

УДК 004.75
<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2024-12-3-1-12>
EDN: CIQWAM

Трехмерное размещение воздушных базовых станций для поддержки наземной сети на основе адаптивной оптимизации роя частиц

Чан Т. З., Кучерявыи А. Е.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи: В условиях растущей нагрузки на наземные сети связи требуется внедрение новых решений для обеспечения стабильного и качественного обслуживания пользователей. Одним из перспективных подходов является применение воздушных базовых станций (ABS, аббр. от англ. Aerial Base Stations), которые могут оперативно развертываться в районах с высокой плотностью пользователей или при чрезвычайных ситуациях. В данной статье рассматривается задача трехмерного размещения ABS с целью поддержки наземной сети связи в условиях, когда количество пользователей превышает возможности существующей наземной инфраструктуры. Основная цель этой работы – определить минимальное количество ABS и их оптимальное расположение с учетом удовлетворения требований к обслуживанию пользователей. Однако это NP-сложная задача (NP-трудность – недетерминированная полиномиальная трудность по времени), поэтому для решения проблемы предлагается использовать адаптивную оптимизацию скопления частиц. **Научная новизна** предлагаемого подхода заключается в разработке метода оптимизации трехмерного размещения ABS с использованием адаптивного алгоритма роя частиц, направленного на минимизацию количества ABS при сохранении высокого качества обслуживания пользователей. В отличие от классического метода роя частиц, предложенный алгоритм позволяет подключить большее число пользователей к ABS за счет повышения эффективности распределения ресурсов и выбора местоположения ABS. **Результаты** моделирования показывают, что данный алгоритм обеспечивает высокие показатели охвата в средах с различным распределением пользователей. **Практическая значимость:** результаты могут быть использованы при планировании и размещении ABS в условиях перегрузки или чрезвычайных ситуаций для обеспечения устойчивого покрытия.

Ключевые слова: воздушные базовые станции, трехмерное размещение, наземные базовые станции, покрытие, пропускная способность, адаптивная оптимизация роя частиц

1. Введение

Системы 5G обеспечивают масштабируемое подключение, сверхнадежную связь с низкой задержкой и высокую скорость передачи данных, что позво-

Библиографическая ссылка на статью:

Чан Т. З., Кучерявыи А. Е. Трехмерное размещение воздушных базовых станций для поддержки наземной сети на основе адаптивной оптимизации роя частиц // Информационные технологии и телекоммуникации. 2024. Т. 12. № 3. С. 1–12. DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-3-1-12. EDN: CIQWAM

Reference for citation:

Tran T. D., Kucheryavy A. E. 3-D Placement of Aerial Base Stations to Support Terrestrial Network Based on Adaptive Particle Swarm Optimization. *Telecom IT*. 2024. Vol. 12. Iss. 3. PP. 1–12. (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-3-1-12. EDN: CIQWAM

ляет «умным» устройствам (на базе технологии Интернета вещей (IoT, *аббр. от англ.* Internet of Things) – датчикам и смартфонам – эффективно обмениваться данными [1, 2]. Ожидается, что к 2025 г. число IoT-устройств достигнет 100 млрд, что потребует значительных сетевых ресурсов [3]. Наземные базовые станции (GBS, *аббр. от англ.* Ground Base Stations) поддерживают IoT, однако они не охватывают удаленные районы и уязвимы к разрушению. Такие решения, как D2D и спутниковая связь, имеют свои ограничения: сложную маршрутизацию и высокую задержку [4]. В этом контексте воздушные базовые станции (ABS, *аббр. от англ.* Aerial Base Stations) становятся эффективным решением благодаря мобильности, низкой стоимости и простоте развертывания.

Воздушные платформы находят применение в гражданской, коммерческой и военной сферах [5, 6]. В беспроводных сетях они выполняют функции ABS и агрегаторов данных [7]. Несмотря на технологический прогресс, такие станции требуют регулярной подзарядки и подвержены помехам. Оптимизация их положения в трехмерном пространстве позволяет продлить время работы, снизить интерференцию и улучшить покрытие. В данной статье рассматривается задача размещения нескольких ABS для поддержки наземной сети и покрытия стационарных пользователей. В условиях массовых мероприятий число пользователей превышает возможности GBS, что делает использование ABS оптимальным решением. В работе анализируется их размещение с минимальным количеством устройств при соблюдении требований к качеству обслуживания.

