

# ОПТИМИЗАЦИЯ ЗОНЫ ПОКРЫТИЯ LTE-СЕТЕЙ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

И.А. Зикратов<sup>1\*</sup>, Т.В. Зикратова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

<sup>2</sup>Военный институт (военно-морской политехнический) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», Санкт-Петербург, 196604, Российская Федерация

\*Адрес для переписки: zikratov.ia@spbgut.ru

## Информация о статье

УДК 681.518

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Зикратов И.А., Зикратова Т.В. Оптимизация зоны покрытия LTE-сетей методом динамического программирования // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 1. С. 48–55. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-1-48-55

**Аннотация:** Предложен способ планирования радиосетей оператором сотовой связи. Актуальность задачи обусловлена стремлением поставщиков услуг минимизировать издержки на расстановку и содержание необходимого количества базовых станций при обеспечении требуемого качества пакета услуг. Задача решается в несколько этапов путем оптимального выбора расположения базовых станций на основе метода динамического программирования. В рамках предлагаемого метода совокупность позиций, на которых могут устанавливаться базовые станции, зон покрытия и мест концентрации абонентов, представляется в виде системы с дискретными временем и состояниями. Целевая функция и система ограничений составлены таким образом, чтобы гарантировать, что абоненты находятся в зоне покрытия, и минимизировать участки пересечения зон покрытия соседних базовых станций. Результаты могут быть полезны поставщикам услуг сотовой связи для разработки алгоритмов планирования зоны покрытия сетей в геоинформационных системах.

**Ключевые слова:** дальность радиосвязи, зоны покрытия, оптимизация планирования, выбор позиции, LTE-сеть.

## Введение

Известно, что к числу факторов, определяющих уровень отношения сигнал-шум (SNR, от англ. Signal-to-Noise Ratio) на входе приемного устройства, от которого во многом зависит качество услуг беспроводной связи, предоставляемых оператором беспроводной сети, относится удаление абонента от базовой станции. Это определяет необходимость установки достаточного количества базовых станций в пределах площади обслуживаемой территории. С одной стороны, поставщики услуг связи вынуждены делать это, так как заинтересованы в достижении требуемых показателей качества сервисов. С другой стороны, ключевым вопросом для сотовых операторов является снижение затрат на закупку, размещение и содержание избыточного количества базовых станций.

В данной статье авторы предлагают рассмотреть процедуру оптимизации размещения базовых станций на местности как процесс выбора из всего

множества координатных точек именно тех, при размещении базовых станций в которых будут достигнуты заданные показатели радиосети в зависимости от принятой оператором модели предоставления услуг. Данная процедура является одним из этапов общей задачи частотно-территориального планирования сети.

Методы оптимального расположения на местности базовых станций GSM-сетей (2G, TDMA), UMTS (3G, CDMA) и LTE (4G) обсуждаются в ряде работ, например, в [1–8]. При этом могут быть использованы методы линейного целочисленного программирования [9–12], стохастического программирования [13], мета-эвристические [14], игровые [15], генетические [16] и другие алгоритмы оптимизации.

Как известно, для априорного определения дальности радиосвязи используют методы расчета напряженности электромагнитного поля в точке наблюдения и соответствующие модели земной

поверхности<sup>1234</sup> с учетом рельефа и радиофизических свойств местности, технических характеристик средств связи и других факторов, влияющих на SNR. Автоматизация расчета радиолиний с учетом влияния подстилающей поверхности осуществляется, как правило, с использованием цифровой картографической информации (ЦКИ) о земной поверхности. В составе ЦКИ содержится метрическая информация о координатах точек (линий), описывающих рельеф местности и объекты на ней (представлена с определенной погрешностью) и семантическая информация (данные о характере местности и наличии на ней точечных, линейных и площадных объектов, таких как «река», «береговая линия», «дорога», «заболоченный участок леса», «кустарник», «одинокое строение» и т. д., в принятых форматах данных).

Очевидно, что значительная часть факторов, влияющих на качество радиосвязи, носит стохастический характер, и их статистические закономерности не всегда могут быть определены и учтены. В этих условиях повышение качества планирования может достигаться двумя путями.

Первый путь направлен на совершенствование моделей, описывающих геометрические и диэлектрические свойства неровностей Земли, методик расчета дальности радиосвязи с учетом влияния характеристик антенно-фидерной системы, приемопередающего тракта, а также процессов дифракции радиоволн, использование цифровых карт высокой точности, исследование статистических особенностей моделируемых явлений и процессов [17–19].

Второй путь, которого придерживаются авторы в настоящей работе, состоит в том, что задачу оптимизации изначально предлагается рассматривать как задачу, относящуюся к классу задач с риском и неопределенностью. В качестве метода решения такой задачи предложено использовать метод динамического программирования [20].

Идея состоит в следующем. Задача частотно-территориального планирования сети представляет собой процесс, протяженный в пространстве и времени. В работе [21] показано, что общую задачу синтеза сети целесообразно декомпозировать

на ряд частных задач, разнообразных по своему содержанию и методам решения.

