

Подключение пользователей к телекоммуникационной сети (многокритериальная задача о назначении)

Марк Ш. Левин*, Максим В. Петухов**

**Институт проблем передачи информации, Российская академия наук
Москва, Россия*

email: mslevin@acm.org

***Московский физико-технический институт (государственный университет)
Долгопрудный, Россия*

email: maxim@frtk.ru

Поступила в редколлегию 1.12.2009

Аннотация—В статье рассматривается задача подключения пользователей к точкам доступа беспроводной телекоммуникационной сети. Подход основан на использовании многокритериальной задачи о назначениях. Множество критериев включает следующие: (1) максимум полосы пропускания, (2) число одновременно обслуживаемых пользователей, (3) требования по надежности сети и др. Рассмотрены два ресурсных ограничения: (а) на число пользователей, обслуживаемых точкой доступа, и (б) на ширину частотного спектра точки доступа. Используемая задача комбинаторной оптимизации является NP-трудной и для решения предложены эвристики. Численный пример иллюстрирует предложенный подход.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы возрастает важность задач подключения пользователей к беспроводным телекоммуникационным сетям (например: [1], [7], [9], [14]). В данной статье впервые рассматривается подключение пользователей к точкам доступа беспроводных телекоммуникационной сети на основе многокритериальной задачи о назначении. Рис. 1 иллюстрирует процесс подключения пользователей к точкам доступа сети.

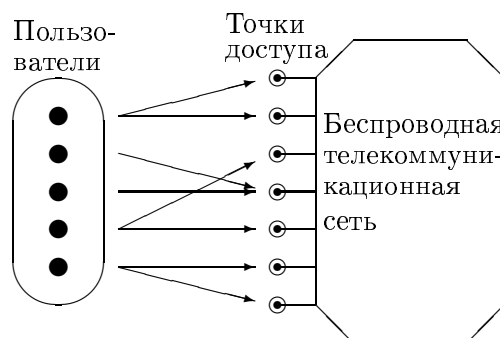


Рис. 1. Пользователи и точки доступа

В рамках предлагаемого многокритериального подхода используются следующие критерии: (а) максимум полосы пропускания, (б) число одновременно обслуживаемых пользователей, (в) требования надежности обслуживания и др. Многокритериальные задачи о назначении

относятся к классу NP-трудных, поэтому предлагаются эвристические схемы решения. Многокритериальный подход иллюстрируется реалистичными численными прикладными примерами. Вычисления проведены на основе программ авторов, разработанных в среде MatLab (<http://www.mathworks.com/>).

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной статье использованы следующие предположения:

1. Имеется территория (местность).
2. Точки доступа располагаются на местности (т.е., на карте) и "покрывают" всю область.
3. Пользователи (клиенты) могут располагаться на территории произвольно.
4. Для каждого клиента необходим доступ к сети, т.е., соответствующее подключение к одной (или хотя бы к одной в случае "расширенной" задачи) точке доступа и каждое такое подключение описывается (оценивается) набором характеристик (критериев).
5. Точки доступа и клиенты имеют координаты на карте с учетом рельефа, т.е., (x, y, z) .

Содержательная постановка задачи заключается в следующем:

Подключить максимальное число пользователей к точкам доступа беспроводной телекоммуникационной сети так, чтобы максимизировать "обобщенную" надежность соединений (т.е., передачи данных для всех пользователей), качество распространения сигналов, качество использования спектра частот, качество обслуживания, качество защиты передачи данных и удовлетворились все ограничения по требованиям пользователей: (а) по полосам пропускания, (б) по уровню защищенности данных.

Рассмотрим формальную постановку задачи. Обозначим множество пользователей $\Psi = \{1, \dots, i, \dots, n\}$ и множество точек доступа $\Theta = \{1, \dots, j, \dots, m\}$.

Каждый пользователь i описывается вектором: $(x_i, y_i, z_i, f_i, p_i, r_i, d_i)$, где (x_i, y_i, z_i) - координаты пользователя i , f_i - параметр, соответствующий требуемой полосе пропускания (от 1 Mbit/s до 10 Mbit/s), p_i - требуемый уровень CoS (класс, приоритет) обслуживания, r_i - требуемая для пользователя надежности передачи данных, d_i - уровень шифрования (т.е., уровень защиты информации).

Каждая точка доступа описывается так: $(x_j, y_j, z_j, f_j, n_j, r_j, d_j)$, где (x_j, y_j, z_j) - координаты точки доступа j , f_j - параметр, соответствующий максимально возможному трафику (т.е., максимум полосы пропускания) точки доступа j , n_j - максимальное число пользователей, которое может обслуживаться точкой доступа j , r_j - надежность канала передачи данных, которая может обеспечиваться точкой доступа j , d_j - параметр, отвечающий за уровень защиты от взлома для данных, передаваемых через точку доступа j . Таблица 1 содержит описание шкал для используемых параметров.

Для каждой пары "пользователь-точка доступа" $(\forall(i, j), i \in \Psi, j \in \Theta)$ имеется набор характеристик: (1) уровень надежности r_{ij} , (2) характеристика расстояния и наличия препятствий (качество направления распространения сигнала) β_{ij} , (3) характеристика использования полосы пропускания f_{ij} , (4) класс обслуживания (приоритет) p_{ij} , (5) характеристика уровня защиты передачи данных d_{ij} . Таким образом получаем векторную характеристику $\forall(i, j), i \in \Psi, j \in \Theta$: $\widehat{c}_{ij} = (r_{ij}, \beta_{ij}, f_{ij}, p_{ij}, d_{ij})$.