2. Модель Сети

В городской среде находятся N пользователей, каждый пользователь i из которых имеет координаты (x_i, y_i, h_i) . Кроме того, в рассматриваемой зоне размещены N_g GBS. Однако число пользователей превышает возможности наземной инфраструктуры, что требует дополнительного покрытия. Для решения этой проблемы предлагается развернуть N_a ABS. Трехмерное размещение каждой ABS a , $a \in \{1, \dots, N_a\}$, определяется координатами (x_a, y_a, h_a) .

В беспроводных сетях связь между ABS и пользователями не всегда осуществляется в условиях прямой видимости (LoS, *аббр. от англ.* Line-of-Sight) из-за препятствий в виде зданий и деревьев, поэтому важно соединение между объектами в условиях отсутствия прямой видимости (NLoS, *аббр. от англ.* Non Line-of-Sight). В данной работе рассматривается сложная городская среда, где канал «воздух–земля» (A2G, *аббр. от англ.* Air-to-Ground) включает LoS- и NLoS-соединения.

Вероятность соединения в условиях LoS между ABS и пользователем определяется [8] по выражению:

$$\Pr^{LoS} = \frac{1}{1 + s_1 e^{(-s_2(\theta - s_1))}}, \quad (1)$$

где s_1 и s_2 – параметры окружающей среды (сельская, городская и т. д.); h_a – высота полета ABS; $r_{a,i}$ – горизонтальное расстояние между ABS и пользователе-

лем; $\theta = \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{h_a}{r_{a,i}}\right)$ – угол места, зависящий от высоты полета ABS и горизонтального расстояния между станцией и пользователем.

Вероятность соединения в условиях NLoS между ABS и пользователем равна $\Pr^{NLoS} = 1 - \Pr^{LoS}$.

Согласно [9], общие средние потери на трассе включают в себя потери при наличии соединения в условиях LoS и NLoS, и рассчитываются следующим образом:

$$PL_{ABS}(\text{дБ}) = \frac{R}{1 + s_1 e^{(-s_2(\theta - s_1))}} + 10\log(d_{a,i}^2) + T, \quad (2)$$

где $R = \zeta_{LoS} - \zeta_{NLoS}$; ζ_{LoS} и ζ_{NLoS} – средние дополнительные потери для соединений в условиях LoS и NLoS; $d_{a,i} = \sqrt{h_a^2 + r_{a,i}^2}$ – трехмерное расстояние от ABS до пользователя i ; $T = 20\log\left(\frac{4\pi f_a}{c}\right) + \zeta_{NLoS}$; f_a – частота работы ABS; c – скорость света.

В исследовании прогнозируются потери в канале «земля–земля» с использованием модели затухания сигнала Ericsson [10]:

$$\begin{aligned} PL_{GBS} = & a_0 + a_1 \log_{10}(d_{GBS}) + a_2 \log_{10}(h_{GBS}) + \\ & + a_3 \log_{10}(h_{GBS}) \log_{10}(d_{GBS}) - 3,2(\log_{10}(11,75h_i))^2 + g(f_{GBS}), \end{aligned} \quad (3)$$

где f_{GBS} – частота работы GBS (МГц); d_{GBS} – расстояние между GBS и пользователем; h_{GBS} и h_i – высоты GBS и пользователя (м), соответственно, $g(f_{GBS})$ – корректирующая функция по частоте, учитывающая влияние частоты на потери при распространении сигнала:

$$g(f_{GBS}) = 44,49 \log_{10}(f_{GBS}) - 4,78 (\log_{10}(f_{GBS}))^2, \quad (4)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3 – это параметры модели, значения которых зависят от окружающей среды и приведены в [11].

3. Формулировка задачи

В интересах поиска минимального количества ABS и их оптимального расположения с учетом удовлетворения требований к обслуживанию пользователей требуется проанализировать зоны покрытия базовых станций и пропускную способность ABS.