По результатам их решения осуществляется предварительный выбор на обслуживаемой территории конечного множества точек, на которых потенциально возможно размещение базовых станций. Для рационального выбора позиций из этого конечного множества позиций в работе предлагается использовать метод динамического программирования. Для этого по результатам моделирования рассчитывается оптимальный состав базовых станций в зависимости от выделяемых средств на каждом шаге алгоритма.

### Постановка задачи

Рассмотрим некий участок территории площадью  $P$ , в пределах которого могут находиться площадные объекты (населенные пункты) или линейные (дороги). Необходимо с минимальными издержками расставить базовые станции в пределах площади обслуживаемой территории, чтобы абоненты, находящиеся в населенных пунктах или передвигающиеся по дорогам, были обеспечены мобильной связью. В зависимости от вида сотовой связи, пакет предоставляемых услуг может быть различным. Для GSM сетей он включает в себя голосовую связь, и технологию непрерывной передачи данных GPRS. К основным услугам современных LTE-сетей можно отнести передачу речи через IP (VoIP), телевидение по протоколу IP (IPTV) и интернет (загрузка веб-страниц, файлов и других приложений).

Среди особенностей построения LTE (*от англ. Long-Term Evolution*) отметим следующие. Высокие скорости передачи данных в сетях LTE достигаются путем применения модуляций высокого порядка. Для того, чтобы сообщение было успешно декодировано, в LTE предусмотрена система коррекции ошибок методом упреждения (FEC, *от англ. Forward Error Correction*), которая заключается в том, что информационным битам добавляются контрольные биты, по которым, в случае потери бит информации, можно будет восстановить начальное сообщение. Чем ниже SNR, тем больше контрольных бит будет добавлено в начальное сообщение. Естественно, контрольные неинформационные биты снижают полезную скорость передачи данных. В LTE применяются следующие коэффициенты кодирования: 1/8, 1/5, 1/4, 1/3, 1/2, 2/3, 3/4 и 4/5 – эти соотношения показывают количество контрольных бит в сообщении. Чем выше порядок модуляции и чем меньше добавлено контрольных бит, тем выше требуемое SNR в приемнике, следовательно, тем ближе приемник должен находиться к базовой станции.

В соответствии с моделью доступа, принятой у оператора, могут быть установлены параметры пропускной способности для каждой услуги, а также условия ее предоставления. Для примера рас-

<sup>1</sup> Рекомендация МСЭ-R P.526-9. Распространение радиоволн за счет дифракции. (Вопрос МСЭ -R 202/3). 2005. 37 с. (<http://www.itu.int/rec/R-REC-P.526-9-200508-1/en>)

<sup>2</sup> Рекомендация МСЭ-R P.834-5. Влияние тропосферной рефракции на распространение радиоволн. (Вопрос МСЭ -R 201/3). 2005. 14 с. (<http://www.itu.int/rec/R-REC-P.834-5-200503-1/en>)

<sup>3</sup> Recommendation ITU-R P.453-9. The radio refractive index: its formula and refractivity data. (Question ITU-R 201/3). 2003. 27 p. (<http://www.itu.int/rec/R-REC-P.453-9-200304-1/en>)

<sup>4</sup> Рекомендация МСЭ-R P.452-12. Процедура прогнозирования для оценки микроволновых помех между станциями, находящимися на поверхности Земли, на частотах выше приблизительно 0,7 ГГц. (Вопрос МСЭ -R 208/3). 2005. 56 с. (<http://www.itu.int/rec/R-REC-P.452-12-200503-1/en>)

смотрим трехуровневую модель, которая в зависимости от плотности потенциальных абонентов может иметь следующие варианты предоставления услуг, влияющие на количество базовых станций, размещаемых на обслуживаемой территории.

**Вариант 1.** Плотность абонентов и их требования к пропускной способности сети малы. Количество базовых станций определяется исходя из полного покрытия заданной территории при максимально возможном радиусе обслуживания.

**Вариант 2.** Плотность абонентов и их требования к пропускной способности сети достаточно высоки. Количество базовых станций задается их пропускной способностью. Базовые станции размещаются ближе друг к другу, чем в первом случае, они работают на максимальной пропускной способности при небольшом радиусе действия. Малый радиус действия обусловлен необходимостью обеспечения высокого уровня SNR, а, следовательно, малым количеством контрольных бит в сообщении.

**Вариант 3.** Плотность абонентов и их требования к пропускной способности очень высоки. При высокой плотности абонентов и требованиях к пропускной способности базовые станции размещают максимально близко друг к другу. Ограничением служит необходимость обеспечения электромагнитной совместимости соседних станций.

Приведенные рассуждения могут служить основой для оптимизации размещения базовых станций на участке местности.

