



## Оптимизация размещения беспилотных летательных аппаратов для покрытия территории в транкинговых системах связи

В. С. Иванов<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0001-9827-1690](https://orcid.org/0000-0001-9827-1690), [ivanovmirea1@yandex.ru](mailto:ivanovmirea1@yandex.ru)  
<sup>а</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Вернадского пр., 78, Москва, 119454, РФ

**Введение:** значимость размещения БПЛА для беспроводного покрытия территории возрастает в условиях сложного рельефа, влияющего на распространение сигнала. **Цель:** разработать и провести сравнительный анализ методов минимизации числа БПЛА, гарантирующих покрытие дискретной области с учетом рельефа, на основе комбинирования жадных эвристик и стратегии декомпозиции пространства. **Результаты:** для каждой клетки сетки высот предварительно вычислен максимальный радиус действия БПЛА по модели Окумуры – Хата. Предложены три жадных алгоритма, отличиями которых являются критерии выбора позиции: максимизация числа покрытых клеток внутри области с минимизацией внешнего покрытия; приоритетная минимизация внешнего покрытия; максимизация радиуса без учета границ. На их основе реализованы три варианта декомпозиции рабочей зоны: вертикальное, горизонтальное и квадрантное разбиение с перекрытием, – при которых каждая подобласть обрабатывается независимо с последующим объединением решений. Эксперименты на случайных картах высот 20 × 20 показали, что базовый алгоритм с приоритетом покрытия внутренних клеток использует в среднем 42 БПЛА и создает 85,2 внешней точки. Алгоритм, минимизирующий внешнюю площадь, снижает ее до 70,5, но требует 56 БПЛА. Максимизация радиуса дает 42 БПЛА при наибольшем внешнем покрытии (94,4). Квадрантное разбиение показало 42 БПЛА и 82,7 внешней точки, что на 2,5 точки меньше базового при сохранении числа аппаратов. Вертикальное разбиение снизило число БПЛА до 41, но не улучшило внешнюю площадь, горизонтальное оказалось наименее эффективным. **Практическая значимость:** декомпозиция области с перекрытием и выбор оптимальной стратегии для каждой подобласти повышают качество размещения. Квадрантное разбиение демонстрирует лучший компромисс между числом БПЛА и нежелательным излучением, а также наименьший разброс показателей. Предложенные методы могут служить основой для формирования начальных популяций в генетических алгоритмах в целях поиска глобально оптимальных конфигураций сетей на базе БПЛА.

**Ключевые слова** – БПЛА, эвристические алгоритмы, беспроводная связь, транкинговые системы связи, оптимизация размещения, воздушная базовая станция, генетический алгоритм.

**Для цитирования:** Иванов В. С. Оптимизация размещения беспилотных летательных аппаратов для покрытия территории в транкинговых системах связи. *Информационно-управляющие системы*, 2026, № 3, с. 63–74. doi:10.31799/1684-8853-2026-3-63-74, EDN: WJHXOQ

**For citation:** Ivanov V. S. Optimization of the placement of unmanned aerial vehicles to cover the territory in trunking communication systems. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2026, no. 3, pp. 63–74 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2026-3-63-74, EDN: WJHXOQ

### Введение

Стремительное развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) открыло новые горизонты в области беспроводной связи. Благодаря своей мобильности, гибкости развертывания и возможности обеспечения каналов с высокой вероятностью прямой видимости БПЛА рассматриваются как перспективное решение для временного или постоянного усиления инфраструктуры наземных сетей [1]. Одной из центральных задач при проектировании сетей на базе БПЛА является определение минимального количества летательных аппаратов и их оптимального пространственного расположения, обеспечивающих гарантированное покрытие заданной территории с учетом рельефа местности и требований к качеству сигнала.

Проведено исследование зарубежных работ, посвященных применению БПЛА в качестве носителя приемопередающего оборудования, а также

обзорных работ с анализом технологий беспроводной связи. Работы [2–4] посвящены всестороннему изучению использования БПЛА для создания и улучшения беспроводных сетей, исследуется оптимизация развертывания БПЛА с помощью генетического алгоритма. Подробно рассмотрены три ключевых аспекта: применение БПЛА, существующие проблемы и направления будущих исследований. Описаны основные сценарии применения БПЛА в сетях, такие как расширение покрытия сети в труднодоступных или временных местах; обеспечение связи в чрезвычайных ситуациях (после стихийных бедствий); сбор данных с устройств интернета вещей; улучшение производительности наземных сотовых сетей за счет оптимального размещения. Проанализированы технические трудности, включая моделирование и оптимизацию каналов связи с учетом трехмерной мобильности БПЛА; проблемы энергоэффективности и ограниченного времени полета; вопросы безопасности и конфиденциальности

при функционировании беспилотников; необходимость эффективно управлять помехами как от БПЛА, так и для них. Обозначены направления для будущих исследований: разработка алгоритмов для автономной и совместной работы группы БПЛА; интеграция БПЛА в сотовые сети 5G и далее; создание экономически эффективных и надежных архитектур сетей с участием БПЛА.

Работы [5, 6] представляют собой обзорный анализ технологий беспроводной связи, применяемых в сфере общественной безопасности. Основное внимание уделяется системам связи, которые используются экстренными службами (полицией, пожарными, скорой помощью) для координации действий и обмена информацией в кризисных ситуациях, включая стихийные бедствия и техногенные катастрофы. В рамках исследований авторы рассматривают эволюцию технологий — от традиционных профессиональных мобильных радиосистем, таких как TETRA и P25, до современных широкополосных решений на базе стандартов LTE и Wi-Fi. Подробно анализируются ключевые требования, предъявляемые к сетям общественной безопасности: надежность, отказоустойчивость, приоритезация трафика, защищенная передача данных и возможность взаимодействия между разными службами и даже странами. Особое место занимает анализ проблем. Среди них выделяются: фрагментация спектра и отсутствие единых глобальных стандартов; сложность обеспечения совместимости унаследованных систем с новыми технологиями; недостаточная пропускная способность сетей для передачи видео высокого качества с места событий.

Статьи [7–9] посвящены анализу возможностей и проблем, связанных с использованием БПЛА в системах беспроводной связи. Работы фокусируются на принципиально новой роли БПЛА не как пассивных объектов наблюдения, а как активных элементов сети — воздушных базовых станций или ретрансляторов. Авторы подробно рассматривают ключевые преимущества, которые открывает применение БПЛА. Главным из них является высокая вероятность наличия канала прямой видимости между БПЛА и наземными пользователями благодаря возможности оптимального трехмерного размещения. Это позволяет значительно улучшить качество связи и увеличить зону покрытия по сравнению с наземными вышками, особенно в сложных условиях городской застройки или труднодоступной местности. Кроме того, подчеркиваются мобильность и гибкость БПЛА, позволяющие разворачивать сеть по требованию, например для временного усиления покрытия на массовых мероприятиях или для восстановления связи в зонах бедствий.