Анализ зоны покрытия базовых станций

В данном разделе анализируется зона покрытия базовых станций (как GBS, так и ABS). Чтобы точно определить, подключен ли пользователь, учитывается соотношение сигнала исходящей линии связи к уровню помех и шума (SINR,

аббр. от англ. Signal-to-Interference-Noise Ratio). Пользователь считается подключенным к базовой станции, если его значение $SINR$ превышает пороговое значение $SINR_0$. В противном случае, если $SINR$ пользователя ниже порогового уровня, соединение с базовой станцией отсутствует.

Канал A2G между ABS и пользователем моделируется с помощью γ -распределения Накагами, при этом коэффициент затухания подчиняется независимому гамма-распределению. В то же время канал связи между GBS и пользователем испытывает затухание Рэлея, вызванное многолучевыми отражениями и препятствиями [12]. Значит, усиление мощности канала моделируется следующим образом: для канала A2G используется гамма-распределение, а для канала «GBS–пользователь» – экспоненциальное распределение [13].

Предположим, что мощность передачи ABS составляет P_a , а шум является аддитивным белым гауссовским шумом со средним значением 0 и дисперсией σ^2 . Все ABS используют одну частоту и мощность передачи. Следовательно, значение $SINR$ пользователя i от ABS a определяется по выражению:

$$SINR_{a,i}^{ABS} = \frac{P_a h_{a,i} PL_{a,i}^{-1}(d_{a,i})}{\sum_{a'=1, a' \neq a}^{N_a} P_a h_{a',i} PL_{a',i}^{-1}(d_{a',i}) + \sigma^2}, \quad (5)$$

где $\sum_{a'=1, a' \neq a}^{N_a} P_a h_{a',i} PL_{a',i}^{-1}(d_{a',i})$ – это суммарная помеха в канале, получаемая пользователем i от всех ABS a' , кроме ABS a ; $h_{a,i}$ – коэффициент усиления канала между ABS a и пользователем i ; $PL_{a,i}^{-1}(d_{a,i})$ – потери распространения между ABS a и пользователем i ; $d_{a,i}$ – расстояние от ABS a до пользователя i .

Аналогично для GBS при передаче мощности GBS P_{GBS} значение $SINR$ пользователя i от GBS может быть определена как:

$$SINR_{g,i}^{GBS} = \frac{P_{GBS} h_{g,i} PL_{g,i}^{-1}(d_{g,i})}{\sum_{g'=1, g' \neq g}^{N_g} P_{GBS} h_{g',i} PL_{g',i}^{-1}(d_{g',i}) + \sigma^2}. \quad (6)$$

Анализ пропускной способности ABS

В данной части анализируется пропускная способность ABS. Несмотря на способность ABS охватывать большую территорию, их пропускная способность ограничена. Поэтому целесообразно ввести параметр $\rho_{a,k}(x_a, y_a, h_a)$, характеризующий присутствие ABS a в подзоне k следующим образом:

$$\rho_{a,k}(x_a, y_a, h_a) = \frac{S_{a,k}(x_a, y_a, h_a)}{S_a}, \quad (7)$$

где $S_{a,k}(x_a, y_a, h_a)$ – площадь, покрываемая ABS a с координатами (x_a, y_a, h_a) , которая пересекается с подзоной k ; S_a – общая площадь покрытия ABS a .

Предположим, что максимальное количество пользователей, которых может обслуживать одна ABS, равно N^{ABS} . Следовательно, должны соблюдаться ограничения по пропускной способности:

$$\sum_1^{N_a} N^{ABS} \rho_{a,k}(x_a, y_a, h_a) \geq \lambda_k A_k, \quad (8)$$

где λ_k , A_k — плотность пользователей и площадь подзоны k , соответственно.

4. Решение задачи

Для решения задачи поиска оптимального местоположения ABS в трехмерном пространстве широко используется метод роя частиц (PSO, *аббр. от англ. Particle Swarm Optimization*) — алгоритм, основанный на социальном поведении рыб и птиц, в котором каждый член стаи рассматривается как частица; эти частицы изменяют свое положение до тех пор, пока не найдут глобально оптимальное решение на основе собственного опыта.

