
ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

УДК 621.395.8

С.Д. ШТОВБА¹, С.Ю. ЕРМОЛАЕВ², В.Г. КАРТАШЕВСКИЙ²

РАЗМЕЩЕНИЕ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ БЕСПРОВОДНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СЕТЕЙ С ПОМОЩЬЮ МУРАВЬИНОГО АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ

¹*Винницький національний технічний університет,
Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, 21021, Україна,
E-mail: shtovba@ksu.vntu.edu.ua*

²*Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики,
Льва Толстого, 23, Самара, 443010, Россия,
E-mail: kartash@psati.ru*

Аннотация. Модифицирована постановка задачи оптимального размещения базовых станций в беспроводных сетях с учетом затухания сигналов в радиоканале. Разработан эвристический метод решения этой задачи на основе муравьиных алгоритмов оптимизации.

Анотація. Модифіковано постановку задачі оптимального розміщення базових станцій в бездротових мережах з урахуванням послаблення сигналів в радіоканалі. Розроблено евристичний метод вирішення цієї задачі на основі мурашиних алгоритмів оптимізації.

Abstract. The state of a task for optimal allocation of wireless network base stations is modified taking with account the signal attenuation in a radio-channel. Based on ant algorithms the heuristic method optimization for this problem is proposed.

Ключевые слова: беспроводная сеть, размещение базовых станций, оптимизация, муравьиный алгоритм.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач проектирования беспроводных широкополосных сетей передачи информации является синтез ее топологической структуры. К этой задаче относится размещение базовых станций и подключение к ним клиентов. Задача формулируется следующим образом. На заданной территории необходимо разместить базовые приемо-передающие станции и подключить к ним клиентов таким образом, чтобы при минимальных затратах обеспечить требуемый уровень качества услуг для каждого абонента. Для решения этой NP-трудной задачи дискретного целочисленного программирования применяют как традиционные методы с использованием схемы ветвей и границ и процедуры Дэвиса–Путнама, так и эвристические подходы на основе жадных алгоритмов и табу-поиска [1–5]. Однако в этих, и в других работах, не учитываются потери при распространении сигнала в радиоканале между антеннами абонентской и базовой станций, изменение задержки при многолучевости, характеристики затухания и другие факторы.

Целью настоящей статьи является разработка метода оптимального размещения базовых станций для задач большой размерности с учетом потерь при распространении сигнала в радиоканале. В качестве технологии оптимизации выбраны муравьиные алгоритмы [6–7], которые для аналогичных дискретных задач размещения большой размерности продемонстрировали хороший баланс между точностью и временем решения. Статья ориентирована на задачи размещения для широко распространенных беспроводных сетей фиксированного доступа в диапазоне 1–5 ГГц, соответствующих стандарту IEEE 802.16-2004. Предполагается, что базовые станции располагаются на местности категории С, т.е. на равнинной территории с малой плотностью деревьев.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Предполагается, что каждая базовая станция может быть установлена на одно из M вакантных мест с фиксированными координатами. Таким образом, может быть от 1 до $M - 1$ базовых станций. Существует K клиентов, каждого из которых необходимо подключить к одной базовой станции. Под клиентом понимается группа индивидуальных абонентов с одинаковыми условиями распространения сигналов, количество запросов от которых определено по результатам предварительного маркетингового исследования. Задача оптимального проектирования сети состоит в выборе наиболее дешевого варианта назначения базовых станций на вакантные места и распределения клиентов по базовым станциям.

Введем следующие обозначения:

$\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_M)$ – вектор размещения базовых станций, в котором значение координаты $X_m = 1$ (0) указывает, что m -ое вакантное место занято (не занято) базовой станцией, $m = \overline{1, M}$;

$\mathbf{Y} = \|Y_{km}\|$ – матрица распределения клиентов по базовым станциям ($m = \overline{1, M}$, $k = \overline{1, K}$), в которой значение элемента $Y_{km} = 1$ (0) указывает, что k -й клиент подключен (не подключен) к базовой станции, размещенной на m -м вакантном месте.

Математически, решение задачи сводится к нахождению \mathbf{X} и \mathbf{Y} , обеспечивающих:

$$\sum_{k=1, K} \sum_{m=1, M} Y_{km} \cdot W(r_{km}) + c \cdot \sum_{m=1, M} X_m + \sum_{k=1, K} \sum_{m=1, M} Y_{km} \cdot P(r_{km}) \rightarrow \min \quad (1)$$

где r_{km} – расстояния между k -м клиентом и m -м вакантным местом размещения базовой станции;

$$W(r_{km}) = \begin{cases} W_1 > 0, & \text{если } r_{km} \leq R_1 \\ W_2 > 0, & \text{если } R_1 < r_{km} \leq R_2 \\ \infty, & \text{если } r_{km} > R_2 \end{cases}$$

– стоимость подключения клиента к базовой станции с учетом

пороговых значений удаленности R_1 и R_2 ; c – стоимость базовой станции; $P(r_{km})$ – штраф за снижение качества связи из-за потерь при распространении сигнала в радиоканале, расчет которого предлагается осуществить по табл. 1.