Работы [10, 11] посвящены решению задачи оптимального трехмерного размещения базовых станций на БПЛА в сотовых сетях. Основная цель исследований — разработка метода, позволяющего определить минимально необходимое количество и оптимальное положение БПЛА в пространстве для обслуживания всех пользователей в заданной области с учетом их неравномерного распределения. Авторы предлагают подход, использующий эвристический алгоритм (в частности, алгоритм роя частиц), который позволяет эффективно находить позиции БПЛА в трех измерениях. Ключевая задача заключается в том, чтобы, варьируя не только координаты в горизонтальной плоскости, но и высоту размещения БПЛА, обеспечить требуемое качество обслуживания для всех абонентов при минимальном количестве задействованных летательных аппаратов. Результаты моделирования показывают, что оптимальная высота размещения БПЛА напрямую зависит от плотности абонентов. В областях с низкой плотностью БПЛА могут работать на большей высоте, обеспечивая широкую зону покрытия и минимизируя взаимные помехи. В зонах с высокой концентрацией пользователей для обеспечения необходимой пропускной способности требуется снижение высоты, что позволяет эффективнее использовать частотный ресурс за счет пространственного разделения.

Настоящая работа посвящена разработке и сравнительному анализу жадных алгоритмов и методов декомпозиции для минимизации числа БПЛА, необходимых для полного покрытия рабочей области, представленной дискретной сеткой высот. В отличие от известных подходов, в данной статье зона действия каждого БПЛА не определяется фиксированным радиусом, а рассчитывается индивидуально для каждой потенциальной точки базирования на основе эмпирической модели Окумуры — Хата, адаптированной для учета разности высот и условий прямой видимости [12, 13]. Такой подход позволяет более реалистично моделировать распространение сигнала в условиях пересеченной местности за более короткий промежуток времени. Применение детерминированных моделей влечет за собой временные задержки [14], а статические методы не позволяют оценить рельеф местности [15].

Задача размещения БПЛА с ретрансляционным оборудованием является классической оптимизационной проблемой: требуется найти пространственную точку, максимизирующую покрытие абонентов при ограничениях на дальность прямой видимости, энергопотребление и рельеф местности. В условиях динамичной обстановки необходимо применять эффективные вычислительные методы. Среди известных подходов выделяется жадный алгоритм, последовательно принимающий локально оптимальные решения [16].

Более сложные метаэвристики вдохновлены природными процессами: генетический алгоритм имитирует естественный отбор, скрещивая и мутируя популяцию решений [17, 18]; пчелиный алгоритм моделирует поиск нектара разведчиками с последующей детальной разведкой перспективных зон [19, 20]; муравьиный алгоритм использует феромонную маркировку для постепенного усиления наилучших путей [21].

Основная цель настоящего исследования заключается в создании детерминированных алгоритмов размещения, которые гарантированно покрывают все клетки рабочей зоны при стремлении к минимизации двух ключевых показателей: общего количества задействованных БПЛА и площади нежелательного покрытия за границами области (в дальнейшем будет использоваться понятие «внешние точки»).

В рамках решения задачи минимизации количества БПЛА, необходимого для полного покрытия рабочей зоны, представленной сеткой  $N \times N$ , разработано три жадных алгоритма и три варианта декомпозиции. Полученные с их помощью решения будут использованы в качестве исходных популяций для генетического алгоритма, где посредством скрещивания планируется найти оптимальный вариант. Зона действия каждого БПЛА определяется эмпирической зависимостью от высоты точки базирования и окружающего рельефа (потенциальных позиций абонентов). На вход алгоритмов подаются матрица высот  $\mathbf{H}$  (размером  $N \times N$ ), рабочая частота  $f$  (в мегагерцах) и предельно допустимый уровень потерь сигнала  $L_{\text{доп}}$  (в децибелах). Работа жадной эвристики строится итеративно: на каждом шаге выбирается наилучшая из еще не покрытых клеток для установки аппарата, после чего все клетки, вошедшие в зону его покрытия, исключаются из дальнейшего рассмотрения.

### Предварительный расчет максимальных зон покрытия

На начальном этапе для каждой клетки  $(x, y)$  сетки размером  $N \times N$  осуществляется предварительный расчет максимального радиуса действия  $R_{\text{max}}(x, y)$  БПЛА, помещенного в данную клетку. Значение  $R_{\text{max}}(x, y)$  определяется как наибольший радиус круга с центром в  $(x, y)$ , внутри которого аппарат может поддерживать устойчивую связь со всеми абонентами. Процедура нахождения  $R_{\text{max}}(x, y)$  заключается в последовательном увеличении пробного целочисленного радиуса  $d$  от 0 до максимально возможного расстояния между двумя клетками сетки:

$$d_{\text{max}} = \sqrt{(n-1)^2 + (n-1)^2}.$$

Для текущего  $d$  проверяются все клетки  $(i, j)$ , для которых выполняется условие

$$d \geq \sqrt{(i-x)^2 + (j-y)^2}.$$

Для каждой такой клетки с использованием эмпирической модели Окумуры – Хата, модифицированной для учета разности высот местности и условий прямой видимости, вычисляется требуемый радиус связи  $R_i$ :

$$L_U = 69,55 + 26,16 \times \log_{10}(f) + 13,82 \times \log_{10}(h_{6,c} \pm \Delta h) + (0,8 + (1,1 \times \log_{10}(f) - 0,7) \times (h_{п.с} \pm \Delta h)) + (44,9 - 6,55 \times \log_{10}(h_{6,c} \pm \Delta h)) \times \log_{10} R_i,$$

откуда

$$\log_{10} R_i = L_U - (69,55 + 26,16 \times \log_{10}(f) + 13,82 \times \log_{10}(h_{6,c} \pm \Delta h) + (0,8 + (1,1 \times \log_{10}(f) - 0,7) \times (h_{п.с} \pm \Delta h))) / (44,9 - 6,55 \times \log_{10}(h_{6,c} \pm \Delta h)),$$

где  $L_U$  – уровень потерь на трассе распространения радиосигнала, дБ;  $f$  – частота передачи сигнала, МГц;  $h_{6,c}$  – высота подвеса антенны базовой станции, м;  $h_{п.с}$  – высота подвеса антенны портативной станции, м;  $\Delta h$  – разница в высотах над уровнем моря в местах нахождения базовой и портативной станций, м;  $R_i$  – расстояние между объектами, км.

Если хотя бы для одной клетки окажется, что  $R_i$  меньше фактического расстояния до нее, то радиус  $d$  признается недостижимым, и максимальным принимается предыдущее значение  $d - 1$ :  $R_{\text{max}}(x, y) = d - 1$ .

В противном случае радиус увеличивается на единицу, и процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнут предельный радиус либо не возникнет первое нарушение условия. Если все проверки вплоть до максимального  $d$  завершаются успешно, то  $R_{\text{max}}(x, y)$  полагается равным этому максимальному значению:  $R_{\text{max}}(x, y) = d$ .

После завершения описанных вычислений для всех клеток рабочей зоны формируется матрица радиусов  $\text{radius\_map}$ , каждый элемент которой  $\text{radius\_map}[x][y]$  содержит значение максимального радиуса, обеспечивающего устойчивую связь БПЛА, размещенного в клетке  $(x, y)$ , со всеми абонентами внутри соответствующего круга.