Традиционный алгоритм PSO инициализирует группу из L частиц. Каждая частица содержит трехмерные координаты всех ABS, поэтому размерность каждой частицы равна $3 \times N_a$. Положение и скорость частицы l представлены в виде P_w^l и V_w^l при $w = 1, 2, \dots, 3 \times N_a$. Скорость и положение частицы l будут постоянно обновляться после каждой итерации по следующей формуле:

$$V_w^l(t+1) = \omega V_w^l(t) + c_1 \varphi_1 \left(W_w^{local}(t) - P_w^l(t) \right) + \\ + c_2 \varphi_2 \left(W_w^{global}(t) - P_w^l(t) \right), \quad (9)$$

$$P_w^l(t+1) = P_w^l(t) + V_w^l(t+1), \quad (10)$$

где W_w^{local} — локальное решение для каждой частицы l ; W_w^{global} — глобальное наилучшее решение среди всех частиц роя (лучшие локальные и глобальные решения обновляются на каждой итерации, в результате чего частицы постепенно приближаются к лучшему глобальному оптимуму); ω — коэффициент инерции; c_1 и c_2 — когнитивный и социальный коэффициенты ускорения; φ_1 и φ_2 — два случайных положительных числа.

К основным преимуществам PSO относятся высокая надежность, малое количество параметров и простота реализации. Однако одним из главных недостатков алгоритма является его склонность к преждевременному прекращению поиска — частицы стремятся к решению, которое является локальным оптимумом, то есть точкой, в которой значение целевой функции лучше, чем у соседних решений, но не является наилучшим в пространстве решений. Кроме того, общее количество итераций, необходимое для нахождения действительно глобального наилучшего решения, как правило, довольно велико, а сама процедура оценки требует значительных вычислительных затрат. Следовательно, ускорение сходимости и предотвращение преждевременного прекращения поиска (попадания в

локальные оптимумы) стали двумя важнейшими задачами в рамках совершенствования алгоритма PSO.

Чтобы устранить этот недостаток, предлагается алгоритм адаптивной оптимизации роя частиц (APSO, *аббр. от англ. Adaptive Particle Swarm Optimization*), в который добавляется механизм адаптивной настройки, одновременно регулирующий коэффициент инерции и два коэффициента ускорения. В отличие от PSO, где параметры фиксированы, в APSO они обновляются на каждой итерации в зависимости от текущего значения эволюционного фактора E_f . Конкретные этапы реализации пошагово представлены ниже.

Шаг 1. Вычисление среднего расстояния от каждой частицы l до всех остальных частиц в рое.

Это расстояние можно измерить с помощью евклидова расстояния:

$$d_l = \frac{1}{L-1} \sum_{l'=1, l' \neq l}^L \sqrt{\sum_{k=1}^D (x_l^k - x_{l'}^k)^2}, \quad (11)$$

где L – количество частиц; D – размерность пространства поиска; x_l^k и $x_{l'}^k$ – координаты частиц l и l' по оси k .

Шаг 2. Определение эволюционного фактора E_f по выражению:

$$E_f = \frac{d_g - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}}, \quad (12)$$

где d_g – расстояние между частицей, содержащей глобальное наилучшее решение, и остальными частицами; d_{\max} – максимальное расстояние за весь процесс; d_{\min} – минимальное расстояние за весь процесс.

Шаг 3. Разделение текущего состояния на четыре разновидности: сближение, эксплуатация, изучение и выход, в зависимости от значения эволюционного фактора E_f :

$$\Psi = \begin{cases} \text{Сближение: } 0 \leq E_f \leq 0,25 \\ \text{Эксплуатация: } 0,25 \leq E_f \leq 0,5 \\ \text{Изучение: } 0,5 \leq E_f \leq 0,75 \\ \text{Выход: } 0,75 \leq E_f \leq 1 \end{cases}. \quad (13)$$