Подключение пользователя i к точке доступа j будет задаваться булевой переменной x_{ij} ($x_{ij} = 1$ при подключении i к j и $x_{ij} = 0$ в противном случае). Вариант подключения множества пользователей Ψ к множеству точек доступа Θ (т.е. решение задачи по подключению пользователей к точкам доступа) определяется набором значений булевых переменных (булевой матрицей) $X = \|x_{ij}\|, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$.

Таблица 1. Параметры и описание шкал

Параметр	Шкала	Описание
p_i (пользователь)	[1, 3]	при значении 1 все требования клиента должны удовлетворяться, соответствующие пользователи обслуживаются в первую очередь; при значении 2 возможно использование полосы пропускания в два раза уже, чем заказано пользователем, при большой загрузке сети требование пользователя рассматривается в вторую очередь, возможна пониженная надежность передачи данных; при значении 3 возможно подключение пользователя при любой доступной полосе пропускания.
r_i (пользователь)	[1, 10]	при значении 1 возможна потеря информации пользователя (до 20 %, пример: просмотр видео-трансляций), при значении 10 потеря информации пользователя исключается (у пользователя максимальные требования по надежности)
r_j (точка доступа)	[1, 10]	при значении 1 возможна потеря информации (до 20 %), при значении 10 потеря информации пользователя исключается.
d_i (пользователь)	[1, 10]	при значении 1 информация пользователя является несекретной, значение 5 соответствует среднему уровню требования по защите при значении 10 информация является конфиденциальной,
d_j (точка доступа)	[1, 10]	при значении 1 точка доступа имеет тривиальные меры защиты, при значении 10 точка доступа имеет самые строгие меры защиты данных от взлома.

Рассмотрим правила расчета характеристик для подключения пользователя i ($\forall i \in \Psi$) доступа j ($\forall i \in \Theta$):

(1) Надежность: $r_{ij} = \min\{r_i, r_j\}$.

(2) Расстояние: l_{ij} .

(3) Признак барьера: $e_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{имеется препятствие/барьер,} \\ 0, & \text{препятствия нет.} \end{cases}$

(4) Интегрированный параметр, объединяющий барьер и расстояние ($L_{max} = \max_{\{(i,j)\}} l_{ij}$):

$$\beta_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } ((l_{ij} > L_{max}/2) \& (e_{ij} = 1)), \\ 5, & \text{если } ((l_{ij} < L_{max}/2) \& (e_{ij} = 1)) \text{ или } ((L_{max} \geq l_{ij} > L_{max}/2) \& (e_{ij} = 0)), \\ 10, & \text{если } ((l_{ij} < L_{max}/2) \& (e_{ij} = 0)). \end{cases}$$

Признак "связности" по β_{ij} : $\xi_{ij}^{\beta} = \begin{cases} 0, & \text{если } \beta_{ij} = 0, \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases}$

(5) Уровень класса обслуживания (приоритет): $p_{ij} = p_i$.

(6) Требуемая/возможная полоса пропускания для соединения: f_{ij} (на начальной стадии $f_{ij} = f_i$). Рассматриваются три случая:

(а) при $p_{ij} = 1$: $f_{ij} = f_i$,

(б) при $p_{ij} = 2$: $f_{ij} = \begin{cases} f_i, & \text{если } (\max_j f_j - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m f_j) \geq f_i, \\ \max_j f_j - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m f_j, & \text{если } (\max_j f_j - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m f_j) < f_i, \end{cases}$

(в) при $p_{ij} = 3$: $f_{ij} = \begin{cases} f_i, & \text{если } (\max_j f_j - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m f_j) \geq f_i, \\ \max_j f_j - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m f_j, & \text{если } (\max_j f_j - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m f_j) < f_i; \end{cases}$

Здесь учитывается то, что трафик может быть двух видов: (i) *elastic* (сервис пользователя использует только доступную полосу пропускания), (ii) *non-elastic* (пользователь имеет требования к определенной полосе пропускания для его сервисов).

(7) Показатель уровня защиты передачи данных: d_{ij} . Рассматриваются три случая:

- (а) при $p_{ij} = 1$: $d_{ij} = \begin{cases} d_j, & \text{если } d_j \geq d_i, \\ 0, & \text{если } d_j < d_i; \end{cases}$
- (б) при $p_{ij} = 2$: $d_{ij} = \begin{cases} d_j, & \text{если } d_j \geq d_i/2, \\ 0, & \text{если } d_j < d_i/2; \end{cases}$
- (в) при $p_{ij} = 3$: $d_{ij} = d_j$.

Признак "связности" по d_{ij} : $\xi_{ij}^d = \begin{cases} 0, & \text{если } d_{ij} = 0, \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases}$

Дополнительно для каждого пользователя определяется (на основе $\xi_{ij}^\beta, \xi_{ij}^d$) подмножество возможных для подключения точек доступа: $\forall i \in \Psi$ выделяется $\Theta_i \subseteq \Theta$. Очевидно, что при $|\Theta_i| = 0$, пользователь i может быть исключен из дальнейшего рассмотрения. На Рис. 2 иллюстрирована схема обработки исходных данных.

