the Wireless InSite package: a textbook. Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Publ., 2018. 107 p. (In Russian).

12. Vladimirov S. S. Wireless data transmission systems. Calculation of losses on the radio channel route: a practical guide. St. Petersburg: SPbSUT Publ., 2020. 32 p.

13. Recommendation ITU-R P.1812-4. A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the UHF and VHF bands. Geneve: ITU Publ., 2015. 34 p.

14. Babkov V. Yu., Voznyuk M. A., Mikhailov P. A. Mobile communication networks. Frequency-territorial planning. 2nd ed., revised. Moscow: Hotline–Telecom Publ., 2007. 224 p. (In Russian).

15. Ivanov V. S., Uvajsov S. U., Ivanov I. A. Automatic placement algorithm of base stations trunking communication systems // Proceedings of telecommunication universities. 2023. 9 (5). 25–34. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-5-25-34 (In Russian).

Информация об авторах

Иванов Вячеслав Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-9827-1690, ivanov_vs@mirea.ru

Грачев Николай Николаевич – кандидат технических наук, профессор, МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0547-0899, grachev_n@mirea.ru

Шеденко Владимир Вячеславович – студент, МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0009-0007-2833-6277, shedenkovv@mail.ru