

# Оптимизация топологии беспроводных сетей - решение для направленных антенн

Ай Мин Тайк, С.А. Лупин, Д.А. Федяшин

**Аннотация**— Беспроводные сети стали важной частью коммуникационной инфраструктуры, обеспечивающей доступ мобильных клиентов к разнообразным сервисам. Процесс разработки топологии беспроводной сети связан с решением многокритериальных оптимизационных задач. Это вычислительно сложная процедура, особенно для направленных антенн, поскольку для каждого узла сети необходимо определить три параметра: координаты антенны и угол излучения. Направленные антенны в узлах сети обеспечивают большую дальность передачи сигнала, чем всенаправленные антенны и снижают уровень помех. В работе оценивается возможность использования параллельной реализации алгоритма перебора для построения оптимальной топологии беспроводной сети с направленными антеннами в ее узлах. Критерием оптимальности решения является количество жителей, попадающих в зону покрытия и имеющих доступ к сетевым сервисам. Приведены результаты вычислительных экспериментов, иллюстрирующие масштабируемость и производительность параллельной реализации алгоритма перебора. Представлена оценка эффективности параллельного приложения в среде Intel Parallel Studio и результаты Locks and Waits анализа. В качестве вычислительной платформы в экспериментах использовалась рабочая станция с двумя 6-ти ядерными процессорами E5-2630 v2 (2.6 GHz), поддерживающими выполнение многопоточных приложений.

**Ключевые слова**— оптимизация; параллельный алгоритм перебора; топология беспроводных сетей.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время беспроводные сети становятся все более популярным выбором для пользователей, которым необходимы услуги по передаче данных. Увеличение дальности связи и расширение зоны доступа к Интернету в беспроводных сетях может поддерживаться с помощью направленных антенн. Узлы в наружных беспроводных сетях, оснащенные направленными антеннами, часто служат в качестве инфраструктуры для подключения к интернету или магистрали сети, и они обычно имеют больший диапазон передачи [1].

В беспроводной сети направленные антенны обеспечивают уменьшение помех, увеличение диапазона покрытия и улучшение качества сетевых услуг.

При равной мощности передатчика, направленные антенны обеспечивают передачу сигнала на большее расстояние, чем всенаправленные антенны, за счет того, что энергия концентрируется только в одном направлении. Напротив, всенаправленная антенна распределяет сигнал по всем направлениям, но на меньшее расстояние.

Статья получена 21 апреля 2018. Статья подготовлена в рамках гранта РФФИ 16-07-01055\18 "Адаптация ресурсоемких алгоритмов к распределенной вычислительной среде". Ай Мин Тайк, аспирант, Национальный исследовательский университет «МИЭТ»; С. А. Лупин, профессор, Национальный исследовательский университет «МИЭТ», (e-mail: lupin@miec.ru); Д. А. Федяшин, аспирант, Национальный исследовательский университет «МИЭТ».

Рисунок 1 демонстрирует диаграммы направленности для разных типов антенн.

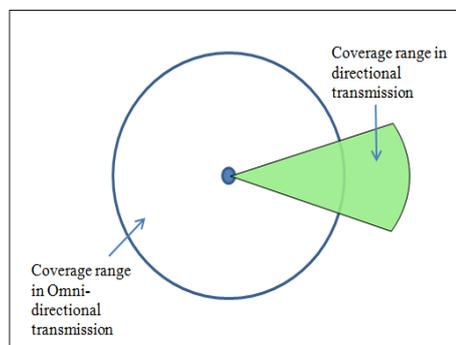


Рис. 1. Диаграммы излучения всенаправленных и направленных антенн

Проектирование топологии беспроводных сетей опирается на различные оптимизационные алгоритмы, учитывающие особенности функционала сети. Например, в [2] представлен модифицированный Ant Colony алгоритм, оптимизирующий трафик в локальной сети, состоящей из 50 сегментов. Много публикаций в последнее время посвящено беспроводным сенсорным сетям и их оптимизации. При этом основным критерием оптимальности выступают энергетические затраты на передачу пакетов в сети [3], [4], поскольку их ресурсы в узлах ограничены. Для сетей, обеспечивающих связь на ограниченной территории (кампусные сети), критерием оптимальности кроме энергетических затрат мобильных клиентов и стоимости оборудования, выступает и отсутствие “мертвых зон”, в которых доступ к сетевым сервисам недоступен. При этом число мест для размещения оборудования доступа ограничено и для поиска оптимума используются итерационные эвристические алгоритмы, например [5]. Интересный подход предложен в работе [6]. Для поиска оптимального расположения точек доступа авторы предлагают использовать интерактивную модель, позволяющую оценивать решение, которое оператор формирует вручную в графической среде. Изменение расположения узлов сети приводит к изменению критериев. Конечно, качество решения зависит от опыта работы оператора.