Для дальнейшего размещения БПЛА готовятся следующие структуры данных. Вводится битовая матрица покрытия  $\mathbf{C}$  размером  $N \times N$ , где  $\mathbf{C}[i][j] = 0$  означает, что клетка  $(i, j)$  еще не обслуживается ни одним БПЛА, а  $\mathbf{C}[i][j] = 1$  – что она уже покрыта. Изначально все элементы  $\mathbf{C}$  устанавливаются в 0 (или False). Также создается пустой список  $\mathbf{D}$ , в который последовательно добавляются записи о каждом размещенном БПЛА в формате  $(x, y, R_{\text{max}})$  – координаты центра и радиус покрытия. Для количественной

оценки нежелательного излучения за пределами рабочей зоны вводится переменная  $P_{sum}$ , аккумулирующая общее количество так называемых «внешних точек». Начальное значение этой переменной равно нулю.

### Основной цикл размещения

Второй этап, специфика которого варьируется для каждого из рассматриваемых алгоритмов, заключается в итерационном процессе размещения БПЛА. Основной цикл повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто полное покрытие всех клеток рабочей зоны:

$$\exists(i,j):C[i][j]=0.$$

На каждой итерации выполняется поиск наилучшего кандидата среди еще не покрытых клеток; клетки, уже отмеченные как покрытые, исключаются из рассмотрения.

Для каждого кандидата  $(x, y)$  с радиусом  $R = \text{radius\_map}[x][y]$  вычисляются две величины:

$K$  – количество непокрытых клеток, попадающих внутрь круга радиуса  $R$  с центром  $(x, y)$ ;

$P$  – количество целочисленных точек вне сетки (координаты которых меньше 0 или больше  $N - 1$ ), также принадлежащих этому кругу.

Перед началом перебора переменные инициализируются следующим образом: лучшее найденное значение  $K_{best}$ , соответствующее минимальное значение  $P_{best}$ , а координаты лучшего кандидата  $(x_{best}, y_{best})$ . Кандидат сравнивается с текущим лучшим по правилу: если  $K > K_{best}$  (или  $K = K_{best}$  и  $P < P_{best}$ ), то данный кандидат признается новым лучшим:

$$K[x][y]=K_{max}, P[x][y]=P_{min}, [x][y]=best.$$

Таким образом, приоритет отдается максимизации числа вновь покрытых клеток внутри зоны, а при равной эффективности – минимизации нежелательного покрытия за ее пределами:

$$\forall(i,j):C[i][j]=1.$$

После завершения перебора выбранная позиция  $(x_{best}, y_{best})$  с радиусом  $R_{best}$  добавляется в список  $D$ . С помощью функции  $\text{mark\_covered}$  все клетки, попавшие в круг данного радиуса, помечаются как покрытые, а значение  $P_{best}$  прибавляется к суммарному счетчику внешних точек  $P_{sum}$ . Процесс завершается, когда все клетки становятся покрытыми. Если на каком-либо шаге не найдено ни одного кандидата с положительным значением  $K$  (что может свидетельствовать о недостижимости оставшихся клеток из-за

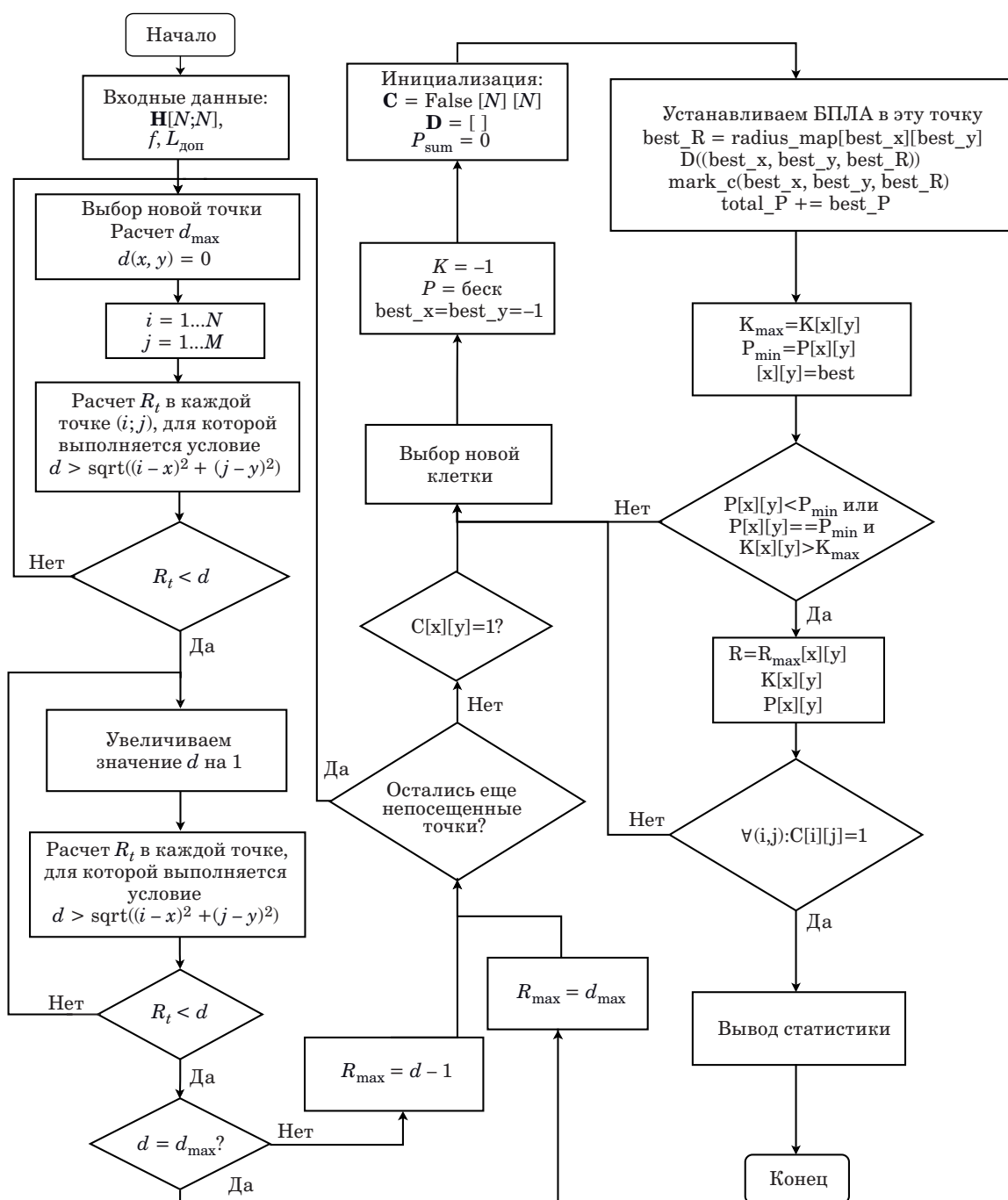
особенностей рельефа), алгоритм также прекращает работу, однако в рамках постановки задачи предполагается, что полное покрытие достижимо.

Во втором варианте алгоритма (рис. 1) при сохранении вычисления тех же двух показателей,  $K$  и  $P$ , критерий выбора лучшего кандидата изменяется: предпочтение отдается клетке с наименьшим значением  $P$ , а при равенстве этого показателя – с наибольшим  $K$ . Формально это выражается условием: если  $P < P_{best}$  (или  $P = P_{best}$  и  $K > K_{best}$ ), то данный кандидат становится новым лучшим. Таким образом, приоритет смещается в сторону минимизации нежелательного покрытия вне рабочей зоны, тогда как максимизация числа покрываемых клеток внутри зоны выступает в качестве вторичного критерия.