Кроме того, коэффициент инерции ω в PSO используется для контроля скорости сходимости локального и глобального поиска. Исследования показали, что коэффициент инерции должен быть выше в начале и ниже по мере сходимости процесса эволюции [14, 15]. Эволюционный фактор E_f имеет некоторые схожие характеристики с коэффициентом инерции ω , так как фактор E_f также относительно велик в состоянии поиска и становится относительно малым в состоянии сходимости. Поэтому коэффициент инерции ω обновляется следующим образом:

$$\omega = \frac{1}{1 + 1,5e^{-2,6 \times E_f}} \in [0.4, 0.9], \quad (14)$$

Шаг 4. Контроль коэффициентов ускорения на основе эволюционного фактора E_f . Корректировка коэффициента ускорения не должна быть слишком резкой. Поэтому в этой статье предлагается использовать параметр Δ в качестве ограничения коэффициентов ускорения между двумя итерациями, и Δ можно выразить следующим образом:

$$\Delta = rand(0,1) \times 0.05 + 0.05, \quad (15)$$

где $rand(0,1)$ – случайное число, равномерно распределенное в интервале $[0, 1]$.

Таким образом, значение Δ будет находиться в диапазоне $[0.05, 0.1]$.

После каждой итерации значения коэффициентов ускорения будут обновляться в зависимости от эволюционного фактора E_f и могут быть рассчитаны по таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты ускорения

Состояние	c_1	c_2
Сближение	$c_1 + \Delta$	$c_2 - \Delta$
Эксплуатация	$c_1 + 0.5 \cdot \Delta$	$c_2 - 0.5 \cdot \Delta$
Изучение	$c_1 + 0.5 \cdot \Delta$	$c_2 + 0.5 \cdot \Delta$
Выход	$c_1 - \Delta$	$c_2 + \Delta$

Далее и когнитивный и социальный коэффициенты ускорения ограничиваются диапазоном $[1.5, 2.5]$. Если сумма двух коэффициентов превышает 4.0, то каждый коэффициент нормализуется:

$$c_i = 4.0 \times \frac{c_i}{c_1 + c_2}, i = 1, 2. \quad (16)$$

5. Результаты моделирования

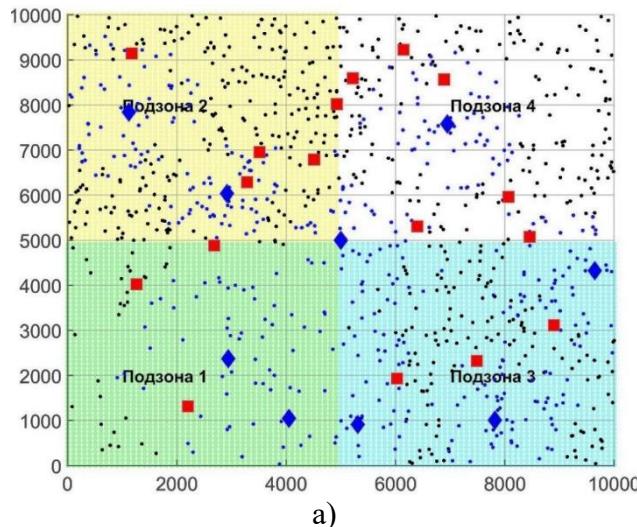
В этом разделе представлены и проанализированы результаты моделирования работы алгоритма APSO в задаче оптимизации размещения ABS. Сеть состоит из 1000 пользователей, распределенных в городской среде. ABS могут свободно летать на высоте от 200 до 1000 м. Кроме того, наземные системы связи включают 9 базовых станций: одна из них расположена в центре рассматриваемой зоны, а остальные 8 GBS распределены по территории. Параметры окружающей среды и алгоритмы описаны в таблицах 2 и 3. Моделирование было выполнено в среде MATLAB. Двумерное и трехмерное распределение пользователей, GBS и ABS в данном сценарии представлено на рисунках 1, 2. ABS обозначены красными прямоугольниками, GBS – синими ромбами. Пользователи, подключенные к GBS, показаны синими точками, а пользователи, подключенные к ABS, – черными.