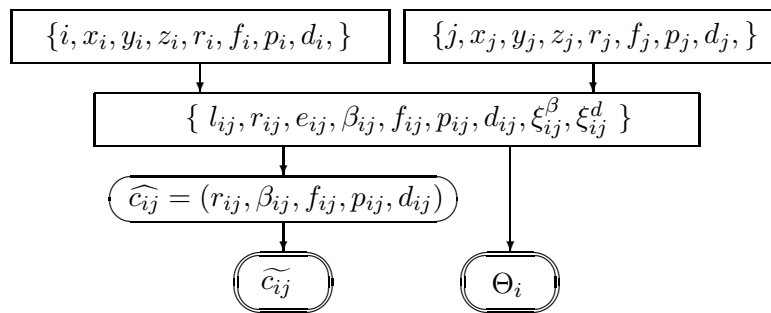


Рис. 2. Схема обработки данных

Будем использовать следующие набор обобщенных характеристик решения задачи (некий упрощенный аддитивный вариант для используемых критериев):

- (а) обобщенная надежность $R(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m r_{ij} x_{ij}$,
- (б) обобщенный параметр качества распространения сигналов $B(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \beta_{ij} x_{ij}$,
- (в) обобщенное качество использования частотного спектра $F(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{ij} x_{ij}$,
- (г) обобщенная характеристика обслуживания $P(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} x_{ij}$,
- (д) обобщенная характеристика уровня защиты передачи $D(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_{ij} x_{ij}$.

В результате получаем векторную характеристику решения X :

$$\overline{C(X)} = (R(X), B(X), F(X), P(X), D(X)).$$

Далее введем ограничения:

- (1) Ограничение на полосу пропускания точки доступа j : $\sum_{i=1}^n f_{ij} x_{ij} \leq f_j \quad \forall j \in \Theta$, где f_j - максимум полосы пропускания точки доступа j .
- (2) Ограничение на число пользователей, которые могут быть подключены к точке доступа j : $\sum_{i=1}^n x_{ij} \leq n_j \quad \forall j \in \Theta$, где n_j - максимум числа пользователей для точки доступа j .
- (3) Ограничение по подключению пользователя к точкам доступа (здесь полагаем, что каждый пользователь подключается только к одной точке доступа): $\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in \Psi$.

Таким образом получилась следующая многокритериальная задача:

$$\begin{aligned} \max R(X) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j \in \Theta_i} r_{ij} x_{ij}, & \max B(X) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j \in \Theta_i} \beta_{ij} x_{ij}, \\ \max F(X) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j \in \Theta_i} f_{ij} x_{ij}, & \max P(X) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j \in \Theta_i} p_{ij} x_{ij}, \end{aligned}$$

$$\max D(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in \Theta_i} d_{ij} x_{ij}$$

при ограничениях:

$$\sum_{i=1}^n f_{ij} x_{ij} \leq f_j \quad \forall j \in \Theta, \quad \sum_{i=1}^n x_{ij} \leq n_j \quad \forall j \in \Theta, \quad \sum_{j \in \Theta_i} x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in \Psi,$$

$$x_{ij} = 0 \cup 1, \quad \forall i = \overline{1, n}, \quad \forall j = \overline{1, m}, \quad x_{ij} = 0, \quad \forall i = \overline{1, n}, \quad j \in \{\Theta \setminus \Theta_i\}.$$

3. СХЕМА РЕШЕНИЯ

Получившаяся многокритериальная обобщенная задача о назначении относится к классу NP-трудных задач ([6], [22], [23], [24], [25]). Последние десятилетия проводятся активные исследования многокритериальных задач о назначении/размещении ([4], [5], [8], [11], [12], [17], [19], [23], [26], [28]). Обычно используются следующие основные подходы к решению данной задачи:

- (1) переборные методы типа ветвей и границ ([22], [23]);
- (2) интерактивные (человеко-машинные) процедуры [11];
- (3) сведение (reduction) исходной модели к некоторой упрощенной постановке (problem simplification), например сведение исходной многокритериальной задачи к однокритериальной постановке и использование эффективного (т.е., полиномиального) алгоритма, например, венгерского метода [10];
- (4) эвристические подходы, включая следующие: (а) простейшие "жадные" алгоритмы, (б) вероятностные методы, (в) мета-эвристики (включая гибридные методы), (г) поиск на основе изменяемой окрестности (variable neighborhood search VNS), (д) генетические алгоритмы, эволюционную многокритериальную оптимизацию (evolutionary multiobjective optimization) ([3], [5], [19], [20], [21], [27]).

В данной работе были рассмотрены следующие три схемы решения:

Схема 1. Переборный алгоритм.

Схема 2. Двух-этапная эвристика: (i) упрощение задачи на основе отображения вектора характеристик соединения "пользователь-точка доступа" к порядковой оценке (на основе многокритериального ранжирования с использованием варианта метода порогов несравнимости Electre [18]), (ii) решение получившейся однокритериальной задачи о назначении на основе "жадного" алгоритма.

Схема 3. Трех-этапная эвристика: (i) решение исходной многокритериальной задачи для каждого критерия отдельно с формированием в каждом случае набора решений, (ii) объединение наборов полученных решений и выделение Парето-эффективного подмножества решений, (iii) анализ полученного набора Парето-эффективных решений и выявление лучшего (или нескольких лучших) решений (с использованием специальных дополнительных правил и/или экспертов).

Далее приведены расчеты на основе схемы 2. Следует отметить, что исследуемая задача подключения пользователей имеет широкое применение для динамических режимов работы телекоммуникационных сетей (т.е., Ad Hoc сети, мобильные сети, mesh сети) и для решения рассматриваемой задачи имеется крайне ограниченный временной интервал. Такая ситуация приводит к необходимости использования очень быстрых эвристик (типа жадных алгоритмов).

4. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР

Пример включает 30 пользователей и 6 точек доступа (Рис. 3). Исходные данные по точкам доступа и пользователям представлены в Таблицах 2 и 3.

Таблица 2. Точки доступа

j	x_j	y_j	z_j	f_j	n_j	r_j	d_j
1	50	157	10	30	4	10	10
2	150	165	10	30	5	15	8
3	72	102	10	21	6	10	9
4	140	112	10	21	5	8	8
5	45	52	10	35	10	10	10
6	147	47	10	30	5	15	7

Таблица 3. Пользователи

i	x_i	y_i	z_i	f_i	p_i	r_i	d_i
1	30	165	5	10	2	5	8
2	58	174	5	5	1	9	6
3	88	156	0	6	1	6	8
4	110	169	5	7	2	5	6
5	145	181	3	5	2	4	6
6	170	161	5	7	2	4	7
7	23	136	7	6	2	7	6
8	52	134	5	6	1	8	7
9	85	134	3	6	1	7	7
10	120	140	6	4	2	6	8
11	150	136	3	6	2	7	8
12	175	125	1	8	3	5	6
13	27	109	7	8	3	5	8
14	55	105	2	7	2	10	6
15	98	89	3	10	1	10	7
16	107	115	4	7	1	7	10
17	127	95	5	7	2	5	7
18	160	104	5	9	2	4	5
19	183	91	4	4	3	5	7
20	25	65	2	7	3	5	6
21	52	81	1	10	1	8	10
22	82	66	4	14	2	3	7
23	112	56	10	10	1	10	9
24	135	59	4	13	3	4	6
25	147	79	5	7	3	16	8
26	165	50	3	7	3	3	7
27	23	31	4	8	1	7	6
28	65	25	7	6	2	9	8
29	93	39	1	10	1	10	9
30	172	26	2	10	2	7	6

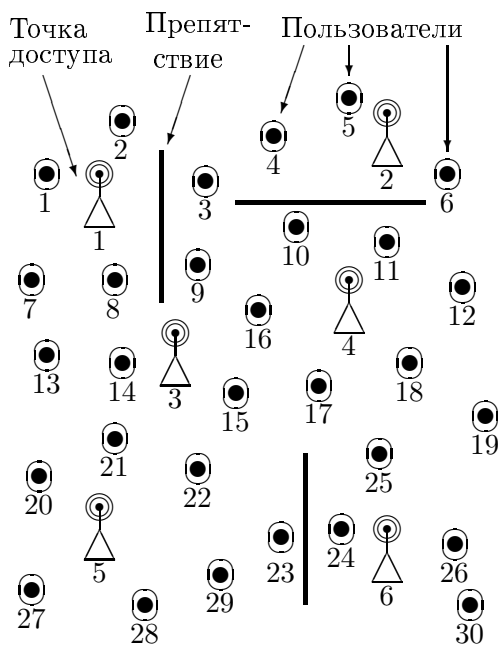


Рис. 3. Исходный пример

Таблицы 4, 5, 6, 7 содержат рассчитанные параметры. Векторы $(\xi_{ij}^\beta, \xi_{ij}^d)$ (таблица 6) определяют множества $\{\Theta_i\}$ ($i = \overline{1, n}$): $\Theta_1 = \{1, 3, 5\}$, $\Theta_2 = \{1, 2, 3, 5\}$, $\Theta_3 = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, $\Theta_4 = \{1, 2, 3, 4\}$, $\Theta_5 = \{2, 4\}$, $\Theta_6 = \{2, 4, 6\}$, $\Theta_7 = \{1, 3, 5\}$, $\Theta_8 = \{1, 3, 4, 5\}$, $\Theta_9 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, $\Theta_{10} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, $\Theta_{11} = \{2, 3, 4, 5, 6\}$, $\Theta_{12} = \{2, 3, 4, 5, 6\}$, $\Theta_{13} = \{1, 3, 4, 5\}$, $\Theta_{14} = \{1, 3, 4, 5\}$, $\Theta_{15} = \{1, 3, 4, 5, 6\}$, $\Theta_{16} = \{1, 5\}$, $\Theta_{17} = \{2, 3, 4, 5, 6\}$, $\Theta_{18} = \{2, 3, 4, 5, 6\}$, $\Theta_{19} = \{2, 3, 4, 6\}$, $\Theta_{20} = \{1, 3, 4, 5\}$, $\Theta_{21} = \{1, 5\}$, $\Theta_{22} = \{1, 3, 4, 5, 6\}$, $\Theta_{23} = \{1, 3, 5\}$, $\Theta_{24} = \{3, 4, 5, 6\}$, $\Theta_{25} = \{2, 3, 4, 6\}$, $\Theta_{26} = \{4, 6\}$, $\Theta_{27} = \{1, 3, 4, 5\}$, $\Theta_{28} = \{1, 3, 4, 5, 6\}$, $\Theta_{29} = \{1, 3, 5\}$, $\Theta_{30} = \{4, 6\}$.

Расчет интегрированных показателей соответствия \widetilde{c}_{ij} (таблица 8) осуществляется за счет отображения векторной оценки \widehat{c}_{ij} (таблица 7) на порядковую шкалу [1,3] (3 соответствует наилучшему уровню соответствия, используется многокритериальное ранжирование на основе модификация метода ELECTRE [18]). Дополнительно в таблице 7 учтены множества $\{\Theta_i\}$ (т.е., $\widetilde{c}_{ij} = 0$ если $j \in \{\Theta \setminus \Theta_i\}$).

