

ЖАДНЫЕ АЛГОРИТМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БПЛА-РЕТРАНСЛЯТОРОВ В СИСТЕМАХ ТРАНКИНГОВОЙ СВЯЗИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-6-4-11

Иванов Вячеслав Сергеевич,
МИРЭА – Российский технологический университет,
Москва, Россия,
ivanov_vs@mirea.ru

Manuscript received 12 March 2026;
Accepted 15 May 2026

Увайсов Сайгид Увайсович,
МИРЭА – Российский технологический университет,
Москва, Россия,
uvajsov@mirea.ru

Ключевые слова: БПЛА, ретранслятор связи,
транкинговые системы связи, жадный алгоритм,
эвристические алгоритмы

В настоящей работе исследуется задача оперативного развертывания систем транкинговой связи с использованием беспилотных летательных аппаратов, выполняющих функции воздушных ретрансляторов. В качестве критерия наличия устойчивой связи между ретранслятором и наземными абонентами рассматривается соотношение между допустимым уровнем потерь сигнала и реальными потерями на трассе распространения, рассчитываемыми по эмпирической модели Окумура-Хата, адаптированной для учета рельефа местности и разности высот. Для определения позиций беспилотных летательных аппаратов предлагается использовать жадные эвристические алгоритмы, обеспечивающие приемлемую скорость расчетов в условиях ограниченного времени на принятие решений. Проводится сравнительная оценка трех вариантов жадного алгоритма, различающихся правилами выбора точки размещения на каждом шаге. При помощи этой оценки делается заключение о пригодности каждого подхода с точки зрения баланса между количеством используемых ретрансляторов и площадью нежелательного покрытия вне зоны обслуживания, и приводятся результаты вычислительных экспериментов на сетке со случайным рельефом. На текущем этапе предполагается, что полученные жадными алгоритмами решения будут использованы в качестве начальной популяции для генетического алгоритма, выполняющего более глубокий поиск глобального оптимума. На языке Python разработано программное обеспечение, позволяющее наглядно визуализировать зоны покрытия и анализировать результаты.

Информация об авторах:

Иванов Вячеслав Сергеевич, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия. ORCID: 0000-0001-9827-1690

Увайсов Сайгид Увайсович, д.т.н., профессор, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия. ORCID: 0000-0003-1943-6819

Для цитирования:

Иванов В.С., Увайсов С.У. Жадные алгоритмы позиционирования БПЛА-ретрансляторов в системах транкинговой связи // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №6. С. 4-11.

For citation:

V.S. Ivanov, S.U. Uvajsov, "Greedy Algorithms for Positioning UAV Repeater Nodes in Trunking Communication Systems," *T-Comm*, 2026, vol. 20, no. 6, pp. 4-11. (in Russian)

Введение

Современный мир невозможно представить без надежной и оперативной связи, которая стала не просто инструментом коммуникации, но и критическим элементом инфраструктуры. Сегодня существует несколько основных видов подвижной связи, каждый из которых занимает свою нишу [1, 2]. Спутниковая связь обеспечивает глобальное покрытие, позволяя работать в самых удаленных уголках планеты, однако её главными недостатками остаются высокая стоимость терминалов и трафика, а также ощутимые задержки сигнала [3, 4]. Привычная обществу мобильная сотовая связь, напротив, предлагает абонентам доступные тарифы и высокую скорость передачи данных, но её работа полностью зависит от наличия наземной инфраструктуры - вышек с базовыми станциями, что делает её уязвимой и бесполезной в зонах отчуждения или при чрезвычайных ситуациях [5, 6].

Особое место занимает транкинговая связь. Изначально разработанная для профессиональных пользователей (силовых структур, служб такси, коммунальных предприятий), она сочетает в себе эффективность и надежность. Её ключевое преимущество - оперативное распределение ограниченного количества радиочастот между большим числом абонентов и мгновенное установление соединения, что критически важно в оперативной обстановке. В отличие от сотовой, транкинговая связь менее требовательна к плотности покрытия и способна работать в условиях высоких нагрузок, а по сравнению со спутниковой - она значительно дешевле в эксплуатации и не имеет ощутимых задержек. Именно транкинговая связь благодаря своему балансу цены, скорости и надежности часто становится оптимальным выбором для обеспечения координации в нестандартных условиях [7, 8].

Однако проектирование и развертывание любых наземных систем связи, будь то сотовая или транкинговая, традиционно упирается в проблему инфраструктуры. Для обеспечения устойчивого радиопокрытия необходимо возведение вышек и антенно-мачтовых сооружений. Этот процесс требует длительных согласований, проведения геодезических изысканий, строительных работ и прокладки коммуникаций, что занимает недели и даже месяцы, не говоря о значительных финансовых затратах [9]. Но существует широкий класс сценариев, когда времени на строительство нет. Природные катаклизмы, техногенные аварии, масштабные поисково-спасательные операции или временные массовые мероприятия требуют оперативной организации связи. В таких ситуациях на помощь приходят мобильные ретрансляторы, поднятые высоко над землей. И наиболее перспективным и гибким решением становится использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Размещение транкингового ретранслятора на борту БПЛА позволяет в кратчайшие сроки создать зону уверенного приема на обширной территории, обеспечив жизненно важную связь там, где это невозможно сделать наземными средствами [10]. В данной статье будет рассмотрен алгоритм оптимального размещения такого воздушного ретранслятора для максимизации зоны покрытия и качества сигнала.

1 Эвристические алгоритмы

Задача размещения беспилотного летательного аппарата с ретрансляционным оборудованием на борту является классической оптимизационной проблемой. Необходимо найти такую точку в пространстве, которая обеспечит максимальное

покрытие абонентов при соблюдении ряда ограничений: дальность прямой видимости, время полета и энергопотребление БПЛА, а также рельеф местности. Поскольку зачастую речь идет о работе в динамичной или непредсказуемой обстановке, поиск решения требует применения эффективных вычислительных методов.