Для работы с табл. 1 требуется рассчитать потери сигнала по следующей формуле [8]:

$$PL = 20 \lg(4\pi r_0 / \lambda) + 10\gamma \lg(r / r_0) + s + 61 \lg(f / 2000) - 20 \lg(0.5h),$$

где r_0 – базовое расстояние, равное 100 м; λ – длина волны; γ – экспонента потерь при распространении сигнала; r – расстояние между базовой и абонентской станциями; $s = 8.2 \dots 10.6$, дБ – случайная составляющая потерь при распространении сигнала с логнормальным распределением; f – рабочая частота.

Таблица 1

Штраф за ослабление сигнала						
PL , дБ	10	12.9	18.6	22.3	27.4	30
P	1	2	3	4	5	6

На управляемые переменные накладываются следующие 2 ограничения.

1. Каждый клиент должен быть обязательно подключен только к одной базовой станции:

$$\forall k : \sum_{m=1, M} Y_{km} = 1. \quad (2)$$

2. Суммарный трафик всех клиентов, обслуживаемых с m -го места, не должен превышать производительность станции:

$$\forall m : \sum_{k=1, K} b_k Y_{km} \leq B_m, \quad (3)$$

где B_m – производительность станции, установленной на m -ом месте, Кбит/с; b_k – затребованная k -м клиентом ширина канала, Кбит/с.

В представленной формулировке данная задача относится к классу SSCFLP – задач размещения с одним источником обслуживания при наличии ограничений на его емкость [9].

МУРАВЬИНЫЙ АЛГОРИТМ РАЗМЕЩЕНИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ

Для применения муравьиной метаэвристики необходимо свести задачу к поиску кратчайшего пути на некотором графе и определить процедуры обновления феромонов и правила выбора маршрута [7]. В нашем случае поиск решений предлагается осуществить на конструирующем графе $G_C(V_1, V_2, E)$. В этом графе множество вершин V_1 соответствует вакантным местам размещения базовых станций, множество вершин V_2 представляет клиентов, а веса ребер из множества E соответствует расстояниям между клиентами и вакантными местами. В начале каждой итерации алгоритма поставим по одному муравью на каждую вершину из V_1 . Опыт коллективного решения задачи колонией муравьев зададим феромонными следами, которые будем обновлять как на вершинах, так и на ребрах графа.

Положительную обратную связь реализуем так, чтобы муравьи при выборе маршрута ориентировались на феромонные уровни клиентов и уровни ребер, соединяющих клиентов и вакантные места. Чем больше феромонов у самого клиента, а также на соответствующем ребре, тем более привлекательным будет для муравья переход именно в этот компонент решения.

Выбирая маршрут, муравьи будут ориентироваться не только на динамически обновляемые феромонные уровни, но и на некоторый статический показатель локальной привлекательности ребер графа. Таким показателем назовем так называемую видимость клиента $\eta_{km} = 1/r_{km}$.

Ограничения задачи оптимизации выполним следующим образом. Согласно ограничению (2) каждому муравью запретим в течение одной итерации алгоритма посещать одного и того же клиента дважды. Для этого с каждым муравьем свяжем определенную структуру данных – табу-список, который сохраняет порядок клиентов, посещенных до момента времени t и запрещает муравью на текущей итерации алгоритма посещать их снова. Затем табу-список очищается и муравей вновь свободен в своем выборе. В конце итерации табу-список используется для подключения клиентов к базовой станции, установленной на вакантном месте.

Для выполнения ограничения (3) с каждым вакантным местом ассоциируется переменная B_{cap} . В начале каждой итерации алгоритма значение этой переменной приравняем к производительности станции. После возвращения муравья от клиента значение B_{cap} уменьшается на величину полосы пропускания, затребованную клиентом.