Третий вариант алгоритма полностью исключает из рассмотрения внешние точки, не учитывая показатель  $P$  при выборе позиции. Основным критерием здесь выступает максимально возможный радиус  $R$  БПЛА для данной клетки. Среди непокрытых клеток выбирается та, у которой значение  $R$  наибольшее; в случае равенства радиусов предпочтение отдается кандидату с большим  $K$ . Поскольку величина  $P$  не оказывает влияния на решение, итоговое размещение может характеризоваться значительной внешней площадью покрытия.

Также разработано три варианта декомпозиции, построенных на трех вариантах жадного алгоритма. Первый вариант декомпозиции (Split V) основан на разделении рабочей зоны на левую и правую подобласти с перекрытием. Сначала для левой части независимо применяются все три базовых жадных алгоритма и из полученных решений выбирается наилучшее по критерию минимизации числа БПЛА и внешней площади. Затем, с учетом покрытия созданного БПЛА из левой части, аналогичная процедура выполняется для правой подобласти. Итоговое решение формируется объединением БПЛА из обеих частей, при этом выбор комбинации алгоритмов для правой части также подчиняется указанному критерию. Такой подход позволяет локально оптимизировать размещение в каждой половине, сохраняя глобальную согласованность покрытия.

Во втором варианте (Split H) область делится на верхнюю и нижнюю части с перекрытием. Процедура аналогична Split V: сначала решается верхняя подобласть с перебором трех алгоритмов и выбором лучшего решения, затем с учетом его покрытия оптимизируется нижняя часть. Комбинации решений оцениваются по тому же правилу: в первую очередь минимизируется число БПЛА, затем внешняя площадь. Горизонтальное разбиение ориентировано на учет особенностей рельефа, изменяющихся преимущественно по вертикали.



■ **Рис. 1.** Блок-схема жадного алгоритма 2  
 ■ **Fig. 1.** Block diagram of greedy algorithm 2

Третий вариант (Split Q) – наиболее детализированный метод декомпозиции, при котором рабочая зона разбивается на четыре квадранта с перекрытием. Решение строится последовательно: для верхнего левого квадранта выбирается лучший алгоритм (по критерию минимизации числа БПЛА и внешней площади), затем с учетом полученного покрытия аналогично обрабатывается верхний правый, нижний левый и, наконец,

нижний правый квадранты. На каждом этапе выбор алгоритма для текущего квадранта производится так, чтобы итоговое объединенное решение было оптимальным по указанным метрикам. Такой подход позволяет более гибко адаптироваться к локальным изменениям рельефа, что в ряде случаев дает лучшее сочетание числа БПЛА и внешней площади по сравнению с двухчастным разбиением.

## Визуализация расчетов

Для целей вычислительного моделирования и визуализации создано специализированное программное обеспечение на языке Python. Расчет радиусов покрытия, реализация трех жадных эвристик, а также построение карт высот и зон действия БПЛА выполнены с использованием библиотек NumPy и Matplotlib. Функционал программного обеспечения способствует последовательному запуску всех трех алгоритмов на идентичных наборах данных для корректного сравнения их эффективности. В качестве тестового полигона использовалась матрица высот размерностью  $20 \times 20$ , сгенерированная случайным образом с фиксированным начальным значением генератора псевдослучайных чисел для обеспечения воспроизводимости. Предельно допустимый уровень потерь сигнала был установлен равным 120 дБ.

В процессе выполнения алгоритмов в консоль выводилась детальная информация о каждом шаге: координаты выбранной позиции, рассчитанный радиус, количество вновь покрытых клеток внутри зоны, а также число точек, покрытых за ее пределами (рис. 2).

По завершении вычислений фиксировались следующие итоговые показатели:

- суммарное количество задействованных БПЛА;
- общее количество покрытий клеток вне рабочей зоны (с учетом перекрытий зон действия);
- количество уникальных внешних клеток, попавших под покрытие;
- доля уникального внешнего покрытия по отношению к общей покрытой площади.

Для обеспечения наглядности при сравнительном анализе результатов каждым из алгоритмов выполнялась визуализация карты высот с наложенными зонами покрытия БПЛА (рис. 3). Это позволило провести качественную оценку характера распределения устройств. Детерминированность реализованных алгоритмов гарантирует полную идентичность результатов при многократных запусках на одних и тех же исходных данных, что является необходимым условием корректности сравнения.

Проведенное сравнение позволило выявить особенности каждого подхода:

- алгоритм, максимизирующий покрытие внутри зоны, показал 40 БПЛА;
- алгоритм с приоритетом минимизации выхода за границы привел к увеличению количества БПЛА, но не всегда к уменьшению уникальной внешней площади;
- алгоритм, ориентированный на максимальный радиус, показал 37 БПЛА;
- вариант декомпозиции с вертикальным разделением рабочей зоны показал 38 БПЛА;

## Drone Placement Report

Precomputing radii...

Radii computed.

```

Step 1: drone at (3, 6) with radius 3, covered 29 new cells, outside points 0
Step 2: drone at (6, 4) with radius 3, covered 21 new cells, outside points 0
Step 3: drone at (2, 11) with radius 2, covered 13 new cells, outside points 0
Step 4: drone at (2, 17) with radius 2, covered 13 new cells, outside points 0
Step 5: drone at (4, 14) with radius 2, covered 13 new cells, outside points 0
Step 6: drone at (6, 10) with radius 2, covered 13 new cells, outside points 0
Step 7: drone at (7, 16) with radius 2, covered 13 new cells, outside points 0
Step 8: drone at (9, 8) with radius 2, covered 13 new cells, outside points 0
Step 9: drone at (9, 13) with radius 2, covered 13 new cells, outside points 0
Step 10: drone at (11, 2) with radius 2, covered 13 new cells, outside points 0
Step 11: drone at (11, 17) with radius 2, covered 13 new cells, outside points 0
Step 12: drone at (12, 6) with radius 2, covered 13 new cells, outside points 0
Step 13: drone at (12, 11) with radius 2, covered 13 new cells, outside points 0
Step 14: drone at (14, 14) with radius 2, covered 13 new cells, outside points 0
Step 15: drone at (15, 3) with radius 2, covered 13 new cells, outside points 0
Step 16: drone at (15, 8) with radius 2, covered 13 new cells, outside points 0
Step 17: drone at (16, 17) with radius 2, covered 13 new cells, outside points 0
Step 18: drone at (17, 11) with radius 2, covered 13 new cells, outside points 0
Step 19: drone at (2, 2) with radius 2, covered 10 new cells, outside points 0
Step 20: drone at (17, 5) with radius 2, covered 10 new cells, outside points 0
Step 21: drone at (17, 2) with radius 2, covered 8 new cells, outside points 0
Step 22: drone at (17, 14) with radius 2, covered 7 new cells, outside points 0
Step 23: drone at (5, 17) with radius 2, covered 5 new cells, outside points 0
Step 24: drone at (7, 12) with radius 2, covered 4 new cells, outside points 0
Step 25: drone at (9, 3) with radius 2, covered 4 new cells, outside points 0
Step 26: drone at (12, 15) with radius 2, covered 4 new cells, outside points 0
Step 27: drone at (11, 9) with radius 2, covered 3 new cells, outside points 0
Step 28: drone at (13, 4) with radius 2, covered 2 new cells, outside points 0

```

■ **Рис. 2.** Результат размещения БПЛА по жадному алгоритму 2

■ **Fig. 2.** Result of UAV placement using greedy algorithm 2

– варианты декомпозиции с горизонтальным и квадрантным разделением рабочих зон показали 37 БПЛА с размещением в разных точках.