В теории оптимизации известен целый ряд подходов к решению подобных задач. Наиболее интуитивно понятным является жадный алгоритм, суть которого заключается в принятии локально оптимальных решений на каждом шаге [11, 12]. Однако существуют и более сложные метаэвристические методы, вдохновленные природными процессами [13]. Генетический алгоритм имитирует механизмы естественного отбора: он оперирует множеством потенциальных решений (популяцией), которые скрещиваются и мутируют, оставляя в итоге только наиболее эффективные варианты размещения [14]. Другие методы, такие как пчелиный или муравьиный алгоритмы, также заимствуют поведение живых организмов. Пчелиный алгоритм моделирует поиск нектара пчелами-разведчицами, которые находят перспективные участки и мобилизуют в эти районы основную группу для более детального изучения [15, 16]. Муравьиный алгоритм основан на способности насекомых находить кратчайший путь к источнику пищи, пометая свой маршрут феромонами, что позволяет постепенно усиливать наилучшие траектории [17-19].

Каждый из перечисленных методов обладает своими достоинствами и нюансами, однако для решения задачи оперативного развертывания ретранслятора важна не только точность конечного результата, но и скорость вычислений. В связи с этим в данной работе предлагается комбинированный подход. На первом этапе, когда требуется получить хотя бы какое-то работоспособное решение в кратчайшие сроки, целесообразно применение жадного алгоритма. Более того, учитывая специфику исходных данных, могут быть использованы различные вариации жадной стратегии, отличающиеся правилами выбора стартовой точки или критериями локальной оптимизации. Это позволит сформировать несколько базовых вариантов размещения БПЛА для различных сценариев. Однако жадный подход, при всей своей скорости, не гарантирует глобального оптимума. Поэтому на втором этапе полученные результаты будут использованы в качестве отправной точки для генетического алгоритма, основная задача которого - исследовать область решений более глубоко и найти наилучшие из возможных позиций, обеспечивающих максимальную эффективность ретрансляции. В этой работе будут рассмотрены различные вариации жадного алгоритма, которые в дальнейшем станут отправной точкой.

2 Разработанные жадные алгоритмы

Выбор оптимальной позиции БПЛА невозможен без адекватной модели распространения радиоволн, позволяющей оценить, будет ли связь между ретранслятором и наземными абонентами устойчивой. Реальная зона покрытия зависит от сложного переплетения факторов. Определяющее влияние оказывают характеристики окружающей местности: рельеф, наличие высотных зданий, плотность лесного массива - все это создает препятствия на пути сигнала, вызывая отражения, дифракцию и затухание.

Не менее важны и технические параметры самого оборудования: мощность передатчика, чувствительность приемника,

а также тип и диаграмма направленности антенн, установленных как на борту БПЛА, так и у абонентов. Учесть все эти переменные в полном объеме - чрезвычайно сложная задача, требующая детальных геоанных и громоздких вычислений, что зачастую противоречит требованию оперативности.

В рамках данного исследования предлагается использовать подход, основанный на энергетическом расчете радиолонии. Ключевым критерием наличия связи выступает соотношение между допустимым уровнем потерь при распространении сигнала и реальными потерями, возникающими на трассе.

Зона уверенного приема будет очерчена множеством точек, для которых рассчитанные потери на трассе не превышают это допустимое значение. Для определения потерь в зависимости от расстояния между ретранслятором и абонентом будет использована модель Окумура-Хата, дополнительно учитывающая разность высот над уровнем моря в местах нахождения передатчика и приемника. Таким образом, задача сводится к сравнению вычисленного для каждого возможного радиуса покрытия значения потерь с пороговым уровнем.

Предлагается три варианта жадного алгоритма, с помощью которых на следующем этапе будет выявлено лучшее решение путем скрещивания решений генетическим алгоритмом. Задача заключается в том, чтобы покрыть все клетки прямоугольной сетки $N \times N$ (рабочая зона) зонами покрытия БПЛА, минимизируя при этом общее количество БПЛА. Радиус покрытия каждого БПЛА зависит от высоты местности в точке размещения и высот окружающих клеток, потенциальных мест нахождения абонентов с портативной станцией, согласно эмпирической формуле. Входными данными для алгоритма служат матрица высот местности H размером $N \times N$, где каждый элемент $H[i][j]$ соответствует высоте клетки с координатами (i, j) , рабочая частота передатчиков f (в МГц) и допустимый уровень потерь сигнала $L_{\text{доп}}$ (в дБ), превышение которого делает связь неустойчивой. Алгоритм реализует жадную эвристику: на каждом шаге выбирается наилучшая непокрытая клетка для установки нового БПЛА, после чего все клетки, попавшие в его зону, исключаются из дальнейшего рассмотрения.

2.1 Предварительный расчет максимальных зон покрытия

На первом этапе для каждой клетки (x, y) рабочей зоны, где координаты x и y принимают целые значения от 0 до $N-1$, необходимо определить максимальный радиус $R_{\text{max}}(x, y)$, при котором беспилотный летательный аппарат, размещенный в данной точке, сможет обеспечить устойчивую связь со всеми абонентами, находящимися внутри круга этого радиуса. Решение этой задачи требует последовательного перебора пробных целочисленных значений радиуса $d=0, 1, 2, \dots$ вплоть до максимально возможного расстояния между любыми двумя клетками сетки.