Разработанный муравьиный алгоритм приведен ниже. При его разработке использована концепция муравьиной оптимизации из [6, 7, 10]:

```

<Инициализация параметров  $\alpha, \beta, q_0, \rho, \gamma, \tau_0, NC_{\max}$ >
<Разместить муравьев в местах кандидатах AntsPlaces[]>
For  $NC_{\text{тек}}=1: NC_{\max}$ 
  J:=0;
  <Очистить табу-списки>
  While J < число_клиентов do
    K:= 0;
    While K < число_муравьев do
      <Разместить K-го муравья на вакантное место AntPlaces[K]>
      <Сгенерировать случайное число  $q$ >
      If  $q \leq q_0$  then <выбрать клиента на основе правила (4)>
      Else <выбрать клиента, используя правила (5)>
    EndIf
    <Добавить клиента в табу-список>
    If  $B_{\text{cap}} > \sum_{k=1, K} b_k$  then <обновить феромоны на ребре, клиенте и
      вакантном месте по правилу локального обновления (6)>
  
```

```

Else <применить к ребру механизм испарения феромонов>
EndIf
EndWhile
    K:=K+1
EndWhile
EndFor
    <Применить правило глобального обновления феромонов для наилучшего
    вакантного места на основе уравнения (7)>
    While имеются_неподключенные_клиенты do
        <Устанавливать на вакантные места базовые станции по уменьшению
        уровня
        феромонов и подключать к ним клиентов согласно табу-спискам муравьев>
    EndWhile
    <Вывести рассчитанное значение целевой функции>

```

Процесс построения решения начинается с фазы инициализации, в течение которой устанавливаются значения параметров алгоритма. Затем всем вакантным местам кандидатам, клиентам и ребрам присваивается одинаковое значение начального уровня феромона τ_0 . В основном цикле алгоритма муравьи, стартуя из различных вакантных мест, направляются к клиентам. Для каждого муравья, размещенного в m -ом вакантном месте, рассчитывается привлекательность каждого допустимого клиента. Привлекательность клиента рассчитывается по правилу (4), которое учитывает уровни феромонов соответствующих клиента и ребра графа, а также его видимость. Муравей, размещенный в m -ом вакантном месте, двигается к k -му клиенту с максимальной привлекательностью. Такой выбор осуществляется, если $q \leq q_0$:

$$s = \begin{cases} \arg \max_{c_{u,ru} \in J_k(r)} \{(\tau_u(t) + \tau_{ru}(t))^\alpha \cdot (\eta(r,u))^\beta\}, & \text{если } q \leq q_0 \\ S, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (4)$$

где $\tau_u(t)$ – феромонный уровень клиента; $\tau_{ru}(t)$ – феромонный уровень ребра; $\eta(r,u)$ – видимость; $\alpha > 0$ – коэффициент важности феромонных следов при выборе маршрута; $\beta > 0$ – коэффициент важности видимости при выборе маршрута; q – случайное число, равномерно распределенное в интервале $[0, 1]$; $q_0 \in (0, 1)$ – коэффициент, задающий соотношение между эксплуатацией наилучшего решения и исследованием новых областей; S – случайная переменная, выбранная по следующему вероятностному распределению:

$$p_k(r,s) = \begin{cases} \frac{(\tau_s(t) + \tau_{rs}(t))^\alpha \cdot (\eta(r,s))^\beta}{\sum_{c_{u,ru} \in J_k(r)} (\tau_s(t) + \tau_{rs}(t))^\alpha \cdot (\eta(r,s))^\beta}, & \text{если } c_{u,ru} \in J_k(r) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (5)$$

где $J_k(r)$ – множество клиентов, а соответственно и ребер, которые еще не посетил k -й муравей к текущему шагу, расположенный в r -м вакантном месте.

При каждом передвижении муравья от вакантного места к клиенту и обратно, выполняется процедура модификации феромона на основе правила локального обновления феромонных следов. В алгоритме присутствуют 3 правила локального обновления феромонов. Первое правило обновляет феромоны на клиентах, когда туда приходят муравьи, второе правило модифицирует феромонный уровень места кандидата при возвращении муравья от клиента, а третье правило изменяет феромоны на ребрах, по которым прошли муравьи во время движения от вакантного места к клиенту и обратно. Для всех трех случаев правило локального обновления представлено в следующем общем виде:

$$\tau(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau(t) + \rho \cdot \Delta \tau, \quad (6)$$

где $\rho \in (0, 1)$ – коэффициент локального испарения феромонного следа; $\Delta\tau = 1/r$ – приращение феромонного уровня соответственно вакантного места, клиента или ребра на текущем шаге итерации.

Когда все муравьи посетят всех клиентов, применяется следующее правило глобального обновления феромонов:

$$\tau(t+1) = (1 - \gamma) \cdot \tau_m(t) + \gamma \cdot \Delta\tau, \quad (7)$$

где $\rho \in (0, 1)$ – коэффициент глобального испарения феромонного следа; $\Delta\tau = \tau_0$ – приращение феромонного уровня m-го вакантного места.