## Сравнительный анализ работы алгоритмов на различных картах

Для получения количественных оценок эффективности жадных алгоритмов была проведена серия из 10 экспериментов на различных случайно сгенерированных картах высот размером  $20 \times 20$  клеток. В каждом испытании фиксировались два ключевых показателя: общее количество размещенных БПЛА и площадь уникального покрытия за пределами рабочей зоны (рис. 4). Анализ полученных данных, представленный на рис. 5, позволил выявить устойчивые закономерности в работе алгоритмов и сформулировать обоснованные выводы относительно их сравнительной эффективности.



```

--- Test 1 (seed=0) ---
Alg1: drones=43, outside=88, time=981.02 ms
Alg2: drones=56, outside=75, time=1018.86 ms
Alg3: drones=44, outside=100, time=938.00 ms
SplitV: drones=44, outside=88, time=9017.87 ms
SplitH: drones=46, outside=91, time=9022.86 ms
SplitQ: drones=45, outside=84, time=9033.47 ms

--- Test 2 (seed=1) ---
Alg1: drones=39, outside=68, time=965.72 ms
Alg2: drones=55, outside=76, time=1032.48 ms
Alg3: drones=37, outside=86, time=1039.72 ms
SplitV: drones=39, outside=81, time=9239.00 ms
SplitH: drones=44, outside=84, time=9271.83 ms
SplitQ: drones=42, outside=94, time=9219.17 ms

--- Test 3 (seed=2) ---
Alg1: drones=40, outside=96, time=971.99 ms
Alg2: drones=56, outside=72, time=1084.93 ms
Alg3: drones=37, outside=99, time=1031.50 ms
SplitV: drones=38, outside=96, time=9408.06 ms
SplitH: drones=37, outside=98, time=9313.48 ms
SplitQ: drones=37, outside=95, time=9204.09 ms

--- Test 4 (seed=3) ---
Alg1: drones=43, outside=87, time=969.03 ms
Alg2: drones=54, outside=70, time=1021.90 ms
Alg3: drones=42, outside=93, time=937.07 ms
SplitV: drones=43, outside=93, time=9208.02 ms
SplitH: drones=45, outside=91, time=9189.17 ms
SplitQ: drones=44, outside=91, time=8795.56 ms

--- Test 5 (seed=4) ---
Alg1: drones=43, outside=74, time=951.61 ms
Alg2: drones=59, outside=64, time=1060.56 ms
Alg3: drones=43, outside=87, time=915.52 ms
SplitV: drones=44, outside=83, time=9188.55 ms
SplitH: drones=46, outside=69, time=9084.27 ms
SplitQ: drones=43, outside=74, time=8675.27 ms

--- Test 6 (seed=5) ---
Alg1: drones=40, outside=100, time=926.11 ms
Alg2: drones=57, outside=83, time=1007.62 ms
Alg3: drones=40, outside=112, time=899.76 ms
SplitV: drones=39, outside=97, time=9019.92 ms
SplitH: drones=40, outside=108, time=9078.94 ms
SplitQ: drones=40, outside=93, time=8883.90 ms

--- Test 7 (seed=6) ---
Alg1: drones=44, outside=81, time=936.36 ms
Alg2: drones=55, outside=67, time=1022.22 ms
Alg3: drones=45, outside=89, time=925.99 ms
SplitV: drones=43, outside=78, time=9107.69 ms
SplitH: drones=41, outside=75, time=9146.60 ms
SplitQ: drones=41, outside=72, time=8844.91 ms

--- Test 8 (seed=7) ---
Alg1: drones=41, outside=114, time=937.52 ms
Alg2: drones=56, outside=75, time=1019.19 ms
Alg3: drones=40, outside=108, time=920.86 ms
SplitV: drones=38, outside=96, time=9136.25 ms
SplitH: drones=42, outside=100, time=9142.26 ms
SplitQ: drones=40, outside=86, time=8777.77 ms

--- Test 9 (seed=8) ---
Alg1: drones=43, outside=72, time=924.07 ms
Alg2: drones=57, outside=62, time=1013.97 ms
Alg3: drones=44, outside=71, time=899.90 ms
SplitV: drones=40, outside=64, time=8859.75 ms
SplitH: drones=40, outside=66, time=9053.68 ms
SplitQ: drones=42, outside=69, time=8589.84 ms

--- Test 10 (seed=9) ---
Alg1: drones=39, outside=72, time=904.49 ms
Alg2: drones=54, outside=61, time=1004.88 ms
Alg3: drones=40, outside=99, time=896.28 ms
SplitV: drones=39, outside=72, time=8978.67 ms
SplitH: drones=39, outside=71, time=9092.77 ms
SplitQ: drones=39, outside=69, time=8727.40 ms

```

=====

FINAL STATISTICS (10 tests, N=20, Lu=120)

=====

Algorithm 1:

■ **Рис. 4.** Результаты расчетов алгоритмов на основе 10 тестов

■ **Fig. 4.** Results of algorithm calculations based on 10 tests

Алгоритм 1 (максимизация  $K$  и минимизация  $P$ ) демонстрирует сбалансированные показатели: в среднем 42 БПЛА и внешняя площадь 85,2. Он служит точкой отсчета для сравнения.

Алгоритм 2 (минимизация  $P$  и максимизация  $K$ ) обеспечивает наименьшую внешнюю площадь (70,5), но ценой значительного увеличения числа БПЛА – в среднем 56, что на 34 % больше, чем у алгоритма 1. Это делает его применимым только при жестких ограничениях на внешнее покрытие.

Алгоритм 3 (максимизация радиуса) дает примерно такое же число БПЛА (42), как и алгоритм 1, но при этом имеет наибольшую внешнюю площадь (94,4), что подтверждает нецелесообразность игнорирования выхода за границы.

Вертикальное разделение позволило снизить среднее число БПЛА до 41 (минимальное среди всех) при внешней площади 84,8, что немного лучше алгоритма 1. Он показывает стабильность и выигрыш в числе БПЛА.