Таблица 2 – Параметры моделирования

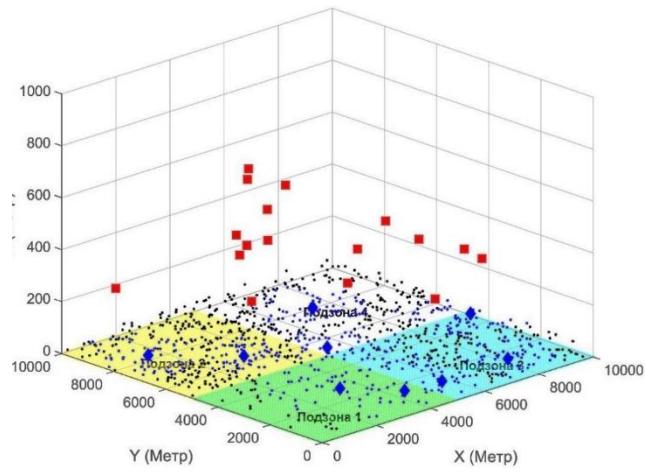
Параметр	Значение	Параметр	Значение
P_{GBS}	40 дБм	P_a	20 дБм
a_o	36.2	s_1	9.61
a_1	30.2	s_2	0.16
a_2	12	ζ_{LoS}	1 дБ
a_3	0.1	ζ_{NLoS}	20 дБ
N^{GBS}	56 пользователей	N^{ABS}	23 пользователя
f_{GBS}	1800 МГц	f_a	2 ГГц
$SINR_0$	-8 дБ	-	-

Таблица 3 – Значения параметров для алгоритма APSO

Параметры	Описание	Значение
L	Размер роя частиц	100 частиц
MaxIt	Максимальное число итераций	100
Varmin	Нижняя граница переменной для частиц	0 м
Varmax	Верхняя граница переменной для частиц	10000 м
h_{\min}	Минимальная высота полета ABS	200 м
h_{\max}	Максимальная высота полета ABS	1000 м
ω	Коэффициент инерции	0.75
c_1, c_2	Когнитивный и социальный коэффициенты ускорения	1.55, 1.55



а)



б)

Рис. 1. Распределение пользователей, GBS и ABS в двумерном (а) и трехмерном (б) пространстве

В данной работе рассматриваемая зона разделена на четыре подзоны, каждая из которых имеет одинаковую площадь, но разное количество пользователей. В подзоне 1 расположено 10 % пользователей от общего количества пользователей, в подзоне 2 – 30 %, в подзоне 3 – 35 %, а в подзоне 4 – 15 %. ABS будут опускаться в районах с высокой плотностью пользователей для улучшения связи с пользователями, которых они обслуживают, и уменьшения помех для поль-

вателей, подключенных к другим ABS. В зонах с низкой плотностью ABS находятся на большей высоте, расширяя зону покрытия и подключая большее количество пользователей.

Распределение GBS и пользователей, мощности и полосы пропускания GBS, а также уровня *SINR* пользователей позволило выявить, что GBS покрывает 433 пользователя. Соответственно, можно сделать вывод, что для полного покрытия оставшихся пользователей потребуется развернуть 18 ABS. Однако после применения алгоритма APSO было обнаружено, что для удовлетворения требований сети достаточно всего 17 ABS, при этом уровень покрытия пользователей составляет более 98 %. В то же время в подзонах 2 и 3, несмотря на наличие GBS, по-прежнему требуется большое количество ABS, поскольку высокая плотность пользователей превышает пропускную способность GBS. В рассматриваемом сценарии учитывается, что ABS могут летать на высоте от 200 до 1000 м, однако на практике во всех сценариях они летают на средней высоте 500–600 м. Это позволяет экономить энергию и снижать потери при подключении к пользователям. Кроме того, предполагаемое количество ABS больше, чем фактическое количество аппаратов, необходимых для развертывания одной ABS с соблюдением требований к качеству обслуживания.

В таблице 4 приведено сравнение эффективности двух алгоритмов – классического PSO и APSO – в задаче оптимизации размещения ABS в трехмерном пространстве. Оба подхода использовали одинаковое количество ABS, равное 17, что позволяет объективно оценить качество размещения и распределения пользователей между станциями.