Таким образом получается и решается упрощенная (simplified) задача о назначении (с одним интегрированным критерием, каждый пользователь может подключаться только к одной точке доступа):

$$\max \sum_{i=1}^n \sum_{j \in \Theta_i} \widetilde{c}_{ij} x_{ij}$$

при ограничениях:

$$\sum_{i=1}^n f_{ij} x_{ij} \leq f_j \quad \forall j \in \Theta, \quad \sum_{i=1}^n x_{ij} \leq n_j \quad \forall j \in \Theta, \quad \sum_{j \in \Theta_i} x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in \Psi,$$

$$x_{ij} = 0 \cup 1, \quad \forall i = \overline{1, n}, \quad \forall j = \overline{1, m}, \quad x_{ij} = 0, \quad \forall i = \overline{1, n}, \quad j \in \{\Theta \setminus \Theta_i\}.$$

Результаты решения задачи (т.е., вариант подключения пользователей к точкам доступа) представлены на Рис. 4 и в таблице 9.

Таблица 4. Матрица расстояний $\|l_{ij}\|$

i	Точки доступа j					
	1	2	3	4	5	6
1	22.11	120.10	75.88	122.20	114.10	166.25
2	19.44	92.57	73.52	102.92	122.79	155.16
3	39.31	63.44	57.20	68.85	112.98	124.35
4	61.39	40.51	77.19	64.61	133.94	127.59
5	98.23	18.17	107.79	69.53	163.37	134.20
6	120.17	21.00	114.50	57.67	165.2	116.40
7	34.34	130.30	59.72	119.47	86.89	152.66
8	23.62	102.91	38.07	90.85	82.45	128.91
9	42.46	72.35	35.24	59.65	91.50	107.06
10	72.15	39.26	61.35	34.64	115.69	96.92
11	102.42	29.83	85.38	26.93	134.65	89.33
12	129.34	48.02	105.92	38.41	149.37	83.36
13	53.31	135.18	45.64	113.08	59.85	135.10
14	52.85	112.65	19.03	85.66	54.53	109.05
15	83.53	92.35	29.90	48.39	65.02	64.92
16	71.06	66.22	37.82	33.67	88.59	79.12
17	98.98	73.85	55.67	21.98	92.73	52.24
18	122.20	62.02	88.16	22.11	126.31	58.68
19	148.60	81.25	111.71	48.23	143.53	57.17
20	95.67	160.28	60.35	124.49	25.16	123.58
21	76.56	129.39	30.36	93.73	31.16	101.30
22	96.65	120.25	37.84	74.27	40.01	67.99
23	118.51	115.43	60.96	62.61	67.12	36.14
24	129.87	107.22	76.51	53.57	90.47	18.00
25	124.57	86.20	78.61	34.10	105.63	32.39
26	157.24	116.19	106.78	67.22	120.22	19.54
27	129.00	184.72	86.48	142.43	31.00	125.17
28	132.88	163.81	77.38	114.90	33.73	84.95
29	125.91	138.59	67.01	87.29	50.54	55.33
30	179.19	140.96	125.86	92.11	129.88	33.62

Таблица 5. Матрица $\|e_{ij}\|$

i	Точки доступа j					
	1	2	3	4	5	6
1	0	1	0	1	0	1
2	0	0	1	1	0	1
3	1	0	0	0	0	0
4	1	0	1	1	1	1
5	1	0	1	1	1	1
6	1	0	1	0	1	0
7	0	1	0	1	0	1
8	0	1	0	1	0	1
9	1	1	0	0	0	1
10	1	1	0	0	0	0
11	1	1	0	0	0	0
12	1	1	0	0	0	0
13	0	1	0	0	0	1
14	0	1	0	0	0	1
15	1	1	0	0	0	1
16	1	1	0	0	0	0
17	1	1	0	0	0	0
18	1	1	0	0	0	0
19	1	1	0	0	1	0
20	0	1	0	0	0	1
21	0	1	0	0	0	1
22	0	1	0	0	0	1
23	0	1	0	1	0	1
24	1	1	1	0	1	0
25	1	1	0	0	1	0
26	1	1	1	0	1	0
27	0	1	0	0	0	1
28	0	1	0	0	0	1
29	0	1	0	0	0	1
30	1	1	1	0	1	0

Таблица 6. Матрица векторов $\|(\xi_{ij}^\beta, \xi_{ij}^d)\|$

i	Точки доступа j					
	1	2	3	4	5	6
1	1,1	0,1	1,1	0,1	1,1	0,1
2	1,1	1,1	1,1	0,1	1,1	0,1
3	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	0,0
4	1,1	1,1	1,1	1,1	0,1	0,1
5	0,1	1,1	0,1	1,1	0,1	0,1
6	0,1	1,1	0,1	1,1	0,1	1,1
7	1,1	0,1	1,1	0,1	1,1	0,1
8	1,1	0,1	1,1	1,1	1,1	0,1
9	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
10	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
11	0,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
12	0,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
13	1,1	0,1	1,1	1,1	1,1	0,1
14	1,1	0,1	1,1	1,1	1,1	0,1
15	1,1	0,1	1,1	1,1	1,1	1,1
16	1,1	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0
17	0,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
18	0,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
19	0,1	1,1	1,1	1,1	0,1	1,1
20	1,1	0,1	1,1	1,1	1,1	0,1
21	1,1	0,0	1,0	1,0	1,1	0,0
22	1,1	0,1	1,1	1,1	1,1	1,1
23	1,1	0,0	1,1	1,0	1,1	1,0
24	0,1	0,1	1,1	1,1	1,1	1,1
25	0,1	1,1	1,1	1,1	0,1	1,1
26	0,1	0,1	0,1	1,1	0,1	1,1
27	1,1	0,1	1,1	1,1	1,1	0,1
28	1,1	0,1	1,1	1,1	1,1	1,1
29	1,1	0,0	1,1	1,0	1,1	1,0
30	0,1	0,1	0,1	1,1	0,1	1,1