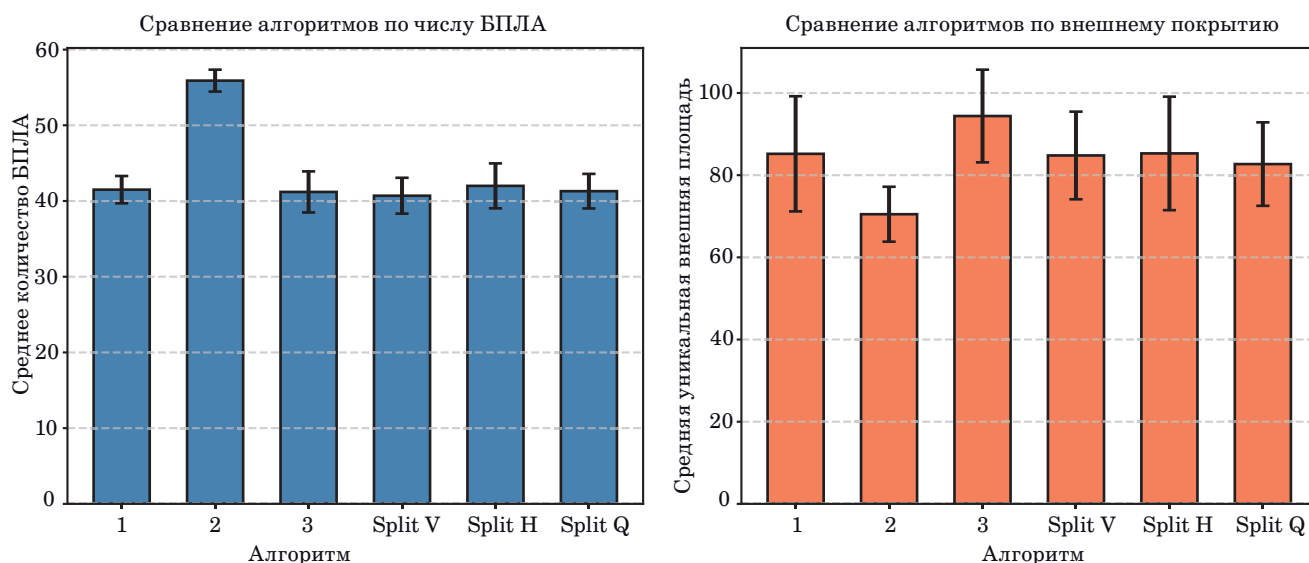
Горизонтальное разделение оказалось наименее эффективным среди методов декомпозиции: число БПЛА 42 и внешняя площадь 85,3.

Квадрантное разделение продемонстрировало среднее число БПЛА – 42 (близко к алгоритмам 1 и 3) и минимальную среди Split-методов внешнюю площадь – 82,7.

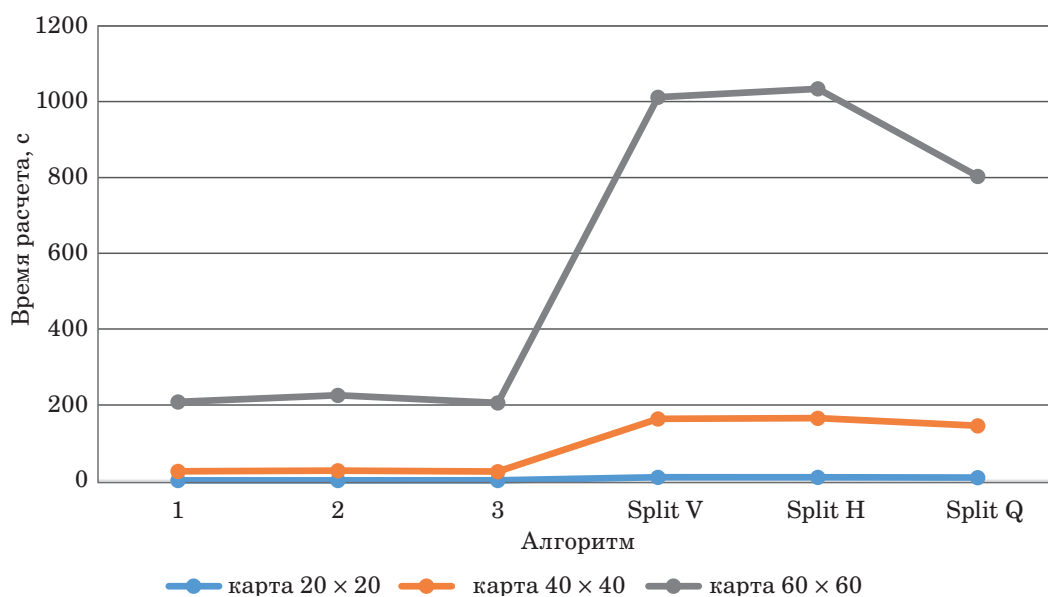
Вычисление проводилось на компьютере HP ProDesk с процессором Intel Core i5-10500T и 16 ГБ ОЗУ. Вычисление каждого алгоритма на карте  $20 \times 20$  распределилось следующим образом: алгоритм 1 – 0,928 с; алгоритм 2 – 1,017 с; алгоритм 3 – 0,906 с; Split V – 8,870 с; Split H – 8,870 с; Split Q – 8,557 с.

Для оценки масштабируемости предложенных алгоритмов были проведены дополнительные эксперименты на картах размером  $40 \times 40$  и  $60 \times 60$  клеток. Измерялось среднее время выполнения каждого алгоритма на основе 10 тестов. График зависимости времени расчета от размера карт представлен на рис. 6.

Все алгоритмы демонстрируют резкий рост времени выполнения при увеличении размера сетки. Переход от  $20 \times 20$  к  $40 \times 40$  (увеличение числа клеток в 4 раза) приводит к росту времени в 20–27 раз для базовых жадных алгоритмов (алгоритмы 1–3) и в 16–18 раз для методов декомпозиции (Split V, H, Q). При дальнейшем увеличении до  $60 \times 60$  (в 9 раз больше клеток, чем  $20 \times 20$ ) время возрастает уже в 224–228 раз для базовых алгоритмов и в 114–117 раз для Split. Для ускорения работы алгоритмов на больших картах в дальнейшем предполагается распараллелить предварительный расчет радиусов и реализовать кеширование результатов расчета радиусов.



■ **Рис. 5.** Сравнительный анализ результатов расчетов алгоритмов  
 ■ **Fig. 5.** Comparative analysis of algorithm calculation results



■ **Рис. 6.** Сравнительный анализ результатов расчетов на картах различных размеров  
 ■ **Fig. 6.** Comparative analysis of calculation results on maps of different sizes

### Закключение

В ходе исследования разработаны и реализованы три жадных алгоритма размещения БПЛА, а также три варианта декомпозиции рабочей области, направленные на минимизацию числа аппаратов при обеспечении полного покрытия с учетом рельефа местности и эмпирической модели потерь сигнала. Проведенные вычислительные эксперименты на случайных картах высот размером  $20 \times 20$  клеток позволили вы-

полнить сравнительный анализ предложенных методов по двум ключевым критериям: общему количеству задействованных БПЛА и площади уникального покрытия вне рабочей зоны.

Установлено, что базовый жадный алгоритм, максимизирующий число вновь покрытых клеток с последующей минимизацией внешних точек, демонстрирует сбалансированные показатели и может служить опорным решением. Алгоритм, ориентированный исключительно на минимизацию внешней площади, приводит

к существенному росту числа БПЛА, что ограничивает его применение лишь задачами с жесткими требованиями к излучению за пределами зоны. Игнорирование внешних точек в пользу максимального радиуса ухудшает результат по площади нежелательного покрытия без выигрыша в количестве БПЛА.

Применение декомпозиции с последовательным решением подобластей и комбинированием различных жадных стратегий позволило улучшить качество размещения. Среди методов декомпозиции вертикальное разбиение позволяет минимизировать количество БПЛА (41), а квадратное — минимизировать внешнюю площадь (82,7). Выбор конкретного метода зависит от приоритетов проектирования: если задача заключается в сокращении числа БПЛА, то предпочтительно вертикальное разбиение; если же важнее ограничить нежелательное излучение за пределами зоны, то квадратное. При этом квадратное разбиение также характеризуется наименьшим разбросом показателей, что может быть полезно для обеспечения предсказуемости решения.