Таблица 4 – Сравнение количества подключенных пользователей при использовании APSO и классического PSO

N	Описание сценария	Количество ABS	PSO	APSO
1000	Подзона 1 (25 км ² , 10%) Подзона 2 (25 км ² , 30%) Подзона 3 (25 км ² , 35%) Подзона 4 (25 км ² , 15%)	17	542	556

Несмотря на идентичное количество ABS, APSO показал лучшие результаты: 556 пользователей были успешно подключены, в то время как классический PSO обеспечил подключение только 542 пользователей. Это подтверждает, что APSO способен находить более выгодные конфигурации размещения станций, обеспечивая лучшее покрытие и обслуживание в условиях ограниченных ресурсов. Таким образом, предложенный подход может быть рекомендован для сценариев, требующих быстрого и эффективного развертывания ABS с ограниченными ресурсами и высокой плотностью пользователей.

6. Выводы

В данной статье рассмотрена задача поддержки перегруженной наземной сети связи в условиях высокой пользовательской нагрузки, характерной, например, для массовых мероприятий в городских районах. Для решения этой задачи

предлагается подход, основанный на оптимизации трехмерного размещения ABS с учетом ограничений по пропускной способности и зоне покрытия. Первоначально определялось количество ABS и их оптимальное размещение, после чего некоторые станции были исключены без ущерба для качества обслуживания пользователей. Для повышения эффективности размещения ABS и преодоления недостатков классического PSO, таких, например, как преждевременная сходимость, был предложен APSO. Результаты моделирования показали, что последний алгоритм обеспечивает более высокую степень подключения пользователей по сравнению с классическим PSO при одинаковом количестве ABS. Это свидетельствует о преимуществе предложенного подхода в обеспечении лучшего качества покрытия и более эффективном использовании ресурсов. Кроме того, исследование выявило зависимость между плотностью пользователей и высотой размещения ABS: в зонах с высокой плотностью станции располагаются на меньшей высоте для улучшения качества сигнала, тогда как в районах с низкой плотностью – на большей высоте, что позволяет увеличить зону охвата.

Таким образом, предложенный метод может быть эффективно применен для динамического развертывания ABS в условиях нестабильной или перегруженной наземной инфраструктуры, обеспечивая стабильное и качественное обслуживание пользователей.

Литература

1. Nguyen D. C., Ding M., Pathirana P. N., Seneviratne A., Li J., Niyato D., et al. 6G Internet of Things: A Comprehensive Survey // IEEE Internet of Things Journal. 2021. Vol. 9. Iss. 1. PP. 359–383. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3103320
2. Ding G., Wu Q., Zhang L., Lin Y., Tsiftsis T.A., Yao Y.D. An Amateur Drone Surveillance System Based on the Cognitive Internet of Things // IEEE Communications Magazine. 2018. Vol. 56. Iss. 1. PP. 29–35. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1700452. EDN: YBEOMH
3. Rose K., Eldridge S., Chapin L. The Internet of Things: An Overview. Understanding the Issues and Challenges of a More Connected World. The Internet Society (ISOC), 2015.
4. Kodheli O., Lagunas E., Maturo N., Sharma S.K., Shankar B., et al. Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2021. Vol. 23. Iss. 1. PP. 70–109. DOI: 10.1109/COMST.2020.3028247. EDN: FGGSYNM
5. Shakhatre H., Sawalmeh A.H., Al-Fuqaha A., Dou Z., Almaita E., Khalil I., et al. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges // IEEE Access. 2019. Vol. 7. PP. 48572–48634. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2909530. EDN: FTQEWK
6. Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18. Iss. 2. PP. 1123–1152. DOI: 10.1109/COMST.2015.2495297
7. Alzahrani B., Oubatti O.S., Barnawi A., Atiquzzaman M., Alghazzawi D. UAV assistance paradigm: State-of-the-art in applications and challenges // Journal of

Network and Computer Applications. 2020. Vol. 166. P. 102706. DOI: 10.1016/j.jnca. 2020.102706. EDN: USUUHU

8. Al-Hourani A., Kandeepan S., Lardner S. Optimal LAP Altitude for Maximum Coverage // IEEE Wireless Communications Letters. 2014. Vol. 3. Iss. 6. PP. 569–572. DOI: 10.1109/LWC.2014.2342736.