Следует отметить, что разнообразие подходов и алгоритмов к решению задачи оптимизации сетевых топологий, подтверждает как ее сложность, так и отсутствие общепринятого решения.

Ранее в работе [7] мы обосновали возможность применения алгоритма перебора для оптимизации топологии сетей с всенаправленными антеннами. Задача оптимизации топологии беспроводной сети для направленных антенн является более сложной из-за дополнительного аргумента – угла направления плюс к координатам.

В данной работе, мы хотим оценить возможность использования алгоритма перебора для решения задачи распределения опорных вышек с направленными антеннами в узлах беспроводной сети. В качестве критерия оптимальности решения используется число жителей, имеющих доступ к беспроводной сети.

## II. ТОПОЛОГИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ

Современное телекоммуникационное оборудование позволяет преодолевать ограничения зоны покрытия сети и обеспечивать предоставление услуг не только в больших городах, но и в удаленных населенных пунктах. Это может быть достигнуто за счет двухточечных сегментов беспроводной сети, передающих сигнал между населенными пунктами и использующих направленные антенны (рис. 2), и многоточечной беспроводной сети с использованием всенаправленных антенн внутри поселений.

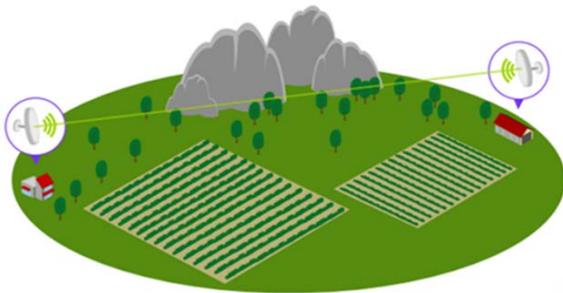


Рис. 2. Сеть точка-точка [8].

Этот пример показывает, что использование направленных антенн позволяет подключать два удаленных узла с меньшим количеством помех в беспроводной сети точка-точка.

Использование всенаправленных антенн позволяет сформировать сплошную зону покрытия в населенных пунктах и обеспечивает распределение сигнала между несколькими клиентами в многоточечной беспроводной сети [9]. В сотовой телефонии и подобных им сетях используются беспроводные топологии типа точка-многоточка [10]. Пример такого фрагмента представлен на рисунке 3.

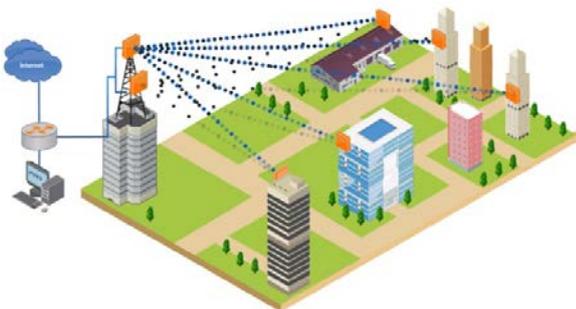


Рис. 3. Сеть точка-многоточка [11].

На рисунке 4 показаны основные параметры, определяющие использование направленных антенн в топологии: они могут передавать сигналы только в зоне, определяемой шириной луча.