Измерение вычислительных затрат на картах  $20 \times 20$ ,  $40 \times 40$  и  $60 \times 60$  показало, что базовые жадные алгоритмы работают за 3–4 минуты на карте  $60 \times 60$ , что приемлемо для задач однократного планирования. Методы декомпозиции, особенно квадрантный, обеспечивают лучшее качество покрытия (меньшее число БПЛА и внешних точек), но требуют значительно большего времени. Таким образом, выбор алгоритма зависит от приоритетов: при жестких ограничениях по времени следует использовать базовые алгоритмы, при требовании минимального числа БПЛА или внешнего покрытия — методы декомпозиции.

Полученные решения могут быть использованы в качестве начальных популяций для генетического алгоритма, что открывает перспективу дальнейшей оптимизации путем скрещивания и поиска глобально лучших конфигураций. Предложенные методы обеспечивают эффективное автоматическое размещение БПЛА с учетом рельефа и могут быть адаптированы для различных практических сценариев планирования беспроводных сетей.

## Литература

1. **Чан Т. З., Кучерявый А. Е.** Оптимизация использования ресурсов воздушных базовых станций на основе методов искусственного интеллекта. *Труды учебных заведений связи*, 2025, т. 11, № 1, с. 62–68. doi:10.31854/1813-324X-2025-11-1-62-68, EDN: RVENVC
2. **Fujio S., Ozaki K.** Radio propagation environment prediction method for UAV-assisted cellular networks with millimeter-wave beamforming. *2024 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, 2024, pp. 957–961. doi:10.1109/ICNC59896.2024.10556093
3. **Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M.** A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 2334–2360. doi:10.1109/COMST.2019.2902862
4. **Pandey A., Gunjan V.** Genetic algorithm-based optimization of UAV placement for fixed and dynamic target scenarios. *2025 International Conference on Electronics, AI and Computing (EAIC)*, India, 2025, pp. 1–8. doi:10.1109/EAIC66483.2025.11101363
5. **Florin R., Grozea C., Enache M., Nelega R., Kovacs G., Puschita R.** Mission-critical services in 4G/5G and beyond: Standardization, key challenges, and future perspectives. *Sensors*, 2025, vol. 25, no. 16, pp. 1–48. doi:10.3390/s25165156
6. **Kumbhar A., Koohifar F., Güvenç İ., Mueller B.** A survey on legacy and emerging technologies for public safety communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, vol. 19, no. 1, pp. 97–124. doi:10.1109/COMST.2016.2612223
7. **Zeng Y., Zhang R., Lim T. J.** Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 2016, vol. 54, no. 5, pp. 36–42. doi:10.1109/MCOM.2016.7470933
8. **Khuwaja A. A., Chen Y., Zhao N., Alouini M. S., Dobbins P.** A survey of channel modeling for UAV communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, vol. 20, no. 4, pp. 2804–2821. doi:10.1109/comst.2018.2856587
9. **Mahbub M., Saym M. M., Jahan S., Paul A. K., Niyato D.** UAV-assisted wireless communications in the 6G-and-beyond era: An extensive survey on characteristics, standardization and regulations, enabling technologies, challenges, and future directions. *Vehicular Communications*, 2025, vol. 15, no. 3, pp. 45–67. doi:10.1016/j.vehcom.2025.100977
10. **Kalantari E., Yanikomeroğlu H., Yongacoglu A.** On the number and 3D placement of drone base stations in wireless cellular networks. *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2016-Fall)*, Montreal, QC, Canada, 2016, pp. 1–6. doi:10.1109/VTCFall.2016.7881122
11. **Savkin A. V., Huang H.** Proactive deployment of aerial drones for coverage over very uneven terrains: A version of the 3D art gallery problem. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 6, Article 1438. doi:10.3390/s19061438
12. **Ruz-Nieto A., Egea-López E., Molina-García-Pardo J.-M., Santa J.** A 3D simulation framework with ray-tracing propagation for LoRaWAN communication. *Internet of Things*, 2023, vol. 24, Article 100964. doi:10.1016/j.iot.2023.100964
13. **Иванов В. С., Увайсов С. У., Иванов И. А.** Алгоритм автоматического размещения базовых станций

- транкинговых систем связи. *Труды учебных заведений связи*, 2023, т. 9, № 5, с. 25–34. doi:10.31854/1813-324X-2023-9-5-25-34, EDN: JMSIAV
14. Ali N., Al-Behadili H. A. H. A comprehensive review of radio signal propagation prediction for terrestrial wireless communication systems. *Misan Journal of Engineering Sciences*, 2024, vol. 3, no. 1, pp. 100–120. doi:10.61263/mjes.v3i1.80
15. Мамченко М. В., Зорин В. А., Романова М. А. Эмпирическая модель расчета затухания сигнала с учетом коэффициента застройки местности для беспилотных транспортных средств. *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*, 2022, № 1 (105), с. 59–72. doi:10.35330/1991-6639-2022-1-105-59-73, EDN: FQPPBV
16. Jia Y., Zhou S., Zeng Q., Li C., Chen D., Zhang K., Liu L., Chen Z. The UAV path coverage algorithm based on the greedy strategy and ant colony optimization. *Electronics*, 2022, vol. 11, no. 17, pp. 2667. doi:10.3390/electronics11172667
17. Файзуллин Р. Ф. Потенциал генетических алгоритмов в задачах покрытия территории группой БЛА. *Вестник РГГУ. Серия «Информатика. Информационная безопасность. Математика»*, 2024, № 1, с. 36–50. doi:10.28995/2686-679X-2024-1-36-50, EDN: DPOXPG
18. Wen X., Ruan Y., Li Y., Xia H., Zhang R., Wang C., Liu W., Jiang X. Improved genetic algorithm based 3-D deployment of UAVs. *Journal of Communications and Networks*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 223–231. doi:10.23919/JCN.2022.000014
19. Перепелкин Д. А., Нгуен В. Т. Интеллектуальная многопутевая маршрутизация в программно-конфигурируемых сетях на основе алгоритма искусственной пчелиной колонии. *Информационные технологии*, 2022, т. 28, № 8, с. 395–404. doi:10.17587/it.28.395-404, EDN: BONWWZ
20. Егорова К. В. Имитационная модель управления полетом группы беспилотных летательных аппаратов на основе алгоритма пчелиной колонии. *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2023, т. 19, № 2, с. 68–71. doi:10.36622/VSTU.2023.19.2.010, EDN: INIXQJ
21. Chen Y., Li N., Zhong X., Xie W. Joint trajectory and scheduling optimization for the mobile UAV aerial base station: A fairness version. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 15, pp. 3101. doi:10.3390/app9153101

UDC 621.396

doi:10.31799/1684-8853-2026-3-63-74

EDN: WJHXOQ

### Optimization of the placement of unmanned aerial vehicles to cover the territory in trunking communication systems

V. S. Ivanov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0001-9827-1690, ivanovmirea1@yandex.ru<sup>a</sup>MIREA – Russian Technological University, 78, Vernadsky Ave., 119454, Moscow, Russian Federation