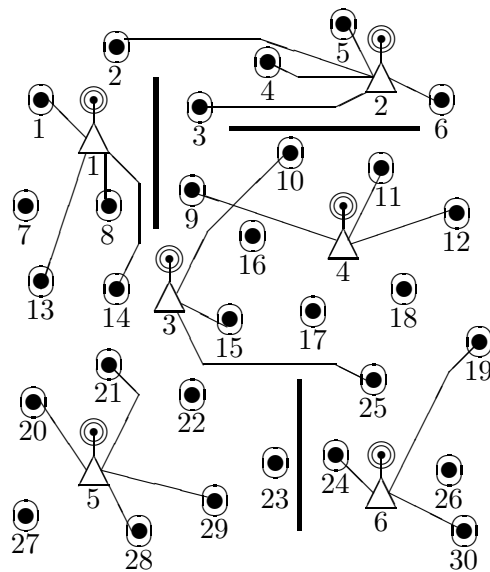


Рис. 4. Подключение пользователей

Таблица 7. Матрица $\|\widehat{c}_{ij}\| = \|(r_{ij}, \beta_{ij}, f_{ij}, p_{ij}, d_{ij})\|$

i	Точки доступа j					
	1	2	3	4	5	6
1	5, 10, 10, 2, 10	5, 0, 10, 2, 8	5, 10, 10, 2, 9	5, 0, 10, 2, 8	5, 5, 10, 2, 10	5, 0, 10, 2, 7
2	9, 10, 5, 1, 10	9, 5, 5, 1, 8	9, 5, 5, 1, 9	8, 0, 5, 1, 8	9, 5, 5, 1, 10	9, 0, 5, 1, 7
3	6, 5, 6, 1, 10	6, 10, 6, 1, 8	6, 10, 6, 1, 9	6, 10, 6, 1, 8	6, 5, 6, 1, 10	6, 0, 6, 1, 0
4	5, 5, 7, 2, 10	5, 10, 7, 2, 8	5, 5, 7, 2, 9	5, 5, 7, 2, 8	5, 0, 7, 2, 10	5, 0, 7, 2, 7
5	4, 0, 5, 2, 10	4, 10, 5, 2, 8	4, 0, 5, 2, 9	4, 5, 5, 2, 8	4, 0, 5, 2, 10	4, 0, 5, 2, 7
6	4, 0, 7, 2, 10	4, 10, 7, 2, 8	4, 0, 7, 2, 9	4, 10, 7, 2, 8	4, 0, 7, 2, 10	4, 5, 7, 2, 7
7	7, 10, 6, 2, 10	7, 0, 6, 2, 8	7, 10, 6, 2, 9	7, 0, 6, 2, 8	7, 10, 6, 2, 10	7, 0, 6, 2, 7
8	8, 10, 6, 1, 10	8, 0, 6, 1, 8	8, 10, 6, 1, 9	8, 5, 6, 1, 8	8, 10, 6, 1, 10	8, 0, 6, 1, 7
9	7, 5, 6, 1, 10	7, 5, 6, 1, 8	7, 10, 6, 1, 9	7, 10, 6, 1, 8	7, 10, 6, 1, 10	7, 0, 6, 1, 7
10	6, 5, 4, 2, 10	6, 5, 4, 2, 8	6, 10, 4, 2, 9	6, 10, 4, 2, 8	6, 5, 4, 2, 10	6, 5, 4, 2, 7
11	7, 0, 6, 2, 10	7, 5, 6, 2, 8	7, 5, 6, 2, 9	7, 10, 6, 2, 8	7, 5, 6, 2, 10	7, 10, 6, 2, 7
12	5, 0, 8, 3, 10	5, 5, 8, 3, 8	5, 5, 8, 3, 9	5, 10, 8, 3, 8	5, 5, 8, 3, 10	5, 10, 8, 3, 7
13	5, 10, 8, 3, 10	5, 0, 8, 3, 8	5, 10, 8, 3, 9	5, 5, 8, 3, 8	5, 10, 8, 3, 10	5, 0, 8, 3, 7
14	10, 10, 7, 2, 10	10, 0, 7, 2, 8	10, 10, 7, 2, 9	8, 10, 7, 2, 8	10, 10, 7, 2, 10	10, 0, 7, 2, 7
15	10, 5, 10, 1, 10	10, 0, 10, 1, 8	10, 10, 10, 1, 9	8, 10, 10, 1, 8	10, 10, 10, 1, 10	10, 5, 10, 1, 7
16	7, 5, 7, 1, 10	7, 5, 7, 1, 0	7, 10, 7, 1, 0	7, 10, 7, 1, 0	7, 10, 7, 1, 10	7, 10, 7, 1, 0
17	5, 0, 7, 2, 10	5, 5, 7, 2, 8	5, 10, 7, 2, 9	5, 10, 7, 2, 8	5, 5, 7, 2, 10	5, 5, 7, 2, 7
18	4, 0, 9, 2, 10	4, 5, 9, 2, 8	4, 10, 9, 2, 9	4, 10, 9, 2, 8	4, 5, 9, 2, 10	4, 10, 9, 2, 7
19	5, 0, 4, 3, 10	5, 5, 4, 3, 8	5, 5, 4, 3, 9	5, 10, 4, 3, 8	5, 0, 4, 3, 10	5, 10, 4, 3, 7
20	5, 5, 7, 3, 10	5, 0, 7, 3, 8	5, 10, 7, 3, 9	5, 5, 7, 3, 8	5, 10, 7, 3, 10	5, 0, 7, 3, 7
21	8, 10, 10, 1, 10	8, 0, 10, 1, 0	8, 10, 10, 1, 0	8, 5, 10, 1, 0	8, 10, 10, 1, 10	8, 0, 10, 1, 0
22	3, 5, 10, 2, 10	3, 0, 10, 2, 8	3, 10, 10, 2, 9	3, 10, 10, 2, 8	3, 10, 10, 2, 10	3, 5, 10, 2, 7
23	10, 5, 10, 1, 10	10, 0, 10, 1, 0	10, 10, 10, 1, 9	8, 5, 5, 1, 0	10, 10, 10, 1, 10	10, 5, 10, 1, 0
24	4, 0, 10, 3, 10	4, 0, 10, 3, 8	4, 5, 10, 3, 9	4, 10, 10, 3, 8	4, 5, 10, 3, 10	4, 10, 10, 3, 7
25	10, 0, 7, 3, 10	15, 5, 7, 3, 8	10, 10, 7, 3, 9	8, 10, 7, 3, 8	10, 0, 7, 3, 10	15, 10, 7, 3, 7
26	3, 0, 7, 3, 10	3, 0, 7, 3, 8	3, 0, 7, 3, 9	3, 10, 7, 3, 8	3, 0, 7, 3, 10	3, 10, 7, 3, 7
27	7, 5, 8, 1, 10	7, 0, 8, 1, 8	7, 10, 8, 1, 9	7, 5, 8, 1, 8	7, 10, 8, 1, 10	7, 0, 8, 1, 7
28	9, 5, 6, 2, 10	9, 0, 6, 2, 8	9, 10, 6, 2, 9	8, 5, 6, 2, 8	9, 10, 6, 2, 10	9, 5, 6, 2, 7
29	10, 5, 10, 1, 10	10, 0, 10, 1, 0	10, 10, 10, 1, 9	8, 10, 10, 1, 0	10, 10, 10, 1, 10	10, 5, 10, 1, 0
30	7, 0, 10, 2, 10	7, 0, 10, 2, 8	7, 0, 10, 2, 9	7, 10, 10, 2, 8	7, 0, 10, 2, 10	7, 10, 10, 2, 7