Пусть в пределах обслуживаемой территории площадью  $P$  в результате выполнения предварительных этапов частотно-территориального планирования [21] найдено конечное множество  $M$  позиций, априорно пригодных (с учетом транспортной доступности, требований по электромагнитной совместимости, близости к линиям электропередач и т. д.) для размещения базовых станций, зоны покрытия которых рассчитаны с использованием ЦКИ. Разобьем всю территорию на  $N$  элементарных участков контроля (ТР, от англ. Test Points), в которых будем контролировать качество предоставляемых услуг. Размеры участков выберем такими, чтобы в одном ТР находилось не более одной базовой станции (BS, от англ. Base Station).

В качестве ограничения, будем полагать, что в пределах одного участка уровень SNR, обеспечиваемый ближайшими базовыми станциями, остается неизменным, и имеет одну из трех градаций: низкий (*low*), средний (*medium*) и высокий (*high*). Будем полагать также, что в пределах обслуживаемого участка местности  $P$  оператором связи реализуется одна из моделей доступа (варианты 1, 2, 3) в зависимости от уровня SNR.

Пусть поставщик услуг имеет некую сумму  $S$ , которую он готов потратить на размещение на заданном участке местности BS. При этом стои-

мость  $r_i$  установки базовой станции на  $i$ -ом ТР зависит от типа оборудования, доступности и пригодности в инженерном отношении участка местности, его удаленности от линии электроснабжения и т. д. Очевидно, что количество ТР ( $n_i$ ), на которых будут выполняться требования по реализации принятой модели доступа, зависит от рельефа Земной поверхности и других условий, влияющих на SNR в случае размещения базовой станции на выбранном участке местности ТР (см. рисунок 1).

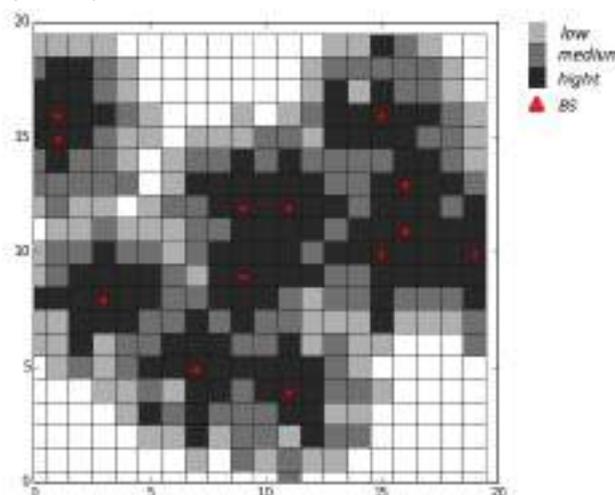


Рис. 1. Участок местности, разделенный на элементарные участки контроля (ТР) с возможными местами установки базовых станций (BS)

Тогда необходимо выбрать те  $m$  позиций из имеющегося множества  $M$  ( $m \subset M$ ), при размещении базовых станций, на которых будет обеспечена максимальная зона покрытия с SNR, удовлетворяющая выбранной модели доступа. При этом затраты  $s$  на размещение базовых станций на выбранных позициях не могут превышать выделенной суммы  $S$  ( $s \leq S$ ). То есть решением задачи будет вектор вида  $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_M\}$ , где  $x_i$  принимает значение 1, если принято решение, что на  $i$ -ой позиции целесообразна установка базовой станции;  $x_i = 0$ , если установка базовой станции на данной позиции нецелесообразна:

$$\sum_{i=0}^m n_i \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$s = r_1 x_1 + \dots + r_i x_i + \dots + r_m x_m \leq S. \quad (2)$$

В зависимости от вида целевой функции (1) и ограничений (2) различают разделы математического программирования: квадратичное, выпуклое, динамическое, целочисленное программирование и т. д. Как показано в работах [1, 12, 13, 16–18], перечисленные методы можно использовать для решения оптимизации зоны покрытия. Особенностью метода динамического программирования (ДП) является то, что он позволяет найти оптимальное решение за несколько этапов, с учетом выделяемых на каждом из них денежных средств.

### Способ расстановки базовых станций на основе метода динамического программирования

Для описания общей задачи оптимизации при помощи ДП необходимо, чтобы она удовлетворяла следующим условиям:

- 1) задача должна интерпретироваться как  $n$ -шаговый процесс;
- 2) целевая функция должна быть аддитивной, т. е. представляться в виде суммы показателей эффективности на каждом шаге;
- 3) структура задачи должна быть определена для любого  $n$  и не зависеть от этого числа (принцип вложенности);
- 4) на каждом шаге система определяется конечным числом параметров состояния и управляется конечным числом переменных управления.