Правило (7) применяется только к вакантному месту с максимальным количеством феромонов. После этого начинается следующая итерация алгоритма.

В конце работы алгоритма среди всех имеющихся мест кандидатов выбирается одно с наибольшим количеством феромонов. На это место устанавливается базовая станция и к ней подключаются клиенты на основе табу-списка муравья, размещенного в этом месте. Если остались неподключенные клиенты, то берется вакантное место со вторым уровнем феромонов и по табу-списку соответствующего муравья подключаются клиенты. Этот процесс происходит до подключения всех клиентов.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для решения задачи синтеза топологии беспроводных сетей было создано программное обеспечение, интерфейс которого и типичный результат работы представлены на рис. 1. Установленные базовые станции обозначены синими кругами, клиенты – красными, а неиспользованные места – перечеркнутыми черными кругами. Реализованы три метода решения: полный перебор, стандартный генетический алгоритм [9] и предложенный муравьиный алгоритм.

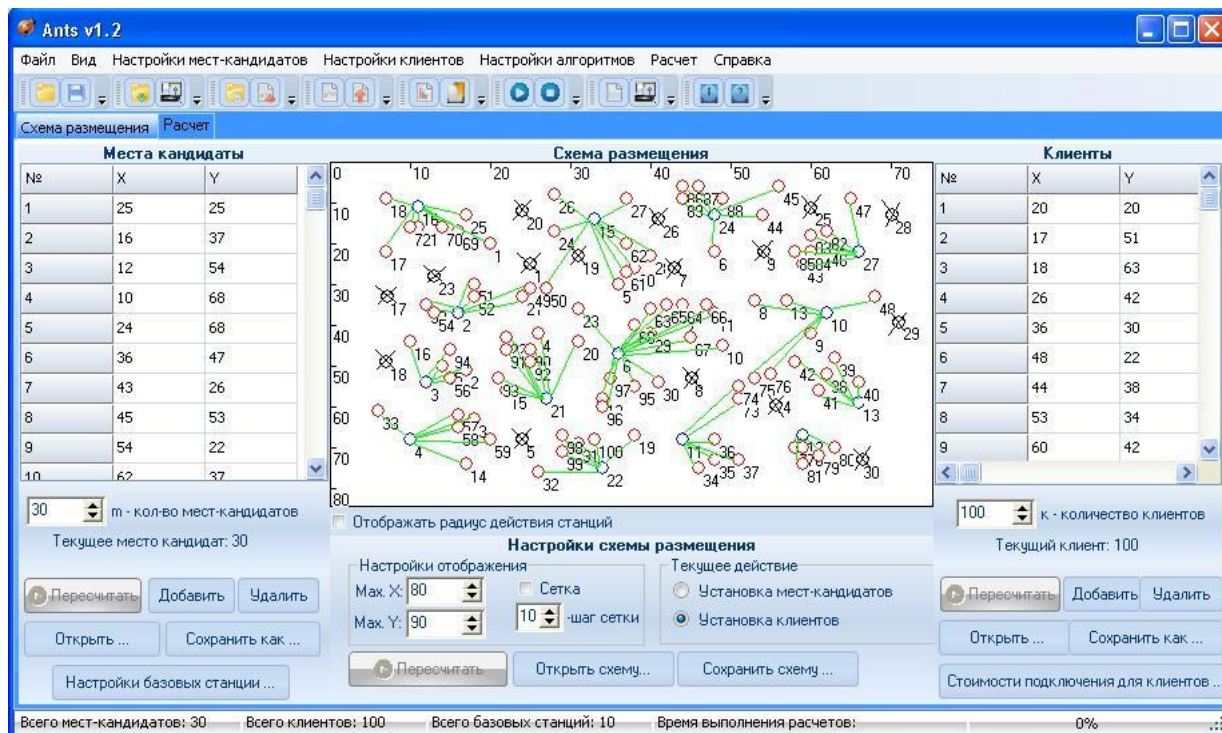


Рис. 1. Интерфейс программы оптимального размещения базовых станций

Для компьютерных экспериментов сгенерировано множество задач размещения базовых станций различной размерности. Все эксперименты проводились на компьютере с процессором Intel Core 2 Duo 2.66 ГГц и оперативной памятью 3.25 ГБ. Для реализации сети выбрана территория размером 100×100 км; радиус зоны обслуживания базовой станции составляет 20 км; стоимости подключения приняты такими: $W_1 = 10000$ руб., $W_2 = 20000$ руб.