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

Для текущего пробного радиуса d рассматриваются все клетки (i, j) , расстояние от центра (x, y) до которых не превышает d , то есть удовлетворяющие условию:

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

Для каждой такой клетки по эмпирической модели Окумура-Хата, дополнительно учитывающей разницу высот местности и адаптированной для условий прямой видимости с учетом высот передатчика и приемника, вычисляется требуемый радиус связи R_t [9].

$$L_U = 69.55 + 26.16 \times \log_{10} f - 13.82 \times \log_{10}(h_{bs} \pm \Delta h) - (0.8 + (1.1 \times \log_{10} f - 0.7) \times (h_{ps} \pm \Delta h)) + (44.9 - 6.55 \times \log_{10}(h_{bs} \pm \Delta h)) \times \log_{10} R_t; \quad (3)$$

где L_U - уровень потерь на трассе распространения радиосигнала (дБ); f - частота передачи сигнала, (МГц); h_{bs} - высота подвеса антенны БС, (м); h_{ps} - высота подвеса антенны ПС, (м); Δh - разность в высотах над уровнем моря в местах нахождения БС и ПС, (м); R_t - расстояние между объектами, (км).

Если для какой-либо из проверяемых клеток окажется, что требуемый радиус меньше фактического расстояния до неё:

$$R_t < \sqrt{(i-x)^2 + (j-y)^2} \quad (4)$$

это означает невозможность установления устойчивой радиосвязи с данным абонентом при текущем пробном радиусе d . В таком случае дальнейшее увеличение радиуса не имеет смысла, и максимально допустимый радиус для позиции (x, y) фиксируется как предыдущее успешное значение:

$$R_{\text{max}}(x, y) = d - 1 \quad (5)$$

Перебор для данной точки прекращается. Если же все клетки внутри круга успешно проходят проверку, радиус d увеличивается на единицу, и процедура повторяется для нового, большего круга. В случае, когда все проверки оказываются успешными вплоть до максимального радиуса $d=d_{\text{max}}$, это значение и становится максимальным радиусом для данной позиции:

$$R_{\text{max}}(x, y) = d_{\text{max}} \quad (6)$$

Выполнив описанные действия для всех клеток рабочей зоны, мы получаем матрицу radius_map , где для каждой точки (x, y) хранится значение максимального радиуса, гарантирующего связь со всеми абонентами внутри соответствующего круга.

Прежде чем переходить непосредственно к размещению, необходимо подготовить структуры данных, которые будут использоваться в дальнейшем. Вводится битовая матрица покрытия C того же размера $N \times N$. Значение $C[i][j]=0$ означает, что клетка (i, j) ещё не обслуживается ни одним из установленных БПЛА, а $C[i][j]=1$ - что она уже покрыта. Изначально все элементы матрицы C устанавливаются в 0 или $C=\text{False}[N][N]$. Также создаётся пустой список D , в который будут последовательно добавляться записи о каждом размещённом БПЛА в формате тройки чисел (x, y, R_{max}) - координаты центра и радиус покрытия. Для количественной оценки нежелательного излучения за пределами рабочей зоны вводится переменная P_{sum} , накапливающая общее количество так называемых «внешних точек» - клеток за границами сетки, попадающих в зоны покрытия установленных ретрансляторов. Начальное значение этой переменной равно нулю.

2.2 Основной цикл размещения

Второй этап для каждого из алгоритмов отличается. Запускается основной цикл, который повторяется до тех пор, пока не будут покрыты все клетки рабочей зоны.

$$\exists(i; j): C[i][j] == 0 \quad (7)$$

На каждом шаге сначала ведётся поиск наилучшего кандидата среди ещё не покрытых клеток. Если клетка уже отмечена как покрытая, она пропускается.

Для каждой итерации проводится инициализация переменных. Первая переменная - K, количество непокрытых клеток, которые окажутся внутри круга радиуса R с центром в (x,y). Начальное значение -1 гарантирует, что любой кандидат с $K \geq 0$ будет лучше. Вторая переменная - P, количество целочисленных точек, лежащих за пределами сетки (то есть с координатами меньше 0 или больше N-1), но попадающих в тот же круг. Изначально бесконечность, чтобы первый же кандидат с любым конечным P стал лучшим (при сравнении). Best_x и Best_y – координаты лучшего кандидата, пока не найдены, равны -1.

Далее кандидат сравнивается с текущим лучшим по следующему правилу: если K больше, чем у лучшего ($K[x][y] > K_{\max}$), или если K равно, но P меньше ($K[x][y] = K_{\max}$ & $P[x][y] < P_{\min}$), то этот кандидат запоминается как новый лучший.

$$\begin{aligned} K[x][y] &= K_{\max} \\ P[x][y] &= P_{\min} \\ [x][y] &= best \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, приоритет отдаётся максимизации пользы внутри зоны, а при равной пользе – минимизации нежелательного покрытия снаружи. Процесс завершается, когда все клетки становятся покрытыми.

$$\forall(i; j): C[i][j] == 1 \quad (9)$$

В конце каждой итерации выбирается точка, с наибольшим радиусом. В список D добавляются координаты и радиус БПЛА. Все клетки, находящиеся внутри радиуса, помечаются как покрытые с помощью функции mark_c. К значению переменной P_{sum} добавляется значение P данной точки.

В случае, если на каком-то шаге не найдётся ни одного кандидата с положительным значением K (что может свидетельствовать о недостижимости оставшихся клеток из-за особенностей рельефа), алгоритм также завершает работу, но в условиях задачи предполагается, что полное покрытие достижимо.

Во втором варианте алгоритма подсчитываются те же две величины, однако кандидат сравнивается с текущим лучшим по следующему правилу: если P меньше, чем у лучшего ($P[x][y] < P_{\min}$), или если P равно, но K больше ($P[x][y] = P_{\min}$ & $K[x][y] > K_{\max}$), то этот кандидат запоминается как новый лучший. Таким образом, приоритет отдаётся минимизации нежелательного покрытия снаружи, а при равных значениях - максимизации внутри зоны.