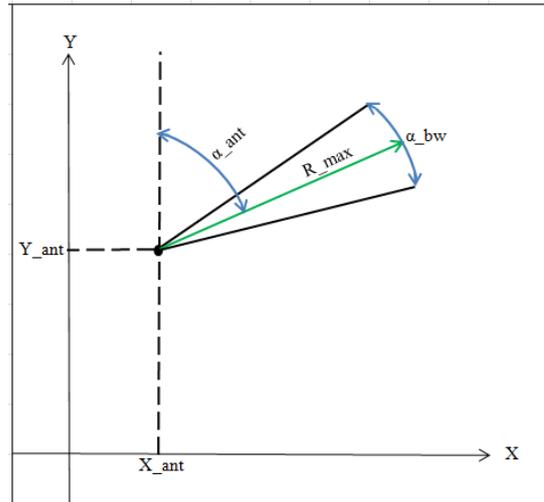


Рис. 4. Параметры антенны направленного действия. Здесь:  $X_{ant}$  и  $Y_{ant}$  - координаты установки антенны,  $R_{max}$  - максимальная дальность передачи,  $\alpha_{bw}$  - ширина диаграммы направленности луча и  $\alpha_{ant}$  - угол направленности излучения антенны.

## III. АЛГОРИТМ ПЕРЕБОРА И ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ СЕТИ

Синтез оптимальной топологии беспроводной сети можно рассматривать как задачу определения количества активных элементов и их местоположения. Качество решения задачи поиска оптимальной топологии беспроводных сетей оценивается по различным критериям [12]. В качестве критерия для оценки оптимальности решения используется уровень доступа населения к сетевым сервисам. В простейшем случае это число жителей, проживающих в зоне покрытия сети. Алгоритм перебора позволяет рассмотреть все варианты решения и выбрать из них то, которое соответствует максимуму критерия. Фрагмент территории представлен в виде матрицы [7], где элементами являются населенные пункты с известным населением.

Алгоритм позволяет найти оптимальное размещение направленных антенн между населенными пунктами и сформировать топологию сети с минимальными вложениями в инфраструктуру.

В нашем случае алгоритм перебора включает в себя следующие этапы:

- распределение антенн в позиции с координатами  $(X, Y)$  и задание угла направленности излучения  $\alpha_{ant}$ ;
- проверка видимости населенных пунктов по дальности передачи хотя бы одной из антенн;
- проверка угловой видимости населенных пунктов хотя бы одной из антенн;
- вычисление критериальной функции - суммирование числа жителей тех населенных пунктов, которые находятся в зоне покрытия сети.

Таким образом, перебрав возможные позиции и направления излучения для всех антенн, мы найдем решение, которое обеспечивает максимальное значение выбранного критерия. Отметим, что таких решений может быть несколько.

Для решения задачи используются последовательная и параллельная реализации алгоритма перебора.

Топология сети может быть представлена в виде  $N$ -мерного вектора  $\{D\}$ , элементы которого определяют положение антенн  $A_i$ :

$$\{D\} = (A_1, \dots, A_N), A_i \in \{A_k\}, \forall i = 1, N$$

$$A_i = (X_i, Y_i, \alpha_i).$$

Критериальная функция, используемая в рассматриваемом примере, может быть представлена в следующем виде:

$$F = \sum_{i=1}^L V(T_i) \cdot C_i \rightarrow \max.$$

где:

$V(T_i) = 1$ , если поселение  $T_i$  находится в зоне покрытия хотя бы одной из антенн;  $C_i$  - количество жителей в этом поселении.

#### IV. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Вычислительная сложность алгоритма перебора для задачи нахождения оптимальной топологии беспроводной сети будет определяться количеством антенн, размером территории, шагом расположения антенн на плоскости и шагом поворота по углу направленности излучения.

В наших экспериментах, тестовая задача определяется следующими параметрами:

- размер территории – 30\*30 км;
- максимальное количество антенн в топологии –  $N = 3$ ;
- количество типов антенн – 2;
- шаг по координатам – 1÷3 км;
- шаг по углу направленности –  $10^\circ$ .

Используя эти параметры можно оценить количество топологических вариантов распределения антенн [12]. При шаге 1 км число узлов сетки составит:

$$M^2 = (30/1)^2 = 900.$$

Если шаг угла направленности антенны равен  $10^\circ$ , то  $K = 360/10 = 36$ . Тогда число анализируемых вариантов решений:

$$(M^2 * K)^N = (900 * 36)^3 \approx 34 * 10^{12}.$$

При построении топологии были синтезированы все возможные размещения для трех типов антенн.

Рассматриваемый пример предполагает использование двух типов антенн, параметры которых представлены в Табл. 1.