Известно, что управление системой в задаче ДП представляет совокупность решений  $L_k$ , принимаемых на каждом шаге  $k$  и переводящих систему из состояния  $q_{k-1}$  в текущее состояние  $q_k$ . Качество управления количественно оценивается с помощью функций  $f_k(L_k, q_{k-1})$ , являющихся слагаемыми аддитивной целевой функции, характеризующей общую эффективность управления. Оптимальное управление сводится к выбору такого оптимального воздействия  $L$ , при котором достигается максимум суммы значений  $f_k$  (где  $k = 1, 2, \dots, n - 1$ ), на соответствующей траектории в предположении об оптимальности последующих шагов. В данной задаче под управлением понимается выбор одной или нескольких позиций из множества  $M$  ( $m \subset M$ ) с учетом выделяемой на данном шаге суммы  $s$  ( $s \leq S$ ).

Обозначим  $Z_k(q_k)$  максимальное значение функций  $f_k$  на  $k$ -ом шаге, при условии, что объект в начале шага  $k$  находится в состоянии  $q_{k-1}$ . Тогда функция  $Z_k(q_k)$  должна удовлетворять рекуррентному соотношению Беллмана:

$$Z_k(q_k) = \max\{f_k(L_k, q_{k-1}) + Z_{k-1}(q_{k-1})\}. \quad (3)$$

Покажем, как задачу оптимизации системы сотовой связи можно решить методом ДП. Удобнее это сделать, иллюстрируя действия на элементарном примере (рисунок 2). Под системой будем понимать совокупность позиций, на которых устанавливаются базовые станции зон покрытия и мест концентрации абонентов.

Рассмотрим участок местности, на котором расположены две автомагистрали – road 1 и road 2. Пусть в результате расчетов с использованием картографической информации ЦКИ выбрано шесть участков контроля, которые возможно использовать в качестве позиций для установки базовых станций. Обозначим их А, В, С, D, E и F. Предположим, что расчет зон покрытия, создаваемых базовыми станциями, расположенными на этих позициях, показал, что общая зона покрытия соответствует показанной на рисунке, при этом имеются участки перекрытия зон соседних базовых станций

– АВ, ВС, CD, DT, CDF и FC. На рисунке также обозначены 39 участков контроля, через которые проложены автомагистрали road 1 и road 2.

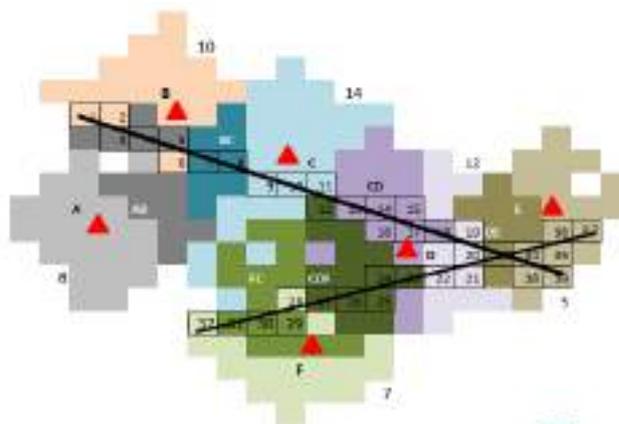


Рис. 2. Возможные позиции базовых станций и их зоны покрытия

### Подготовка исходных данных

Допустим, что в связи с различной доступностью, пригодностью в инженерном отношении и удаленностью ТР от линий электропередач, стоимость развертывания базовых станций на позициях А, В, С, D, E и F будет отличаться и составлять: А – 8 у.е., В – 10 у.е., С – 14 у.е., D – 12 у.е., E – 5 у.е. и F – 7 у.е.

Предположим, что планируется поэтапное увеличение финансирования для наращивания зоны покрытия сети сотовой связи на рассматриваемом участке местности, при этом максимальная сумма, которая запланирована для этой задачи составляет 30 у.е. Для простоты будем полагать, что первоначальная инвестиция составляет 15 у.е., а на каждом последующем этапе выделяемая сумма одинаковая, и составляет 5 у.е.

Составим таблицу, в которую сведем следующие данные: вариант управляющего воздействия  $L_1$  на первом шаге  $q_1$ , стоимость этого варианта  $s$ , и его количества участков контроля  $Z_1(q_1)$  пересекаемых автомагистралями (см. рисунок 2), на которых (при выборе данного варианта) обеспечивается уровень SNR в соответствии с моделью доступа (таблица 1). Так, при установке базовой станции на позиции E связь обеспечивается в участках контроля 34–39, на позиции F – на участках 23–32, на позиции А – на участках 3, 4 и 5.

В таблице 2 представлены данные для второго шага при  $15 < s \leq 20$ . Следует отметить, что при расчете величины  $Z_3(q_3)$  на этом этапе и далее, те участки контроля ТР, которые попадают в зоны покрытия соседних базовых станций, следует учитывать один раз. Например, при выборе варианта АВ участки контроля 3, 4 и 5 находятся в зоне покрытия базовых станций А и В, общее количество участков контроля в зоне покрытия базовых станций равно 8.