Третий вариант алгоритма полностью игнорирует точки за пределами рабочей зоны. Здесь главным показателем выступает максимально возможный радиус БПЛА R. Среди непокрытых клеток ищется та, у которой значение R наибольшее. При равенстве радиусов предпочтение отдаётся кандидату с большим K. Поскольку P никак не влияет на выбор, внешняя площадь может оказаться значительной.

2.3 Визуализация расчетов

По окончании работы алгоритмов формируется список координат БПЛА и их радиусов. Для наглядного представления результатов строится визуализация: карта высот отображается цветовой заливкой, на неё наносятся красные точки в местах установки БПЛА и красные пунктирные круги, соответствующие зонам покрытия каждого БПЛА. Такое графическое представление позволяет оценить, насколько равномерно распределены БПЛА и есть ли выход зон покрытия за пределы рабочей зоны. Таким образом, алгоритмы полностью автоматически, без вмешательства пользователя, определяют позиции БПЛА, обеспечивая полное покрытие при минимизации лишней площади и общего количества устройств. Детерминированность вычислений гарантирует, что для одних и тех же входных данных результат будет всегда одинаковым. На рис. 1 представлен первый вариант жадного алгоритма.

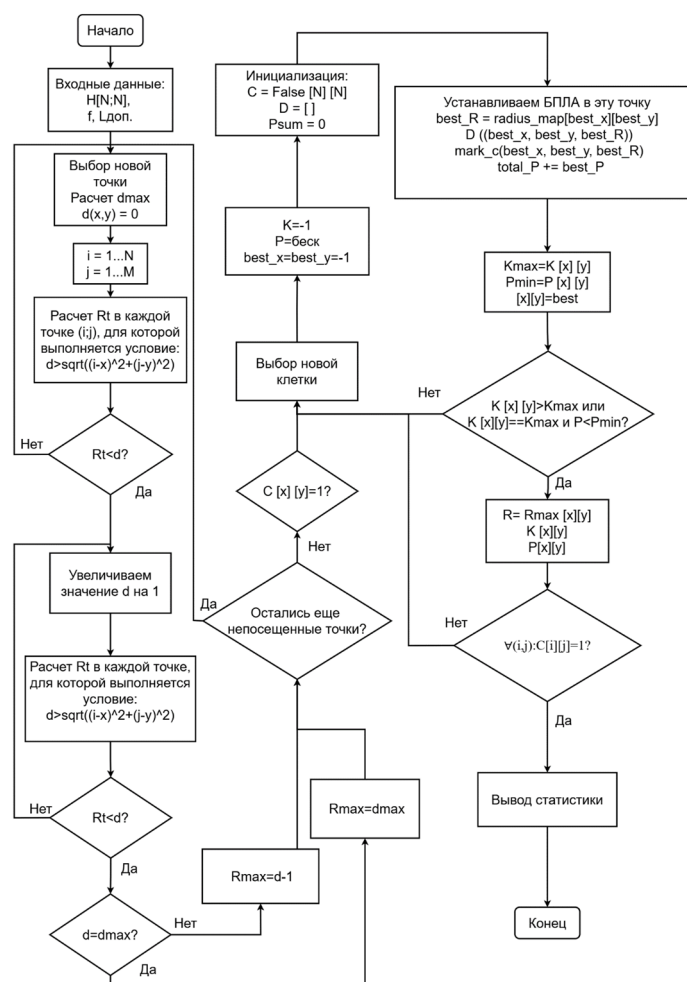


Рис. 1. Жадный алгоритм №1

Для проведения вычислительных экспериментов и визуализации было разработано специализированное программное обеспечение на языке Python. Расчёт радиусов покрытия БПЛА, жадные алгоритмы размещения, а также построение карт высот и зон покрытия реализованы с использованием библиотек NumPy и Matplotlib. Для сравнения эффективности трёх разработанных жадных алгоритмов в программном обеспечении была реализована возможность последовательного запуска каждого из них на одних и тех же входных данных. В качестве входных данных использовалась матрица высот размером 20×20 клеток, сгенерированная случайным образом (начальное значение генератора случайных чисел фиксировано для воспроизводимости результатов). Допустимый уровень потерь на трассе распространения сигнала был принят равным 120 дБ.

В ходе выполнения каждого алгоритма в консоль выводилась пошаговая информация о выбранной позиции БПЛА, его радиусе, количестве вновь покрытых клеток внутри рабочей зоны и числе точек покрытия за её пределами (рис. 2). По окончании работы алгоритма рассчитывались и выводились итоговые метрики:

- общее количество размещённых БПЛА;
- суммарное количество внешних точек покрытия (с учётом возможных пересечений зон);
- уникальная внешняя площадь — количество различных клеток вне рабочей зоны, попавших в зону покрытия хотя бы одного БПЛА;
- доля уникального внешнего покрытия относительно общей покрытой площади.

```

АЛГОРИТМ 1: максимизация inside, затем минимизация outside
Предвычисление радиусов...
Радиусы вычислены.
Шаг 1: дрон в (3, 6) с радиусом 3, покрыто 29 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 2: дрон в (2, 16) с радиусом 3, покрыто 28 новых клеток, внешних точек 1
Шаг 3: дрон в (15, 18) с радиусом 3, покрыто 23 новых клеток, внешних точек 6
Шаг 4: дрон в (18, 6) с радиусом 3, покрыто 23 новых клеток, внешних точек 6
Шаг 5: дрон в (6, 4) с радиусом 3, покрыто 21 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 6: дрон в (2, 1) с радиусом 3, покрыто 18 новых клеток, внешних точек 7
Шаг 7: дрон в (19, 12) с радиусом 3, покрыто 18 новых клеток, внешних точек 11
Шаг 8: дрон в (18, 1) с радиусом 3, покрыто 16 новых клеток, внешних точек 11
Шаг 9: дрон в (4, 11) с радиусом 2, покрыто 13 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 10: дрон в (7, 9) с радиусом 2, покрыто 13 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 11: дрон в (7, 14) с радиусом 2, покрыто 13 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 12: дрон в (9, 17) с радиусом 2, покрыто 13 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 13: дрон в (10, 7) с радиусом 2, покрыто 13 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 14: дрон в (10, 12) с радиусом 2, покрыто 13 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 15: дрон в (11, 2) с радиусом 2, покрыто 13 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 16: дрон в (13, 5) с радиусом 2, покрыто 13 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 17: дрон в (13, 10) с радиусом 2, покрыто 13 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 18: дрон в (12, 15) с радиусом 2, покрыто 12 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 19: дрон в (15, 13) с радиусом 2, покрыто 10 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 20: дрон в (1, 11) с радиусом 2, покрыто 10 новых клеток, внешних точек 1
Шаг 21: дрон в (6, 18) с радиусом 2, покрыто 9 новых клеток, внешних точек 1
Шаг 22: дрон в (14, 1) с радиусом 2, покрыто 8 новых клеток, внешних точек 1
Шаг 23: дрон в (8, 0) с радиусом 2, покрыто 8 новых клеток, внешних точек 4
Шаг 24: дрон в (15, 9) с радиусом 2, покрыто 7 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 25: дрон в (18, 17) с радиусом 2, покрыто 7 новых клеток, внешних точек 1
Шаг 26: дрон в (10, 19) с радиусом 2, покрыто 5 новых клеток, внешних точек 4
Шаг 27: дрон в (5, 13) с радиусом 2, покрыто 4 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 28: дрон в (0, 7) с радиусом 2, покрыто 4 новых клеток, внешних точек 4
Шаг 29: дрон в (9, 3) с радиусом 2, покрыто 3 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 30: дрон в (3, 19) с радиусом 2, покрыто 3 новых клеток, внешних точек 4
Шаг 31: дрон в (8, 11) с радиусом 2, покрыто 2 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 32: дрон в (11, 9) с радиусом 2, покрыто 2 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 33: дрон в (15, 3) с радиусом 2, покрыто 2 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 34: дрон в (16, 15) с радиусом 1, покрыто 2 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 35: дрон в (2, 9) с радиусом 1, покрыто 1 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 36: дрон в (14, 7) с радиусом 2, покрыто 1 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 37: дрон в (16, 11) с радиусом 2, покрыто 1 новых клеток, внешних точек 0
Шаг 38: дрон в (0, 4) с радиусом 2, покрыто 1 новых клеток, внешних точек 4
Шаг 39: дрон в (0, 13) с радиусом 2, покрыто 1 новых клеток, внешних точек 4
Шаг 40: дрон в (5, 0) с радиусом 2, покрыто 1 новых клеток, внешних точек 4
Шаг 41: дрон в (12, 0) с радиусом 2, покрыто 1 новых клеток, внешних точек 4
Шаг 42: дрон в (0, 19) с радиусом 2, покрыто 1 новых клеток, внешних точек 7
Шаг 43: дрон в (19, 19) с радиусом 2, покрыто 1 новых клеток, внешних точек 7

=== Итоговая статистика (алгоритм 1) ===
Количество дронов: 43
Сумма внешних точек (с повторами): 92
Уникальная внешняя площадь: 91
Уникальная доля внешнего покрытия: 18.53%
    
```

Рис. 2. Пример выводных данных

Для наглядного сопоставления результатов работы каждого алгоритма производилась визуализация карты высот с наложенными зонами покрытия БПЛА, что позволяло качественно оценить характер размещения. Благодаря детерминированности алгоритмов, повторные запуски на тех же данных давали идентичные результаты, что обеспечивало корректность сравнения (рис. 3).

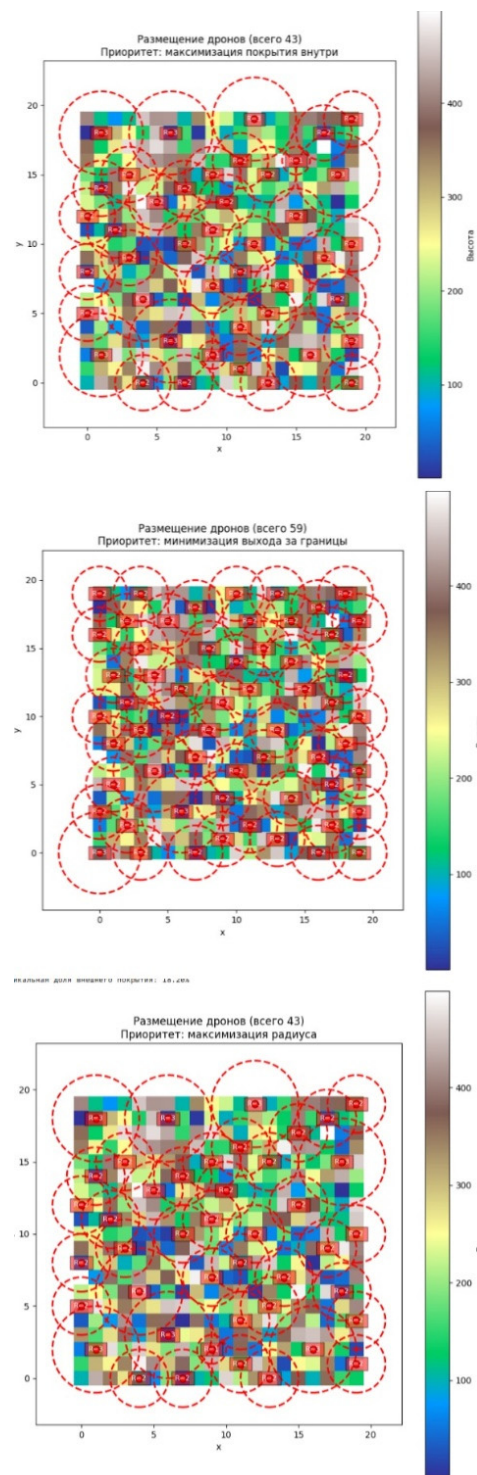


Рис. 3. Визуализация расчетов

Проведённое сравнение позволило выявить особенности каждого подхода:

- алгоритм, максимизирующий покрытие внутри зоны, показал количество БПЛА равное 43;
- алгоритм с приоритетом минимизации выхода за границы привёл к увеличению числа БПЛА, но не всегда к уменьшению уникальной внешней площади;
- алгоритм, ориентированный на максимальный радиус, дал результаты, близкие к первому, но с иным распределением БПЛА.

2.4 Сравнительный анализ

Дополнительно был проведен эксперимент, включавший десять тестов на различных случайных картах высот (размер сетки 20×20), были получены количественные характеристики трёх жадных алгоритмов размещения БПЛА. Для каждого теста фиксировалось количество размещённых БПЛА и уникальная площадь покрытия вне рабочей зоны. Результаты позволяют выявить устойчивые закономерности поведения алгоритмов и сделать обоснованные выводы об их эффективности (рис. 4).

```

--- Тест 1 (seed=0) ---
Алг.1: дронов=43, уникальная внешняя площадь=88
Алг.2: дронов=56, уникальная внешняя площадь=75
Алг.3: дронов=44, уникальная внешняя площадь=100

--- Тест 2 (seed=1) ---
Алг.1: дронов=39, уникальная внешняя площадь=68
Алг.2: дронов=55, уникальная внешняя площадь=76
Алг.3: дронов=37, уникальная внешняя площадь=86

--- Тест 3 (seed=2) ---
Алг.1: дронов=40, уникальная внешняя площадь=96
Алг.2: дронов=56, уникальная внешняя площадь=72
Алг.3: дронов=37, уникальная внешняя площадь=99

--- Тест 4 (seed=3) ---
Алг.1: дронов=43, уникальная внешняя площадь=87
Алг.2: дронов=54, уникальная внешняя площадь=70
Алг.3: дронов=42, уникальная внешняя площадь=93

--- Тест 5 (seed=4) ---
Алг.1: дронов=43, уникальная внешняя площадь=74
Алг.2: дронов=59, уникальная внешняя площадь=64
Алг.3: дронов=43, уникальная внешняя площадь=87

--- Тест 6 (seed=5) ---
Алг.1: дронов=40, уникальная внешняя площадь=100
Алг.2: дронов=57, уникальная внешняя площадь=83
Алг.3: дронов=40, уникальная внешняя площадь=112

--- Тест 7 (seed=6) ---
Алг.1: дронов=44, уникальная внешняя площадь=81
Алг.2: дронов=55, уникальная внешняя площадь=67
Алг.3: дронов=45, уникальная внешняя площадь=89

--- Тест 8 (seed=7) ---
Алг.1: дронов=41, уникальная внешняя площадь=114
Алг.2: дронов=56, уникальная внешняя площадь=75
Алг.3: дронов=40, уникальная внешняя площадь=108

--- Тест 9 (seed=8) ---
Алг.1: дронов=43, уникальная внешняя площадь=72
Алг.2: дронов=57, уникальная внешняя площадь=62
Алг.3: дронов=44, уникальная внешняя площадь=71

--- Тест 10 (seed=9) ---
Алг.1: дронов=39, уникальная внешняя площадь=72
Алг.2: дронов=54, уникальная внешняя площадь=61
Алг.3: дронов=40, уникальная внешняя площадь=99

```

Рис. 4. Сравнение результатов расчетов алгоритмов

Первый алгоритм, ориентированный на максимизацию покрытия внутри зоны с последующей минимизацией выхода за границы, демонстрирует сбалансированные результаты.

Он использует умеренное количество БПЛА (в среднем около 42) и обеспечивает сравнительно невысокую внешнюю площадь (85 клеток). При этом разброс значений как по числу БПЛА (от 39 до 44), так и по внешней площади (от 68 до 114) указывает на чувствительность к рельефу, но в целом алгоритм сохраняет предсказуемость.

Второй алгоритм, ставящий во главу угла минимизацию выхода за границы на каждом шаге, закономерно приводит к значительному увеличению числа БПЛА – в среднем 56, что больше, чем у алгоритмов 1 и 3. Однако это позволяет достичь наименьшей уникальной внешней площади (в среднем 70 клеток). Таким образом, алгоритм 2 эффективен, если приоритетом является жёсткое ограничение нежелательного покрытия, даже ценой роста количества устройств. Стабильность внешней площади (диапазон 61-83) подтверждает, что стратегия последовательной минимизации выхода работает предсказуемо.

Третий алгоритм, выбирающий позиции с максимальным радиусом, даёт примерно то же количество БПЛА, что и первый алгоритм, но при этом характеризуется наибольшей внешней площадью (94 клетки) и самым широким её разбросом (от 71 до 112). Это объясняется тем, что крупные БПЛА, размещаемые в первую очередь, могут значительно выходить за границы, и этот эффект не компенсируется последующими мелкими дронами.