Результаты экспериментов (табл. 2) свидетельствуют, что муравьиный алгоритм затрачивает на нахождение решения гораздо меньше времени, чем генетический алгоритм. Этот факт объясняется тем, что генетический алгоритм оперирует готовыми решениями, в то время как в муравьином алгоритме процесс построения решения выполняется последовательно, вовлекая в процесс решения все новые

компоненты. При этом, для задач малой и средней размерности генетический и муравьиный алгоритм находят одинаковые решения. Задачи большой размерности точнее решает муравьиный алгоритм.

Таблица 2

**Результаты оптимизации размещения базовых станций для тестовых задач
(статистика за 100 прогонов)**

Размерность задачи	Генетический алгоритм		Муравьиный алгоритм	
	Время решения, с	Целевая функция	Время решения, с	Целевая функция
$M = 40, K = 40$	0.03	1048350	0.02	1048350
$M = 40, K = 60$	13.68	1117350	1.02	1117350
$M = 40, K = 80$	130.94	2207100	1.72	2207100
$M = 40, K = 100$	388.44	224160	2.64	2238150
$M = 100, K = 100$	435.64	5983050	6.3	5983050
$M = 200, K = 200$	989.51	6267700	36.34	6267700
$M = 500, K = 500$	2453.78	8459800	127.56	8043050

ВЫВОДЫ

Модифицирована постановка задачи оптимального размещения базовых станций в беспроводных широкополосных сетях передачи информации с учетом потери сигналов в радиоканале. Решение данной задачи позволяет оператору связи сократить расходы на создание сети и обеспечить клиентов услугами надлежащего качества. Установлено, что оптимальное размещение базовых станций и подключение к ним абонентов является NP-трудной задачей, для решения которой разработан эвристический метод на основе муравьиных алгоритмов оптимизации. Проведенные компьютерные эксперименты показали, что предложенный муравьиный алгоритм обладает превосходством над генетическим алгоритмом, которое проявляется в нахождении более качественных решений за меньшее время. С ростом размерности задач преимущество муравьиного алгоритма усиливается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Amaldi E. Planning UMTS base station location: optimization models with power controls and algorithms / Amaldi E., Capone A. // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2003. – Vol. 2, № 5. – P. 939–952.
2. Tang M. A reference station placement scheme in deployment of network real-time kinematic positioning systems / Tang M., Feng Y., et al. // Proceedings International Global Navigation Satellite Systems Society Symposium, Sydney. – 2007. – P. 123–132.
3. Yang Y. Planning base station and relay station locations in IEEE 802.16j multi-hop relay networks / Yang Y., Murphy S., Murphy L. // In Proceedings of 5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference. – 2008. – P. 922–926.
4. Jacobson K.R. Cell dimensioning and network throughput in cellular multi-hop relay networks / Jacobson K.R., Krzymien W.A. // In Proceedings VTC2006-Fall, Montreal, Canada. – 2006.
5. Вишневский В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. / Вишневский В., Ляхов А., Шахнович И., Портной С. – М.: Техносфера, 2005. – 456 с.
6. Dorigo M. The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents / Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. Part B. – 1996. –Vol. 26, №1. – P. 29-41.
7. Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы: теория и применение / Штовба С.Д. // Программирование. – 2005. – № 4. – С. 1–16.
8. Erceg V. Channel models for fixed wireless applications / Erceg V., Hari K.V.S., et al. // Tech. Rep. IEEE 802.16a-03/01, June 2003.
9. Ермолаев С.Ю. Генетический подход к задаче оптимального размещения базовых станций в сетях IEEE 802.16-2004 / Ермолаев С.Ю., Карташевский В.Г. // Труды 12-й международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA-2010). – Москва, 2010. – С. 255–257.
10. Dorigo M. The Ant Colony Optimization Metaheuristic: Algorithms, Applications, and Advances / Dorigo M., Stutzle T. // International Series in Operations Research & Management Science. – 2003. –

Vol. 57 "Handbook of Metaheuristics" (Eds. Glover F and Kochenberger G.). Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 2003. P. 250-285.

Надійшла до редакції 20.05.2011р.

ШТОВБА С.Д. – д.т.н., доцент, професор кафедри комп'ютерних систем управління, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

ЕРМОЛАЕВ С.Ю. – к.т.н., інженер-программіст ООО «Старт2ком», Самара, Росія.

КАРТАШЕВСКИЙ В.Г. – д.т.н., професор, професор кафедри мультисервісних мереж і інформаційної безпеки, Поволжський державний університет телекомунікацій і інформатики, Самара, Росія.