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в работе подход является первым шагом в использовании многокритериальных комбинаторных моделей при подключении пользователей к точкам доступа беспроводной телекоммуникационной сети. Основное внимание было уделено новой постановке задачи и простой схеме решения. Очевидно, что следует провести дальнейшие исследования:

1. В области постановки задачи:

(1) уточнение постановки: (а) состав и правила пересчета параметров пользователей и точек доступа, интегрированных показателей, правила, например, интегрированные показатели (барьер-расстояние β_{ij}), показатели качества распространения сигналов (f_{ij}); (б) множество критериев, (в) множество ограничений;

(2) возможность применения других режимов управления, например: многошаговые (multi-hop) схемы связи, режим P2P;

(3) учет мобильности точек доступа (и пользователей);

(4) учет режима расширения множества пользователей (т.е., подключение дополнительных пользователей в процессе работы системы);

(5) расширение использованной постановки задачи на основе возможности подключения каждого пользователя к нескольким точкам доступа.

2. В области моделей:

(1) использование более сложных оптимизационных моделей с учетом неопределенности, например, модели на основе размытых множеств, модели стохастической оптимизации;

(2) учет взаимосвязи "соседних" подключений (для учета возможных коллизий, взаимного влияния), например, на основе задачи квадратичного назначения ([2], [24]) или подхода иерархического морфологического проектирования (т.е., задачи морфологической клики) ([13], [17]).

3. В области методов решения: реализация различных схем решения (включая переборные методы, генетические алгоритмы, мета-эвристики) и проведение сравнительных вычислительных экспериментов на основе специальных тестовых числовых примеров.

Предварительный материал для данной статьи был подготовлен в рамках курса "Проектирование систем" (МФТИ, автор и лектор: М.Ш. Левин) ([15], [16]) как лабораторная работа 9 (2007 г., студент: М.В. Петухов) и бакалаврская работа М.В.Петухова (2008 г., руководитель: М.Ш. Левин).

Таблица 8. Матрица $\|c_{ij}\|$

i	Точки доступа j					
	1	2	3	4	5	6
1	3	0	3	0	3	0
2	2	1	1	0	2	0
3	1	1	1	1	1	0
4	1	1	2	1	0	0
5	0	1	0	1	0	0
6	0	1	0	1	0	1
7	1	0	2	0	1	0
8	2	0	2	1	2	0
9	1	1	1	1	1	1
10	2	1	1	1	1	1
11	0	1	2	1	3	1
12	0	3	3	3	3	2
13	3	0	3	3	3	0
14	3	0	3	3	3	0
15	3	0	3	3	3	2
16	2	0	0	0	3	0
17	0	1	3	1	2	1
18	0	1	2	1	3	1
19	0	1	2	1	0	1
20	3	0	3	2	1	0
21	3	0	0	0	3	0
22	2	0	1	1	2	1
23	3	0	3	0	3	0
24	0	0	3	3	3	2
25	0	3	3	3	0	3
26	0	0	0	1	0	1
27	3	0	2	1	3	0
28	3	0	3	3	3	2
29	3	0	3	0	3	0
30	0	0	0	3	0	3