ТАБЛИЦА 1

$L_1$						$s \leq 15$	$Z_1(q_1)$
A	B	C	D	E	F		
				x		5	7
					x	7	10
x						8	3
	x					10	8
			x			12	16
				x	x	12	17
x				x		13	10
		x				14	20
x					x	15	13
	x			x		15	15

ТАБЛИЦА 2

$L_2$						$15 < s \leq 20$	$Z_2(q_2)$
A	B	C	D	E	F		
			x	x		17	22
	x				x	17	18
x	x					18	8
			x		x	19	20
		x		x		19	27
x			x			20	19
x				x	x	20	20

По аналогии в таблицах 3 и 4 представим оставшиеся варианты.

ТАБЛИЦА 3

$L_3$						$20 < s \leq 25$	$Z_3(q_3)$
A	B	C	D	E	F		
		x			x	21	21
	x		x			22	24
x		x				22	23
	x			x	x	22	25
x	x			x		23	15
			x	x	x	24	26
	x	x				24	26
x			x	x		25	25

ТАБЛИЦА 4

$L_4$						$25 < s \leq 30$	$Z_4(q_4)$
A	B	C	D	E	F		
		x	x			26	24
		x		x	x	26	28
x			x		x	27	23
	x		x	x		27	30
x		x		x		27	30
	x		x		x	29	29
	x	x		x		29	33
x		x			x	29	24

**Процедура оптимального планирования**

Основываясь на полученных исходных данных, планирование размещения базовых станций будем осуществлять методом прямой прогонки.

Из таблицы 4 следует, что решением задачи на последнем шаге  $q_4$  будет вектор вида:

$$X = \{0, 1, 1, 0, 1, 0\}.$$

То есть при установке базовых станций на позициях E, B и C функция  $Z_4(q_4)$  достигает максимального значения  $Z_4(q_4) = 33$  при затратах  $s = 29$ . Следовательно, задача оптимизации сводится к выбору рационального расходования средств на каждом этапе для установки базовых станций на позициях E, B и C.

Как следует из анализа таблиц 1–4, достижение конечного состояния (ЕВС) на шаге  $q_4$  возможно путем выбора на предыдущих шагах  $q_1$ – $q_3$  одного из возможных состояний, что можно представить в виде графа переходов (рисунок 3).

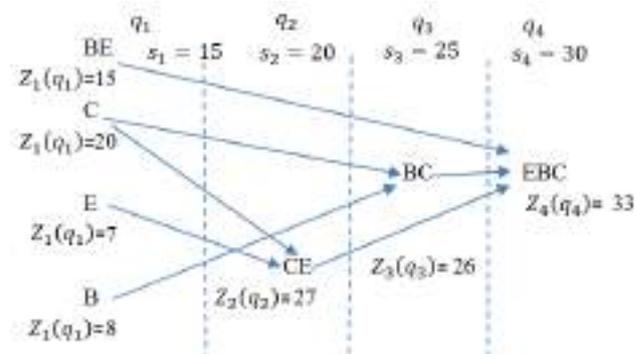


Рис. 3. Граф перехода состояний системы базовых станций в задаче ДП

На рисунке показаны шаги  $q_1, q_2, q_3$  и  $q_4$  и соответствующие им затраты  $s_1$ – $s_4$ . Из графа следует, что на первом шаге при начальном финансировании в размере до 15 у.е., согласно соотношению (3), получим максимальное значение функции  $Z_1(q_1)$ :

$$(\text{opt } q_1) = \max \begin{Bmatrix} BE \\ C \\ E \\ B \end{Bmatrix} = \max \begin{Bmatrix} 15 \\ 20 \\ 7 \\ 8 \end{Bmatrix} = 20.$$

То есть результатом первого шага станет установка базовой станции на позиции C. На последующих шагах возможны следующие варианты: либо на шаге  $q_2$  в дополнение к базовой станции C осуществляется установка базовой станции на позиции E:  $(\text{opt } q_2) = \max\{CE\} = \max\{27\} = 27$ , либо на шаге  $q_2$  осуществляется установка базовой станции на позиции B:  $(\text{opt } q_3) = \max\{BC\} = \max\{26\} = 26$ .

Согласно (3) получаем, что оптимальным решением будет следующее выражение:

$$(\text{opt } x) = \max \begin{Bmatrix} CE \\ BC \end{Bmatrix} = \max \begin{Bmatrix} 27 \\ 26 \end{Bmatrix} = 27 = \text{opt } q_2.$$

Очевидно, что на последнем шаге для достижения конечного состояния (ЕВС) необходимо установить базовую станцию на позиции В.

Таким образом, для рассматриваемого примера методикой решения задачи оптимизации будет следующий порядок действий:

- на первом этапе необходимо установить базовую станцию на позиции С;
- на втором этапе дополнительно устанавливается базовая станция на позиции Е;
- на третьем этапе никаких действий не выполняется, ибо выделяемых на данном этапе средств не хватит на установку базовой станции на позиции В;
- на четвертом этапе, при появлении необходимой суммы, осуществляется установка базовой станции на позиции В.