**Introduction:** The relevance of deploying unmanned aerial vehicles (UAVs) for wireless coverage of the territory increases in conditions of difficult terrain affecting signal propagation. **Purpose:** To develop and comparatively analyze methods for minimizing the number of UAVs that guarantee coverage of a discrete area, taking into account the terrain, based on a combination of greedy heuristics and spatial decomposition strategies. **Results:** For each cell of the height grid, the maximum range of the UAV has been calculated using the Okumura – Hata model. We propose three greedy algorithms which differ in the criteria for choosing a position: maximizing the number of covered cells inside the area while minimizing the external coverage; external coverage priority minimizing; maximizing the radius without taking into account the boundaries. Based on these criteria, three variants of the decomposition of the working area (vertical, horizontal and quadrant partitioning with overlap) are implemented, in which each subdomain is processed independently and then solutions are combined. Experiments on  $20 \times 20$  random height maps have shown that the basic algorithm with priority for covering internal cells uses an average of 41.5 UAVs and creates 85.2 external points. The algorithm that minimizes the external area reduces it to 70.5, but requires 55.9 UAVs. Maximizing the radius yields 41.2 UAVs with the highest external coverage (94.4). The quadrant division provides the best balance: 41.3 UAVs and 82.7 external points, which is 2.5 points less than the base while maintaining the number of vehicles. The vertical division reduces the number of UAVs to 40.7, but does not improve the external area, the horizontal one turns out to be the least effective. **Practical relevance:** The decomposition of an area with overlap and the choice of an optimal strategy for each subdistrict improve the quality of placement. The quadrant division demonstrates the best compromise between the number of UAVs and unwanted radiation, as well as the smallest variation in indicators. The proposed methods can serve as a basis for the formation of initial populations in genetic algorithms in order to find globally optimal configurations of UAV-based networks.

**Keywords** – UAVs, heuristic algorithms, wireless communication, trunking communication systems, placement optimization, air base station, genetic algorithm.

**For citation:** Ivanov V. S. Optimization of the placement of unmanned aerial vehicles to cover the territory in trunking communication systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2026, no. 3, pp. 63–74 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2026-3-63-74, EDN: WJHXOQ

### References

- Tran T. D., Koucheryavy A. E. Resource optimization of airborne base stations using artificial intelligence methods. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2025, vol. 11, no. 1, pp. 62–68 (In Russian). doi:10.31854/1813-324X-2025-11-1-62-68
- Fujio S., Ozaki K. Radio propagation environment prediction method for UAV-assisted cellular networks with millimeter-wave beamforming. *2024 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, 2024, pp. 957–961. doi:10.1109/ICNC59896.2024.10556093

3. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 2334–2360. doi:10.1109/COMST.2019.2902862
4. Pandey A., Gunjan V. Genetic algorithm-based optimization of UAV placement for fixed and dynamic target scenarios. *2025 International Conference on Electronics, AI and Computing (EAIC)*, India, 2025, pp. 1–8. doi:10.1109/EAIC66483.2025.11101363
5. Florin R., Grozea C., Enache M., Nelega R., Kovacs G., Pus-chita R. Mission-critical services in 4G/5G and beyond: Standardization, key challenges, and future perspectives. *Sensors*, 2025, vol. 25, no. 16, pp. 1–48. doi:10.3390/s25165156
6. Kumbhar A., Koohifar F., Güvenç İ., Mueller B. A survey on legacy and emerging technologies for public safety communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, vol. 19, no. 1, pp. 97–124. doi:10.1109/COMST.2016.2612223
7. Zeng Y., Zhang R., Lim T. J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 2016, vol. 54, no. 5, pp. 36–42. doi:10.1109/MCOM.2016.7470933
8. Khuwaja A. A., Chen Y., Zhao N., Alouini M. S., Dobbins P. A survey of channel modeling for UAV communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, vol. 20, no. 4, pp. 2804–2821. doi:10.1109/comst.2018.2856587
9. Mahbub M., Saym M. M., Jahan S., Paul A. K., Niyato D. UAV-assisted wireless communications in the 6G-and-beyond era: An extensive survey on characteristics, standardization and regulations, enabling technologies, challenges, and future directions. *Vehicular Communications*, 2025, vol. 15, no. 3, pp. 45–67. doi:10.1016/j.vehcom.2025.100977
10. Kalantari E., Yanikomeroglu H., Yongacoglu A. On the number and 3D placement of drone base stations in wireless cellular networks. *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2016-Fall)*, Montreal, QC, Canada, 2016, pp. 1–6. doi:10.1109/VTCFall.2016.7881122
11. Savkin A. V., Huang H. Proactive deployment of aerial drones for coverage over very uneven terrains: A version of the 3D art gallery problem. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 6, Article 1438. doi:10.3390/s19061438
12. Ruz-Nieto A., Egea-López E., Molina-García-Pardo J. M., Santa J. A 3D simulation framework with ray-tracing propagation for LoRaWAN communication. *Internet of Things*, 2023, vol. 24, Article 100964. doi:10.1016/j.iot.2023.100964
13. Ivanov V. S., Uvaisov S. U., Ivanov I. A. Automatic placement algorithm of base stations trunking communication systems. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2023, vol. 9, no. 5, pp. 25–34 (In Russian). doi:10.31854/1813-324X-2023-9-5-25-34, EDN: JMSIAV
14. Ali N., Al-Behadili H. A. H. A comprehensive review of radio signal propagation prediction for terrestrial wireless communication systems. *Misan Journal of Engineering Sciences*, 2024, vol. 3, no. 1, pp. 100–120. doi:10.61263/mjes.v3i1.80
15. Mamchenko M. V., Zorin V. A., Romanova M. A. Empirical model for propagation loss using floor space index for unmanned vehicles. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*, 2022, no. 1 (105), pp. 59–72 (In Russian). doi:10.35330/1991-6639-2022-1-105-59-73, EDN: FQPPBV
16. Jia Y., Zhou S., Zeng Q., Li C., Chen D., Zhang K., Liu L., Chen Z. The UAV path coverage algorithm based on the greedy strategy and ant colony optimization. *Electronics*, 2022, vol. 11, no. 17, pp. 2667. doi:10.3390/electronics11172667
17. Faizullin R. F. Potential of genetic algorithms in tasks of the territory coverage by a group of UAVs. *RSUH/RGGU Bulletin. "Information Science. Information Security. Mathematics" Series*, 2024, no. 1, pp. 36–50 (In Russian). doi:10.28995/2686-679X-2024-1-36-50, EDN: DPOXPG
18. Wen X., Ruan Y., Li Y., Xia H., Zhang R., Wang C., Liu W., Jiang X. Improved genetic algorithm based 3-D deployment of UAVs. *Journal of Communications and Networks*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 223–231. doi:10.23919/JCN.2022.000014
19. Perepelkin D. A., Nguyen V. T. Intelligent multipath routing in software-configurable networks based on an artificial bee colony algorithm. *Information Technologies*, 2022, vol. 28, no. 8, pp. 395–404 (In Russian). doi:10.17587/it.28.395-404, EDN: BONWWZ
20. Egorova K. V. Simulation model of flight control of a group of unmanned aerial vehicles based on the bee colony algorithm. *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2023, vol. 19, no. 2, pp. 68–71 (In Russian). doi:10.36622/VSTU.2023.19.2.010, EDN: INIXQJ
21. Chen Y., Li N., Zhong X., Xie W. Joint trajectory and scheduling optimization for the mobile UAV aerial base station: A fairness version. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 15, pp. 3101. doi:10.3390/app9153101

## ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

*Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.*

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (ius.spb@gmail.com).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью – рецензию.

*Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.*