Таблица 9. Вариант подключения

i	Точки доступа j					
	1	2	3	4	5	6
1	1	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0
6	0	1	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	1	0	0
10	0	0	1	0	0	0
11	0	0	0	1	0	0
12	0	0	0	1	0	0
13	1	0	0	0	0	0
14	1	0	0	0	0	0
15	0	0	1	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	1
20	0	0	0	0	1	0
21	0	0	0	0	1	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	1
25	0	0	1	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	1	0
29	0	0	0	0	1	0
30	0	0	0	0	0	1

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bartolacci M.R., Peltserger B., Koal A., Peltserger S., Allocation of multiple wireless access points in mobile networks, *Proc. of the 42nd ACM Southeast Regional Conf.*, Alabama, pp. 1-4, 2004.
2. Cela E., *The Quadratic Assignment Problem*, Dordrecht: Kluwer, 1998.

3. Coello C.A.C., Van Veldhuizen D.A., Lamont G.B., *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Dordrecht: Kluwer, 2002.
4. Current J., Min H., Schilling D., Multiobjective analysis of facility location decisions, *EJOR*, 1990, vol. 49, no. 3, pp. 295-300.
5. Drexel A., Nikulin Y., Multicriteria airport gate assignment and Pareto simulated annealing. *IIE Transactions*, 2008, vol. 40, no. 4, pp. 385-397.
6. Garey M.R., Johnson D.S., *Computers and Intractability. The Guide to the Theory of NP-Completeness*, New York: Freeman, 1979.
7. Jayant N. (Ed.). *Broadband Last Mile: Access Technologies for Multimedia Communications*. London: CRC Press/Taylor&Francis, 2005.
8. Klingman D., Phillips N.V., Topological and computational aspects of preemptive multicriteria military personnel assignment problems. *Management Science*, 1984, vol. 30, no. 11, pp. 1362-1375.
9. Koutsopoulos I., Tassiulas L., Joint optimal access point selection and channel assignment in wireless networks, *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2007, vol. 15, no. 3, pp. 521-532.
10. Kuhn H.W., The Hungarian method for the assignment problems, *Nav. Res. Log.*, 1955, vol. 2, no. 1-2, pp. 83-97 (reprinted in *Nav. Res. Log.*, 2005, vol. 52, no. 1, pp. 7-21).
11. Larichev O.I., Sternin M., Man-computer approaches to the multicriteria assignment problem, *Autom. & Remote Control*, 1998, vol. 59, no. 7, pp. 135-155.
12. Lee S.M., Schniederjans M.J., A multicriteria assignment problem: a goal programming approach, *Interfaces*, 1983, vol. 13, no. 4, pp. 75-81.
13. Levin M.Sh., *Combinatorial Engineering of Decomposable Systems*, Dordrecht: Kluwer, 1998.
14. Levin M.Sh., *Composite Systems Decisions*, New York: Springer-Verlag, 2006.
15. Levin M.Sh., Course 'System design: structural approach', *Proc. of 18th Int. Conf. Design Meth. and Theory DTM2006*, Philadelphia, DETC2006-99547, pp. 2006.
16. Levin M.Sh., Student research projects in system design, *Proc. of 1st Int. Conf. CSEDU 2009*, Lisbon, 2009, pp. 291-295.
17. Levin M.Sh., Combinatorial optimization in system configuration design, *Autom. & Remote Control*, 2009, vol. 70, no. 3, 519-561.
18. Левин М.Ш., Михайлов А.А., *Фрагменты технологии стратификации множества объектов*, Препринт, Москва: ИСА РАН, 1988.
19. Liang Y.-C., Lo M.-H., Multi-objective redundancy allocation optimization using a variable neighborhood search algorithm. *J. of Heuristics*, 2010 (in press).
20. Lopez-Ibanez M., Paquete L., Stutzle T., Hybrid population-based algorithms for the Bi-objective quadratic assignment problem. *J. of Math. Modelling and Algorithms*, 2006, vol. 5, no. 1, pp. 111-137.
21. Lucic P., Teodorovic D., Simulated annealing for the multi-objective aircrew rostering problem. *Transportation Research, Part A*, 1999, vol. 33, no. 1, pp. 19-45.
22. Oncan T., A survey on the generalized assignment problem, *INFOR*, 2007, vol. 45, no. 3, pp. 123-141.
23. Orgyczak W., Wierzbicki A., Milewski M., On multi-criteria approach to fair and efficient bandwidth allocation. *Omega*, 2008, vol. 36, no. 3, pp. 451-463.
24. Pardalos P.M., Wolkowicz H., Eds., *Quadratic Assignment and Related Problems*, Prov.: AMS, 1994.
25. Рубинштейн М.И., *Оптимальная группировка взаимосвязанных объектов*, Москва: Наука, 1989.
26. Scarelli A., Narula S.C., A multicriteria assignment problem, *J. of Multi-Criteria Dec. Anal.*, 2002, vol. 11, no. 2, pp. 65-74.
27. Tuytens D., Teghem J., Fortemps Ph., Van Nieuwenhuyze K., Performance of the MOSA method for the bicriteria assignment problem. *J. of Heuristics*, 2000, vol. 6, no. 3, pp. 295-310.
28. White D.J., A special multi-objective assignment problem, *J. of ORS*, 1984, vol. 35, no. 8, pp. 759-767.