9. Alzenad M., El-Keyi A., Lagum F., Yanikomeroglu H. 3-D Placement of an Unmanned Aerial Vehicle Base Station (UAV-BS) for Energy-Efficient Maximal Coverage // IEEE Wireless Communications Letters. 2017. Vol. 6. Iss. 4. PP. 434–437. DOI: 10.1109/LWC.2017.2700840

10. Ibhaze A. E., Imoize A. L., Ajose S. O., John S. N., Ndujiuba C. U., Idachaba F. E. An Empirical Propagation Model for Path Loss Prediction at 2100 MHz in a Dense Urban Environment // Indian Journal of Science and Technology. 2017. Vol. 10(5). PP. 1–9. DOI: 10.17485/ijst/2017/v10i5/90654

11. Ibhaze A.E., Ajose S.O., Atayero A.A.-A., Idachaba F.E. Developing smart cities through optimal wireless mobile network // Proceedings of the International Conference on Emerging Technologies and Innovative Business Practices for the Transformation of Societies (EmergiTech, Balaclava, Mauritius, 03–06 August 2016). IEEE, 2016. PP. 118–123. DOI: 10.1109/EMERGITECH.2016.7737322

12. Goldsmith A. Wireless Communications. Cambridge. Cambridge University Press, 2005. 640 p. DOI: 10.1017/CBO9780511841224. EDN: XPESYF

13. Zeng Y., Wu Q., Zhang R. Accessing from the Sky: A Tutorial on UAV Communications for 5G and Beyond // Proceedings of the IEEE. 2019. Vol. 107. Iss. 12. PP. 2327–2375. DOI: 10.1109/JPROC.2019.2952892

14. Eberhart R.C., Shi Y. Particle swarm optimization: developments, applications and resources // Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No. 01TH8546, Seoul, Korea (South), 27–30 May 2001). IEEE, 2001. Vol. 1. PP. 81–86. DOI: 10.1109/CEC.2001.934374

15. Shi Y., Eberhart R.C. Empirical study of particle swarm optimization // Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (CEC99, Cat. No. 99TH8406, Seoul, Korea (South), 27–30 May 2001). IEEE, 1999. Vol. 3. PP. 1945–1950. DOI: 10.1109/CEC.1999.785511

Статья поступила 07 ноября 2024 г.
Одобрена после рецензирования 11 декабря 2024 г.
Принята к публикации 23 декабря 2024 г.

Информация об авторах

Чан Тунг Зыонг – аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникации им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: chan.tz@sut.ru

Кучерявый Андрей Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникации им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: akouch@sut.ru

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2024-12-3-1-12>
EDN: CIQWAM

3-D Placement of Aerial Base Stations to Support Terrestrial Network Based on Adaptive Particle Swarm Optimization

T. D. Tran✉, A. E. Kucheryavy

The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Problem statement. With the increasing load on terrestrial communication networks, it is necessary to implement new solutions to ensure stable and high-quality user service. One of the promising approaches is the use of aerial base stations (ABS), which can be rapidly deployed in areas with high user density or during emergency situations. This paper addresses the problem of three-dimensional deployment of ABS to support terrestrial communication networks, where the number of users exceeds the capacity of the current ground-based system. **The main goal** of this work is to determine the minimum number of ABS and their optimal placement while meeting user service requirements. However, this is an NP-hard problem (nondeterministic polynomial-time hardness), so to solve it, we propose using Adaptive Particle Swarm Optimization. Scientific novelty: the proposed approach consists in developing a method for optimizing three-dimensional ABS placement using an adaptive particle swarm algorithm aimed at minimizing the number of ABS while maintaining high quality of service to users. Unlike classical PSO, the proposed algorithm allows connecting more users to ABS due to more efficient resource allocation and selection of ABS location. Simulation results show that the proposed algorithm ensures high coverage performance in environments with various user distributions. **Theoretical / practical significance:** In practice, the results can be used in planning and deploying ABS in congestion or emergency situations to ensure sustainable coverage.

Key words: aerial base stations, 3D placement, ground base stations, coverage, capacity, adaptive particle swarm optimization

Information about Authors

Tran Tung Duong – The postgraduate student at the Department of Communication Networks and Data Transmission (The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: chan.tz@sut.ru

Kucheryavy Andrey Evgenyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Communication Networks and Data Transmission (The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: akouch@sut.ru