Таблица 1. Параметры антенн

Тип	$R_{max}$ (км)	$\alpha_{pw}$ (градусы)
$A_1$	10	20
$A_2$	20	10

Диапазон передачи сигналов ( $R_{max}$ ) для антенны  $A_1$  составляет 10 км, а для антенны  $A_2$  - 20 км.

На рис. 5 показано условное расположение на территории 12 населенных пунктов.

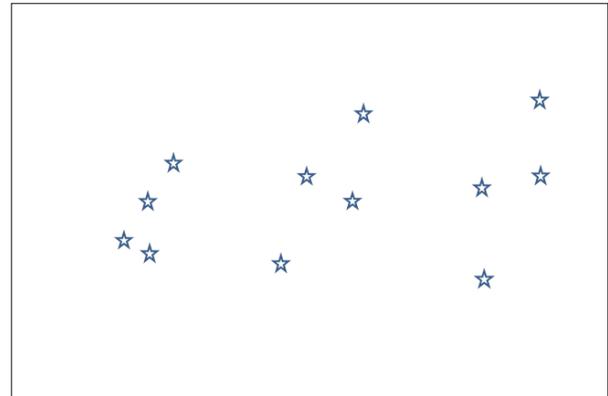


Рис. 5. Расположение населенных пунктов  
Их координаты и количество жителей представлены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики населенных пунктов

Town	X	Y	Population
1	45	8	20000
2	30	9	15000
3	14	13	22000
4	25	14	25000
5	40	15	25000
6	45	14	17000
7	29	16	35000
8	12	16	20000
9	10	19	23000
10	12	20	10000
11	23	21	25000
12	40	22	30000

#### VI. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Последовательное приложение для вычислительных экспериментов реализовано на языке программирования C++. Как отмечалось выше, алгоритм перебора имеет большую вычислительную сложность, поэтому было разработано и параллельное приложение, обеспечивающее загрузку ресурсов многоядерных процессоров. Для его создания используется библиотека *OpenMP* [13] и среда программирования *Intel Parallel Studio 2017*, обеспечивающая отладку и анализ эффективности работы параллельных приложений.

Технология *OpenMP* обеспечивает возможность распараллеливания последовательных программ с помощью директив компилятора, переменных среды и библиотечных процедур. Это позволяет создавать многопоточные приложения для многоядерных или многопроцессорных систем с общей памятью. В простейшем случае, на первом этапе распараллеливания транслятор обеспечивает разделение итераций цикла между потоками. Этот подход реализуется с помощью функции "*omp parallel for*" из библиотеки *OpenMP*.

Результаты анализа эффективности параллельной реализации алгоритма в среде *Intel Parallel Studio* представлены на рисунке 6 (*Locks and Waits Analyze*). Приложение эффективно использует все вычислительные ре-

судсы платформы (12 физических ядер) и обеспечивает ускорение вычислений в 11.6 раза.

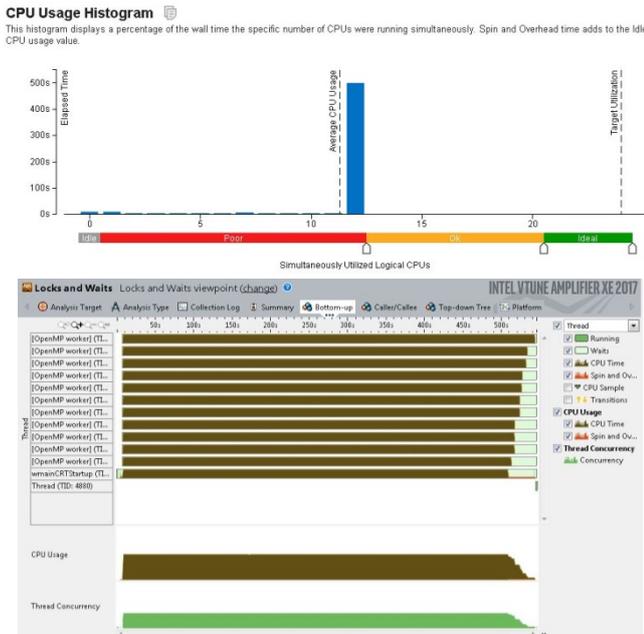


Рис. 6. Результаты Locks and Waits Analyze

Результаты вычислительных экспериментов приведены в таблицах 3-8. Решения в таблицах 3 и 4 показывают результаты проверки попадания населенных пунктов в зону покрытия сети, как по дальности, так и по углу. Для этого необходимо выполнение следующего условия:

$$(\alpha_{ant} - \alpha_{bw}/2) \leq \alpha_{bat} \leq (\alpha_{ant} + \alpha_{bw}/2).$$

Решения, выделенные цветом в таблицах ( $P_i = (X_i, Y_i, \alpha_i)$ ), представлены также в графическом виде на рисунках 7-13.