Такое решение позволяет рационально расходовать выделяемые ресурсы для максимально возможного охвата участков контроля зоной покрытия с заданными показателями качества связи предоставляемых услуг.

## Заключение

Предложенный способ выбора позиций БС на основе ДП обладает следующими достоинствами:

- во-первых, относительная простота реализации в геоинформационных системах, так как он не предъявляет высоких требований к погрешности представления метрической и семантической информации в цифровых картах местности, сложности моделей препятствий и методов расчета дальности радиосвязи;
- во-вторых, протяженность процесса планирования во времени позволяет находить оптимальное решение на каждом этапе развертывания сети сотовой связи по мере финансирования проекта.

Хотя в статье была рассмотрена и решена задача обеспечения зоны покрытия LTE-сетей для участка местности, на котором имеются линейные объекты (дороги), очевидно, что методика ее решения без каких-либо изменений применима также для случая площадных объектов, например, населенных пунктов, а также для сетей других стандартов, например, GSM.

## Список используемых источников

1. Зикратов И.А. Расчет параметров радиолиний в условиях холмистой местности // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2005. Т. 48. № 1. С. 3–9.
2. Amaldi E., Capone A., Malucelli F., Signori F. UMTS radio planning: optimizing base station configuration // Proceedings of the 56th Vehicular Technology Conference (Vancouver, Canada, 24–28 September 2002). Piscataway, NJ: IEEE, 2002. Vol. 2. PP. 768–772. DOI:10.1109/VETECE.2002.1040703
3. Abdel Khalek A., Al-Kanj L., Dawy Z., Turkiyyah G. Optimization Models and Algorithms for Joint Uplink/Downlink UMTS Radio Network Planning with SIR-Based Power Control // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2011. Vol. 60. Iss. 4. PP. 1612–1625. DOI:10.1109/TVT.2011.2132745
4. Eisenblatter A., Wessaly R., Martin A., Fugenschuh A., Wegel O., Koch T., Achterberg T., Koster A. Modelling Feasible Network Configurations for UMTS // Telecommunications Network Design and Management. Operations Research/Computer Science Interfaces Series. Boston: Springer, 2003. PP. 1–23. DOI:10.1007/978-1-4757-3762-2\_1
5. Amaldi E., Capone A., Malucelli F., Signori F. Optimization models and algorithms for downlink UMTS radio planning // Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference (WCNC, New Orleans, USA, 6–20 March 2003). Piscataway, NJ: IEEE, 2003. Vol. 2. p.827–831. DOI:10.1109/WCNC.2003.1200478
6. Berruto E., Gudmundson M., Menolascino R., Mohr W., Pizarro M. Research activities on UMTS radio interface, network architectures, and planning // IEEE Communications Magazine. 1998. Vol. 36. Iss. 2. PP. 82–95. DOI:10.1109/35.648769
7. Amaldi E., Capone A., Malucelli F. Radio planning and coverage optimization of 3G cellular networks // Wireless Networks. 2008. Vol. 14. Iss. 4. PP. 435–447. DOI:10.1007/s11276-006-0729-3
8. Siomina I., Yuan D. Analysis of Cell Load Coupling for LTE Network Planning and Optimization // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2012. Vol. 11. Iss. 6. PP. 2287–2297. DOI:10.1109/TWC.2012.051512.111532
9. Mathar R., Niessen T. Optimum positioning of base stations for cellular radio networks // Wireless Networks. 2000. Vol. 6. Iss. 6. PP. 421–428. DOI:10.1023/A:1019263308849
10. Mathar R., Schmeink M. Optimal Base Station Positioning and Channel Assignment for 3G Mobile Networks by Integer Programming // Annals of Operations Research. 2001. Vol. 107. Iss. 1–4. PP. 225–236. DOI:10.1023/A:101495931
11. Mathar R., Schmeink M. Integrated Optimal Cell Site Selection and Frequency Allocation for Cellular Radio Networks // Telecommunication Systems. 2002. Vol. 21. Iss. 2–4. PP. 339–347. DOI:10.1023/A:1020958901292
12. Зикратов И.А., Зикратова Т.В. К вопросу об оптимизации зоны покрытия систем сотовой связи на загородных участках местности // Информационно-управляющие системы. 2007. № 3(28). С. 52–55.
13. Зикратов И.А., Шаго Ф.Н., Гуртов А.В., Иванинская И.И. Оптимизация зоны покрытия сети сотовой связи на основе математического программирования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 2. С. 313–321. DOI:10.17586/2226-1494-2015-15-2-313-321
14. Gerdenitsch A., Jakl S., Toeltsch M., Neubauer T. Intelligent algorithms for system capacity optimization of UMTS FDD networks // Proceedings of the 4th International Conference on 3G Mobile Communication Technology (London, UK, 25–27 June 2003). PP. 222–226. DOI:10.1049/cp:20030368. IET Digital Library. URL: [https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp\\_20030368](https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp_20030368) (дата обращения 25.02.2019)
15. Liyanage M., Chirkova J., Gurtov A. Access Point selection game for mobile wireless users // Proceedings of the International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (Sydney, Australia, 19–19 June 2014). Piscataway, NJ: IEEE, 2014. DOI:10.1109/WoWMoM.2014.6918913

16. Ермолаев С.Ю. Применение генетических алгоритмов для решения задачи оптимального размещения базовых станций // Доклады 10-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA, Москва, Российская Федерация, 26–28 марта 2008). Москва: ИПУ РАН, 2008. С. 312–314.