3 Заключение

В представленной работе была рассмотрена актуальная задача оперативного развертывания систем связи с использованием беспилотных летательных аппаратов, выступающих в роли воздушных ретрансляторов. В ходе исследования были проанализированы существующие виды подвижной связи, обоснованы преимущества транкинговой связи как наиболее подходящей для решения задач оперативной координации, а также показана необходимость поиска эффективных алгоритмов размещения БПЛА в условиях, когда развертывание стационарной инфраструктуры невозможно или нецелесообразно.

В рамках работы были разработаны и программно реализованы три варианта жадного алгоритма размещения ретрансляторов, каждый из которых руководствуется собственной стратегией выбора позиций: максимизация покрытия внутри рабочей зоны, минимизация выхода сигнала за её границы и приоритет максимального радиуса действия. Проведённое имитационное моделирование на сетке 20×20 со случайным рельефом позволило выявить сильные и слабые стороны каждого подхода.

Полученные в ходе вычислительных экспериментов результаты имеют не только самостоятельное значение, но и служат основой для следующего этапа исследований. Сформированные жадными алгоритмами наборы позиций БПЛА представляют собой качественные начальные приближения, которые могут быть использованы в качестве стартовой популяции для генетического алгоритма.

Дальнейшее развитие исследований может быть направлено в несколько сторон. Во-первых, представляет интерес адаптация предложенного подхода к динамическим сценариям, когда положение абонентов или рельеф местности могут изменяться в реальном времени.

Во-вторых, перспективным направлением является учёт не только количества покрытых абонентов, но и качества канала связи, включая соотношение сигнал/шум и помеховую обстановку. Наконец, важным шагом станет переход от двумерной модели к трёхмерной, учитывающей не только высоты рельефа, но и препятствия в виде зданий и растительности, что позволит приблизить модель к реальным условиям городской или лесной местности.

Литература

1. Буснюк Н.Н., Мельянец Г.И. Системы мобильной связи: учебное пособие для вузов, 2-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань, 2023. 128 с.
2. Хазан В.Л. Системы специальной радиосвязи: учебное пособие. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. 236 с.
3. Kodheli O., Lagunas E., Maturo N., Sharma S.K., Shankar B., Montoya J.F.M., Duncan J.C.M., Spano D., Chatzinotas S., Kisseleff S., Querol J., Lei L., Vu T.X., Goussetis G. Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2021. Vol. 23, No. 1, pp. 70-109.
4. Роевков Д.Н., Плеханов П.А. Системы мобильной связи. Коротковолновая и спутниковая связь. Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2023. 31 с. ISBN 978-5-7641-1916-8. EDN TGBRVE.
5. Addad R.A., Bagaa M., Taleb T., Dutta D., Flinck H. Optimization Model for Placement of 5G Network Functions for Localization Services // IEEE Transactions on Network and Service Management. 2022. Vol. 19, No. 2, pp. 1809-1825.
6. Росляков А.В. Поколения сетей фиксированной связи f1g-F5G часть 2 // Первая миля. 2023. № 1(109). С. 36-47. DOI 10.22184/2070-8963.2023.109.1.36.46. EDN ODRGNG.
7. Baldini G., Karanasios S., Allen D., Vergari F. Survey of Wireless Communication Technologies for Public Safety // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2022.
8. Шорин О.А., Каспаров Р.Ю. Российский рынок профессиональной радиосвязи и критически важных коммуникаций: перспективы // Электросвязь. 2021, №6. С. 14-24.
9. Реформат А.Г., Сосунов В.Г., Плыгунов О.В. Обзор методик расчета зон покрытия базовых станций сетей подвижной радиосвязи // Символ науки: Международный научный журнал. 2015, №5. С.51-55.
10. 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.
11. Крижановский М.Н., Тихонова О.В. Методика расстановки базовых станций системы локального позиционирования в рабочей зоне с препятствиями // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2024. Т. 12, № 2(45). DOI 10.26102/2310-6018/2024.45.2.037. EDN AMTTND.
12. Степанов О.А., Рожков В.Н. Применение эвристических алгоритмов для формирования начальной популяции при оптимизации целераспределения с использованием генетических алгоритмов // Научный вестник. Развитие систем управления. 2024. № 3. С. 35-40. EDN KTMECY.
13. Leonov A.V. Applying Bio-Inspired Algorithms to Routing Problem Solution in FANET // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2017. Т. 17, № 2. С. 5-23. DOI: 10.14529/cter170201
14. Адонин Л.С., Владыко А.Г. Алгоритмы роевого интеллекта для решения задач оптимизации в системах телекоммуникаций // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11, № 3. С. 7-24. DOI 10.31854/1813-324X-2025-11-3-7-24. EDN JUAAMB.
15. 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.
16. 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.
17. 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. 3101.
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. Костин А.С., Кучко Д.В. Исследование алгоритма маршрутизации для решения задачи коммивояжера на примере алгоритма муравьиной колонии // Системный анализ и логистика. 2023. № 4(38). С. 47-53. DOI 10.31799/2077-5687-2023-4-47-53. EDN VTXDDL.
20. 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 ENPOP.

GREEDY ALGORITHMS FOR POSITIONING UAV-RETRANSLATORS IN TRUNKING COMMUNICATION SYSTEMS

Vyacheslav S. Ivanov, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia, ivanov_vs@mirea.ru

Saygid U. Uvajsov, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia, uvajsov@mirea.ru

Abstract

In this paper, the task of operational deployment of trunking communication systems using unmanned aerial vehicles performing the functions of aerial repeaters is investigated. As a criterion for the availability of a stable connection between the repeater and ground subscribers, the ratio between the permissible level of signal loss and actual losses along the propagation path is considered, calculated using the Okumura-Hata empirical model adapted to account for terrain and elevation differences. To determine the positions of unmanned aerial vehicles, it is proposed to use greedy heuristic algorithms that ensure an acceptable calculation speed in conditions of limited decision-making time. A comparative evaluation of three variants of the greedy algorithm is carried out, which differ in the rules for choosing the placement point at each step. Using this assessment, a conclusion is made about the suitability of each approach in terms of the balance between the number of repeaters used and the area of undesirable coverage outside the service area, and the results of computational experiments on a grid with random relief are presented. At the current stage, it is assumed that the solutions obtained by greedy algorithms will be used as the initial population for a genetic algorithm that performs a deeper search for the global optimum. Software has been developed in Python to visually visualize coverage areas and analyze the results.