Таблица 3. Результаты для одной антенны  $A_1$

Шаг сетки (км)	Антенны				Поселения в зоне покрытия			Значение функции F
	$\alpha_{bw}$	X	Y	$\alpha_{ant}$	X	Y	$\alpha_{bat}$	
3	22.75	10.5	140	140	25	14	147.26	60000
					29	16	131.34	
2	14.88	10.85	210	210	14	13	202.14	65000
					12	16	209.17	
					10	19	210.88	
1	14.58	10.5	200	200	14	13	193.13	75000
					12	16	205.15	
					10	19	208.33	
					12	20	195.21	

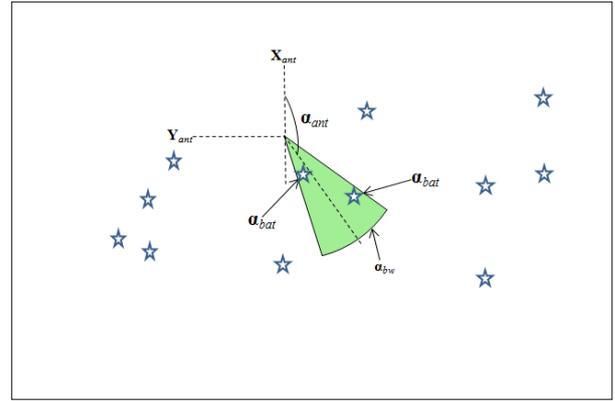


Рис. 7. Топология для одной антенны  $A_1$

В этом решении только два города находятся в зоне покрытия и значением критериальной функции равно 60000 (рис. 7).

Для всех расчетов была использована рабочая станция, имеющая два 6-ти ядерных процессора E5-2630 v2 (2.6 GHz) и поддерживающая выполнение многопоточных приложений (до 24-х потоков в режиме гипертренинга).

Таблица 4. Результаты для одной антенны  $A_2$

Шаг сетки (км)	Антенны				Поселения в зоне покрытия			Значение функции F
	$\alpha_{bw}$	X	Y	$\alpha_{ant}$	X	Y	$\alpha_{bat}$	
3	19.25	4.9	210	210	14	13	212.949	75000
					12	16	213.151	
					10	19	213.266	
					12	20	205.647	
2	9.63	12.25	100	100	14	13	99.73	82000
					25	14	96.49	
					29	16	100.95	
1	22.75	12.83	120	120	25	14	117.41	90000
					29	16	116.87	
					40	22	117.99	

В наших экспериментах мы получили максимальное ускорение в 11.6 раза по сравнению с последовательным применением. Все потоки в параллельном приложении выполняются одновременно и каждый из них использует одно ядро. В экспериментах также был использован режим гиперпоточности, но ощутимого эффекта это не дало - для 24-х потоков ускорение составило 14 раз. Время работы последовательной (Ser) и параллельной (Par) реализаций приложения показано в таблицах 5-8.