17. Зикратов И.А., Степаненко К.В. Обоснование масштаба цифровых карт местности используемых при расчете напряженности поля радиосигналов // Информационно-управляющие системы. 2005. № 1(14). С. 10–15.

18. Зикратов И.А., Степаненко К.В. Обоснование требований к точности цифровой картографической информации в геоинформационных системах проектирования и анализа радиолиний // Информационно-управляющие системы. 2004. № 2(9). С. 21–25.

19. Зикратов И.А., Самотонин Д.Н. Геоинформационный анализ радиолокационных отражений. СПб: Политехника, 2004. 143 с.

20. Taha H.A. Operations research: an introduction. New York: Macmillan publishing, 1982. 491 p.

21. Бабков В.Ю., Вознюк М.А., Михайлов П.А. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. М: Горячая линия–Телеком, 2013. 220 с.

\* \* \*

## OPTIMIZATION OF THE COVERAGE ZONE OF CELLULAR COMMUNICATION BY MATHEMATICAL PROGRAMMING

I. Zikratov<sup>1</sup>, T. Zikratova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

<sup>2</sup>Military Institute (Naval Polytechnic) of the Military Training and Research Center of the Navy of the N.G. Kuznetsov Naval Academy,  
St. Petersburg, 196604, Russian Federation

### Article info

Article in Russian

**For citation:** Zikratov I., Zikratova T. Optimization of the Coverage Zone of Cellular Communication by Mathematical Programming. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(1):48–55. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-1-48-55>

**Abstract:** *A method for planning a radio network by a cellular operator has been proposed. The urgency of the task is due to the desire of service providers to minimize the costs of the distribution and maintenance of the required number of base stations while ensuring the required signal / noise level within the coverage area. The problem is solved by a rational choice of the location of the repeater base points in several stages. First of all, an analysis of a site is carried out and a preliminary selection is made on it of a set of points where base stations can potentially be located. As a rule, this problem is solved using specialized geographic information systems. At the second stage, the calculation of the radio range is carried out, provided the location of the repeaters at the selected points. At the third stage, on the basis of preliminary calculations, the selection of the positions of the base stations is carried out directly. It is proposed to use a stochastic approach for a rational choice of positions. The expediency of this approach is due to the large number of random uncontrolled factors affecting the signal-to-noise ratio at the receiving point. In this case, the problem of optimal choice of position is considered as an extremal problem, in which the parameters of the conditions are random variables. The implementation of the method proposed by the authors in the paper is illustrated by the example of radio communication planning on a country-type site, which is intersected by two highways. As input parameters in the example, the length of the sections of roads crossing the coverage areas of the repeaters and the concentration of subscribers on the routes is used. The objective function and the system of restrictions are compiled in such a way as to ensure that subscribers are located within the coverage area and to minimize the areas of intersection of the coverage areas of the neighboring repeaters. The use of this technique will allow us to obtain a statistically optimal arrangement of base stations on a given piece of terrain, which is confirmed by simulation modeling.*

**Keywords:** *radio communication range, coverage areas, planning optimization, position selection, cellular communication.*