Keywords: UAVs, communication repeater, trunking communication systems, greedy algorithm, heuristic algorithms..

References

- [1] N.N. Busnyuk, G.I. Melianets, "Mobile Communication Systems: Textbook for Universities," 2nd ed., ster. Saint Petersburg: Lan, 2023. 128 p.
- [2] V.L. Khazan, "Special Radio Communication Systems: Textbook," Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 2025. 236 p.
- [3] O. Kodheli, E. Lagunas, N. Maturo, S.K. Sharma, B. Shankar, J.F.M. Montoya, J.C.M. Duncan, D. Spano, S. Chatzinotas, S. Kisseleff, J. Querol, L. Lei, T.X. Vu, "Goussetis G. Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2021. Vol. 23, No. 1, pp. 70-109.
- [4] D.N. Roenkov, P.A. Plekhanov, "Mobile Communication Systems. Shortwave and Satellite Communication," St. Petersburg: St. Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I, 2023. 31 p. ISBN 978-5-7641-1916-8.
- [5] R.A., Addad, M., Bagaa, T. Taleb, D. Dutta, H. Flinck, "Optimization Model for Placement of 5G Network Functions for Localization Services," *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2022. Vol. 19, No. 2, pp. 1809-1825.
- [6] A. V. Roslyako, "Generations of Fixed Communication Networks f1g-F5G Part 2 / v," *First Mile*. 2023. No. 1(109), pp. 36-47. DOI 10.22184/2070-8963.2023.109.1.36.46. - EDN ODRGNG.
- [7] G. Baldini, S. Karanasios, D. Allen, F. Vergari, "Survey of Wireless Communication Technologies for Public Safety," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2022.
- [8] O.A. Shorin, R.Yu. Kaspari, "Russian Market of Professional Radio Communication and Critical Communications: Prospects," *Elektrosvyaz*. 2021, No.6, pp.14-24.
- [9] A.G. Reformat, V.G. Sosunov, O.V. Plygunov, "Overview of Methods for Calculating Coverage Zones of Base Stations in Mobile Radio Communication Networks," *Symbol of Science: International Scientific Journal*. 2015, No. 5, pp. 51-55.
- [10] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, M. Debbah, "A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, No. 3, pp. 2334-2360.
- [11] M. N. Krizhanovsky, O. V. Tikhonova, "Methodology for Placing Base Stations of a Local Positioning System in an Obstructed Working Area," *Modeling, Optimization, and Information Technologies*. 2024. Vol. 12, No. 2(45). DOI 10.26102/2310-6018/2024.45.2.037.
- [12] O. A. Stepanov, V. N. Rozhkov, "Application of heuristic algorithms for the formation of the initial population in the optimization of target allocation using genetic algorithms," *Scientific Bulletin. Development of Control Systems*. 2024. No. 3, pp. 35-40.
- [13] A.V. Leonov, "Applying Bio-Inspired Algorithms to Routing Problem Solution in FANET," *Bulletin of the South Ural State University. Series "Computer Technologies, Control, and Radioelectronics"*. 2017. Vol. 17, No. 2, pp. 5-23. DOI: 10.14529/ctcr170201.
- [14] L. S. Adonin, A. G. Vladko, "Swarm Intelligence Algorithms for Solving Optimization Problems in Telecommunication Systems," *Proceedings of Communications Educational Institutions*. 2025. Vol. 11, No. 3, pp. 7-24. DOI 10.31854/1813-324X-2025-11-3-7-24.
- [15] D. A. Perepelkin, V. T. Nguyen, "Intelligent Multi-Path Routing in Software-Defined Networks Based on the Artificial Bee Colony Algorithm," *Information Technologies*. 2022. Vol. 28, No. 8, pp. 395-404. DOI 10.17587/it.28.395-404.
- [16] K. V. Egorova, "Simulation model of flight control of a group of unmanned aerial vehicles based on the bee colony algorithm," *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2023. Vol. 19, No. 2, pp. 68-71. DOI 10.36622/VSTU.2023.19.2.010.
- [17] Y. Chen, N. Li, X. Zhong, W. Xie, "Joint Trajectory and Scheduling Optimization for The Mobile UAV Aerial Base Station: A Fairness Version," *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, No. 15. 3101.
- [18] X. Wen, Y. Ruan, Y. Li, H. Xia, R. Zhang, C. Wang, W. Liu, X. Jiang, "Improved Genetic Algorithm based 3-D deployment of UAV," *Journal of Communications and Networks*. 2022. Vol. 24, No. 2, pp 223-231. DOI: 10.23919/JCN.2022.000014
- [19] A. S. Kostin, D. V. Kuchko, "Research of the Routing Algorithm for Solving the Traveling Salesman Problem Using the Ant Colony Algorithm," *System Analysis and Logistics*. 2023. No. 4(38), pp. 47-53. DOI 10.31799/2077-5687-2023-4-47-53.
- [20] V. S. Ivanov, S. U. Uvajsov, and I. A. Ivanov, "Algorithm for Automatic Placement of Base Stations in Trunking Communication Systems," *Proceedings of Communications Educational Institutions*. 2023. Vol. 9, No. 5, pp. 25-34. DOI 10.31854/1813-324X-2023-9-5-25-34.