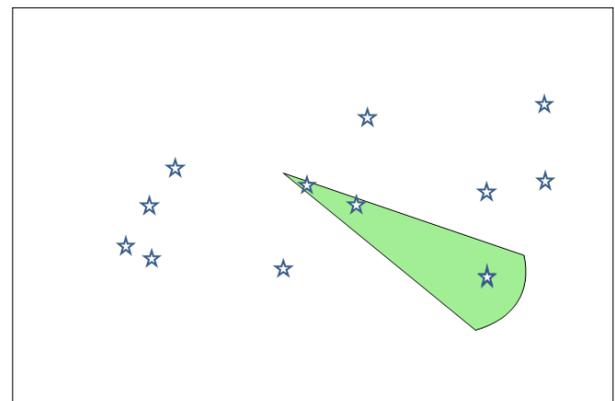


Рис. 8. Топология для одной антенны  $A_2$

Таблица 5. Результаты для двух антенн  $A_1$

Шаг сетки (км)	Антенны				Значение функции F	Время вычислений (сек)	
	N	X	Y	$\alpha_{ant}$		Ser	Par
3	1	22.75	10.5	140	113000	49.7	4.2
	2	12.25	10.5	190			
2	1	21.88	9.45	140	113000	779.8	60.4
	2	14.88	10.85	210			
1	1	21.58	10.5	130	135000	3979.5	343.65
	2	14.58	10.5	210			

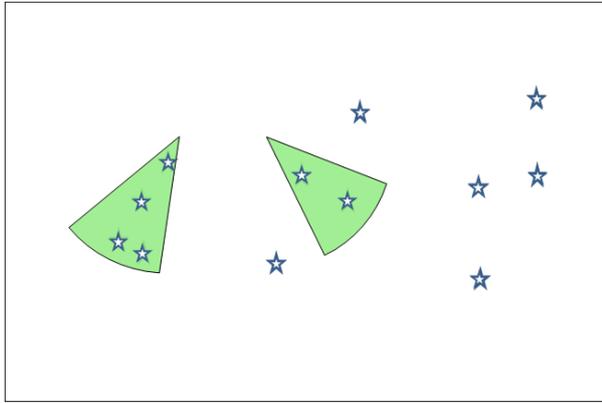


Рис. 9. Топология для двух антенн  $A_1$

В этом решении шесть городов находятся в зоне покрытия сети и значение критериальной функции равно 135000.

Таблица 6. Результаты для двух антенн  $A_2$

Шаг сетки (км)	Антенны				Значение функции F	Время вычислений (сек)	
	N	X	Y	$\alpha_{ant}$		Ser	Par
3	1	22.75	11.9	120	140000	56.3	4.6
	2	19.25	4.9	210			
2	1	23.63	12.25	120	140000	880.5	67.2
	2	20.13	3.15	210			
1	1	22.75	12.83	120	165000	4523	337.4
	2	18.08	1.17	200			

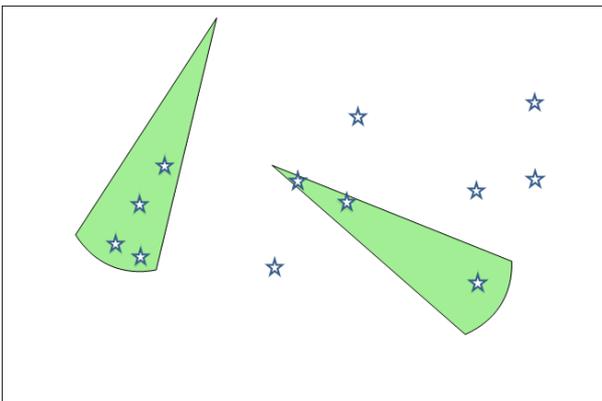


Рис. 10. Топология для двух антенн  $A_2$

В этом решении уже семь городов находятся в зоне покрытия и значение критериальной функции равно 165000.

Таблица 7. Результаты для одной антенны  $A_1$  и одной антенны  $A_2$

Шаг сетки (км)	Антенны				Значение функции F	Время вычислений (сек)	
	N	X	Y	$\alpha_{ant}$		Ser	Par
3	1	22.75	13.3	110	135000	51.7	4.4
	2	19.25	4.9	210			
2	1	21.88	9.45	140	135000	844.4	63.5
	2	20.13	3.15	210			
1	1	14.58	10.97	200	165000	4301.6	317.6
	2	22.75	12.83	120			