## References

1. Zikratov I.A. Calculation of Radio Links Parameters in Conditions of Hilly Terrain. *Journal of Instrument Engineering*. 2005;48(1):3–9. (in Russ.)
2. Amaldi E., Capone A., Malucelli F., Signori F. UMTS radio planning: optimizing base station configuration. *Proceedings of the 56th Vehicular Technology Conference, 24–28 September 2002, Vancouver, Canada*. Piscataway, NJ: IEEE, 2002. Vol. 2. p.768–772. Available from: <https://doi.org/10.1109/VETEFC.2002.1040703>
3. Abdel Khalek A., Al-Kanj L., Dawy Z., Turkiyyah G. Optimization Models and Algorithms for Joint Uplink/Downlink UMTS Radio Network Planning with SIR-Based Power Control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2011;60(4):1612–1625. Available from: <https://doi.org/10.1109/TVT.2011.2132745>
4. Eisenblatter A., Wessaly R., Martin A., Fugenschuh A., Wegel O., Koch T., Achterberg T., Koster A. Modelling Feasible Network Configurations for UMTS. In: *Telecommunications Network Design and Management. Operations Research/Computer Science Interfaces Series*. Boston: Springer; 2003. p.1–23. Available from: [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3762-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3762-2_1)
5. Amaldi E., Capone A., Malucelli F., Signori F. Optimization models and algorithms for downlink UMTS radio planning. *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference, WCNC, 16–20 March 2003, New Orleans, USA*. Piscataway, NJ: IEEE, 2003. Vol. 2. p.827–831. Available from: <https://doi.org/10.1109/WCNC.2003.1200478>
6. Berruto E., Gudmundson M., Menolascino R., Mohr W., Pizarroso M. Research activities on UMTS radio interface, network architectures, and planning. *IEEE Communications Magazine*. 1998;36(2):82–95. Available from: <https://doi.org/10.1109/35.648769>
7. Amaldi E., Capone A., Malucelli F. Radio planning and coverage optimization of 3G cellular networks. *Wireless Networks*. 2008;14(4):435–447. Available from: <https://doi.org/10.1007/s11276-006-0729-3>
8. Siomina I., Yuan D. Analysis of Cell Load Coupling for LTE Network Planning and Optimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2012;11(6):2287–2297. Available from: <https://doi.org/10.1109/TWC.2012.051512.111532>
9. Mathar R., Niessen T. Optimum positioning of base stations for cellular radio networks. *Wireless Networks*. 2000;6(6):421–428. Available from: <https://doi.org/10.1023/A:1019263308849>
10. Mathar R., Schmeink M. Optimal Base Station Positioning and Channel Assignment for 3G Mobile Networks by Integer Programming. *Annals of Operations Research*. 2001;107(1–4):225–236. Available from: <https://doi.org/10.1023/A:101495931>
11. Mathar R., Schmeink M. Integrated Optimal Cell Site Selection and Frequency Allocation for Cellular Radio Networks. *Telecommunication Systems*. 2002;21(2–4):339–347. Available from: <https://doi.org/10.1023/A:1020958901292>
12. Zikratov I.A., Zikratova T.V. Optimization of the coverage area for the cellular communication systems in out of town locations. *Information and Control Systems*. 2007;3(28):52–55. (in Russ.)
13. Zikratov I.A., Shago F.N., Gurtov A.V., Ivaninskaya I.I. Optimization of the coverage zone for a cellular network based on mathematical programming. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2015;15(2):313–321. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-2-313-321>
14. Gerdenitsch A., Jakl S., Toeltsch M., Neubauer T. Intelligent algorithms for system capacity optimization of UMTS FDD networks. *Proceedings of the 4th International Conference on 3G Mobile Communication Technology, 25–27 June 2003, London, UK*. p.222–226. Available from: <https://doi.org/10.1049/cp:20030368>. IET Digital Library. [https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp\\_20030368](https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp_20030368) [Accessed 25th February 2019]
15. Liyanage M., Chirkova J., Gurtov A. Access Point selection game for mobile wireless users. *Proceedings of IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 19 June 2014, Sydney, Australia*. Piscataway, NJ: IEEE, 2014. Available from: <https://doi.org/10.1109/WoWMoM.2014.6918913>
16. Ermolaev S.I. Primenenie geneticheskikh algoritmov dlia resheniia zadachi optimalnogo razmeshcheniia bazovykh stantsii [Application of Genetic Algorithms to Solve the Problem of Optimal Placement of Base Stations]. *Proceedings of the 10th International Conference. Digital signal processing and its applications, DSPA, Moscow, Russian Federation, 26–28 March 2008*. Moscow: Institute of Control Sciences RAS Publ.; 2008. p.312–314. (in Russ.)
17. Zikratov I.A., Stepanenko K.V. The digital landscape maps scale substantiation, used for calculation of radio signals field intensity. *Information and Control Systems*. 2005;1(14):10–15. (in Russ.)
18. Zikratov I.A., Stepanenko K.V. Obosnovanie trebovaniia k tochnosti tsifrovoy kartograficheskoi informatsii v geoinformatsionnykh sistenmakh proektirovaniia i analiza radiolinii [Justification of Requirements for Accuracy of Digital Cartographic Information in Geographic Information Systems Design and Analysis of Radio Lines]. *Information and Control Systems*. 2004;2(9):21–25. (in Russ.)
19. Zikratov I.A., Samotonin D.N. *Geoinformatsionnyi analiz radiolokatsionnykh otrazhenii* [Geoinformational Analysis of Radar Reflections]. St. Petersburg: Politekhnik Publ.; 2004. 143 p. (in Russ.)
20. Taha H.A. *Operations research: an introduction*. New York: Macmillan publishing; 1982. 491 p.
21. Babkov V.I., Vozniuk M.A., Mikhailov P.A. *Seti mobilnoi sviazi Chastotno-territorialnoe planirovanie* [Mobile Networks. Frequency-Territorial Planning]. Moscow: Goriachaia liniia-Telekom Publ.; 2013. 220 p. (in Russ.)