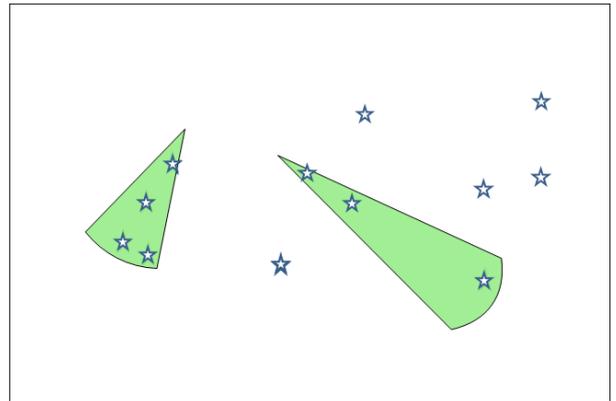


Рис. 11. Топология для одной антенны  $A_1$  и одной антенны  $A_2$

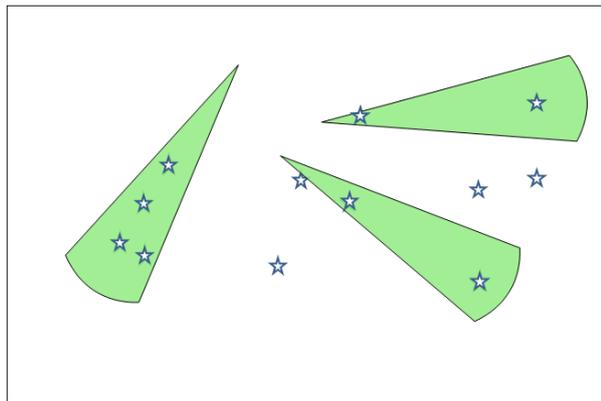
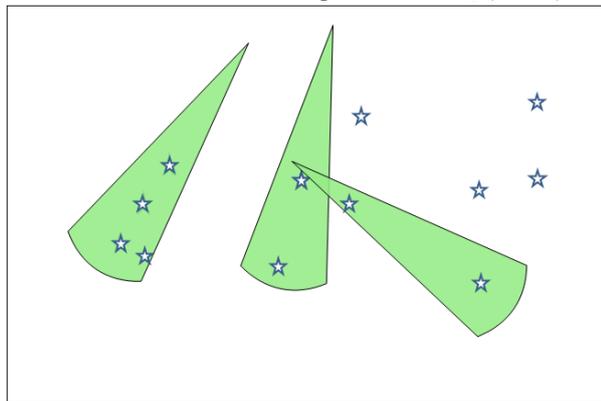
Полученный результат аналогичен предыдущему.

Лучшие решения получены при использовании трех антенн  $A_2$  (рис. 12 и 13). В первом случае восемь городов находятся в зоне действия сети, а значение функции F равно 175000.

Во втором варианте восемь городов находятся в зоне покрытия сети и значение критерия равно 190000.

Таблица 8. Результаты для трех антенн  $A_2$

Шаг сетки (км)	Антенны				Значение функции F	Время вычислений (сек)	
	N	X	Y	$\alpha_{ant}$		Ser	Par
3	1	26.25	9.1	90	175000	-	7963.3
	2	19.25	4.9	210			
	3	22.75	11.9	120			
2	1	27.13	1.75	190	190000	-	437855
	2	20.13	3.15	210			
	3	23.63	12.25	120			

Рис. 12. Топология для трех антенн  $A_2$  (шаг 3)Рис. 13. Топология для трех антенн  $A_2$  (шаг 2)

Проведенные эксперименты подтвердили, что количество шагов положительно влияет на точность решения задачи. Конечно, это значительно увеличивает время принятия решения, но параллельные расчеты позволяют использовать алгоритм перебора на практике.

Время вычислений варьировалось от 50 секунд (одна антенна, шаг = 3) до 121 часа (три антенны, шаг=2). Такая зависимость времени решения задачи от количества рассматриваемых вариантов (в нашем случае позиций антенн) характерна для алгоритма перебора.

## VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты подтвердили, что алгоритм перебора может быть использован на практике для распределения направленных антенн в процессе оптимизации топологии беспроводной сети. Конечно, эта задача имеет высокий уровень сложности, но параллельные вычисления позволяют применять алгоритм для решения практических задач. В распоряжении авторов не было более мощного вычислителя, но проведенные эксперименты показали хорошую масштабируемость приложения. Дальнейшие исследования будут направлены на реализацию алгоритма в распределенной среде, осно-

ванной на технологии GRID, позволяющей интегрировать значительные ресурсы [14].

## ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках научно-исследовательского проекта № 16-07-01055\18.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hong-Ning Dai, Kam-Wing Ng, Minglu Li, Min-You Wu, "An Overview of Using Directional Antennas in Wireless Networks," International journal of communication systems, pp. 1-39, 2011.
- [2] Salman A. Khan, Mostafa I. H. Abd-El-Barr, "A Hybrid Ant Colony Optimization Algorithm for Topology Optimization of Local Area Networks", International Conference on Computing Sciences and Engineering (ICCSE), Kuwait City, Kuwait, March 11-13, 2018.
- [3] Wenqiang Guo, Yubo Deng, Yi Yang, Heshun Ouyang, Lian Li, "A Novel Outdoor Localization with Cellular Topology in Opportunistic Networks", International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence (ACAI 2012), Xiamen, China, March 2-5, 2012, pp. 239-242.
- [4] Jihyeon Choi, Joonsung Lee, Hanseok Kim, "Direction-Based Topology Control Algorithm for Mobile Ad-Hop Networks", International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), Gold Coast, QLD, Australia, October 2-5, 2012, pp. 337-341.
- [5] Taiki Honda, Makoto Ikeda, Leonard Barolli, "Performance Analysis of User Connectivity by Optimizing Placement of Wireless Access Points", 16th International Conference on Network-Based Information Systems, Gwangju, South Korea, September 4-6, 2013, pp. 488-493.
- [6] Soumaya Ziari, Philippe Canalda, Hakim Mabed, Francois Spies, "WiFi Access Point Placement within Stand-alone, Hybrid and Combined Wireless Positioning Systems", Fourth International Conference on Communications and Electronics (ICCE), Hue, Vietnam, August 1-3, 2012, pp. 279-284.
- [7] Лупин С.А., Ай Мин Тайк, Ю.Ф. Варанов. Применение алгоритма перебора для оптимизации топологии беспроводных сетей. International Journal of Open Information Technologies. №9, 2016, с. 80-86.
- [8] Thomas Heffner, Philip Huang, David Xia, "Network Discovery with Directional Antennas." 2006 IEEE Annual Wireless and Microwave Technology Conference, Clearwater Beach, Florida, December 4-5, 2006, pp. 281-293.
- [9] WiFi Antenna Installation. Best Practices. [Online]. Available: <http://www.lcom.com/content/WiFi%20Antenna%20Installation%20Best%20Practices.pdf>
- [10] Point to point network. [Online]. Available: <http://www.emperorwifi.com/2017/07/>
- [11] Point to multi-point network. [Online]. Available: <http://new-era.ly/index.php/services/buldings>
- [12] Aye Min Thike, Sergey Lupin, Ba Hla Than, Yuriy Vagapov, "The Computational Aspects of Estimating the Efficiency of Wireless Networks' Topology", 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2017 ElConRus), Moscow and St. Petersburg, Russia, February 1 - 3, 2017, pp. 582 - 586.
- [13] OpenMP. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/OpenMP>
- [14] О.С. Заикин, М.А. Посыпкин, А.А. Семёнов, Н.П. Храпов. Опыт организации добровольных вычислений на примере проектов OPTIMA@home и SAT@home // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2012, 5(2), С. 340-347.

# Wireless Networks Topology Optimization – Decision for Directional Antennas

Aye Min Thike, S. Lupin, D. Fedyashin

**Abstract**— Wireless networks have become an important part of the communication infrastructure, which providing mobile customers with access to a variety of services. The process of developing the wireless network topology is associated with the solution of multi-criteria optimization problems. This is a computationally complex procedure, especially for directional antennas, because three parameters must be defined for each network node: antenna' coordinates and radiation angle. Directional antennas in network nodes provide a longer signal transmission range than Omni-directional antennas and reduce interference. The paper estimates the possibility of using a parallel implementation of the brute force algorithm for building an optimal topology of a wireless network with directional antennas at its nodes. The criterion of the optimal solution is the number of residents, which entering the coverage area and having access to network services. The presenting results of computational experiments illustrate the scalability and performance of the parallel implementation of the brute force algorithm. The evaluation of parallel application efficiency by means of Locks and Waits analysis is produced in Intel Parallel Studio environment. As a computing platform, we used in experiments a workstation with two 6-core processors E5-2630 v2 (2.6 GHz), supporting the execution of multi-threaded applications.

**Keywords**— optimization; parallel implementation of the brute force algorithm; wireless networks' topology.