

Расчёт зон обслуживания кластера базовых станций систем сотовой связи при заданном распределении абонентов

Д. А. Покаместов, В. А. Кологринов, Г. П. Бабур-Карателли, Я. В. Крюков

Разработан алгоритм расчёта зон обслуживания кластера базовых станций систем сотовой связи при заданном распределении абонентов на территории. В основу алгоритма положено описание кластера сотовой связи с помощью переопределенной системы линейных уравнений, учитывающих распределение нагрузки и расстояния между станциями. Нагрузка на базовую станцию определяется как функция количества абонентов в зоне ее покрытия. При неоднородном распределении абонентов функция нагрузки формируется с помощью степенной аппроксимации массива абонентов. По полученным алгоритмам в среде MatLab написана программа, позволяющая оценивать зону обслуживания кластера из нескольких базовых станций. Программа может применяться при проектировании систем связи как в городских условиях, так и на крупных инфраструктурных объектах, например, в промышленных зонах или на нефтегазовых месторождениях.

Ключевые слова: сотовая связь, зона обслуживания базовой станции, кластер сотовой связи, распределение абонентов.

1. Введение

При проектировании сетей сотовой связи важно правильно определить расположение базовых станций (БС) и их зоны покрытия. При этом следует учитывать ряд факторов, влияющих на дальность действия БС, таких как мощность, излучаемая передающей антенной, чувствительность приемника, ослабление в канале, нагрузка в соте (количество абонентов), особенности ландшафта (естественные и искусственные) и др. Возникает задача расчёта зон покрытия БС в кластере на определенной территории, которая сводится к обеспечению необходимого уровня сигнала в каждой точке соты и обслуживанию определенного числа абонентов, не больше максимального для выбранного оборудования [1, 2]. Решению этой задачи посвящен ряд работ [3–10]. С ростом числа абонентов и увеличением трафика в условиях города или крупного инфраструктурного объекта определяющим фактором становится интенсивность нагрузки в соте [11–13]. При этом БС образуют массив, в котором необходимо учитывать взаимное влияние сигналов. Задачу можно свести к расчёту такого положения БС, при котором сигналом покрыта вся необходимая территория, а взаимное наложение сигналов от разных БС сводится к минимуму [14, 15]. Данная статья посвящена расчёту зон покрытия БС в кластере с учетом распределения сетевой нагрузки, вопросы ослабления сигнала и электромагнитной совместимости не рассматриваются, также не конкретизируется стандарт сотовой связи.

Форма соты в общем случае в силу неоднородности распределения абонентов, различного ландшафта является сложной фигурой, однако для упрощения расчётов зону обслуживания одной станции можно считать кругом или шестиугольником [16]. В данной статье рассматривается круговая форма соты, но в отличие от [8, 10, 11, 13, 14] используется другая

математическая модель описания зоны покрытия БС. Работа является продолжением и обобщением [13–15], введены поправки в уравнения, описывающие кластер, получены новые зависимости.

2. Расчёт покрытия БС

Пусть имеется массив координат БС, расположенных в кластере, и нагрузка на каждую БС. Нагрузка на сеть традиционно определяется в эрлангах, она пропорциональна плотности абонентов в предполагаемой зоне обслуживания, поэтому в дальнейшем в целях упрощения анализа в качестве нагрузки будем рассматривать именно количество абонентов. В случае двух БС можно считать, что отношение нагрузок, приходящихся на каждую станцию, соответствует обратному отношению радиусов этих станций:

$$\frac{y_j}{y_i} = \frac{r_i}{r_j}, \text{ или } r_i \cdot y_i - r_j \cdot y_j = 0, \quad (1)$$

где $r_{i(j)}$ – радиус обслуживания $i(j)$ -ой станции, $y_{i(j)}$ – нагрузка на $i(j)$ -ую станцию, $i(j) = 1, \dots, n$, где n – количество БС в кластере.

Расстояние между БС равно сумме радиусов обслуживания:

$$r_i + r_j = d_{ij}, \quad (2)$$

где d_{ij} – расстояние между соседними БС.

Решая систему уравнений, составленную из (1) и (2), можно однозначно найти значения радиусов зон обслуживания БС (рис. 1).

Для кластера из трёх БС система содержит шесть уравнений:

$$\begin{cases} r_1 \cdot y_1 - r_2 \cdot y_2 = 0 \\ r_1 \cdot y_1 - r_3 \cdot y_3 = 0 \\ r_2 \cdot y_2 - r_3 \cdot y_3 = 0 \\ r_1 + r_2 = d_{12} \\ r_1 + r_3 = d_{13} \\ r_2 + r_3 = d_{23} \end{cases}, \text{ или } \begin{bmatrix} y_1 & -y_2 & 0 \\ y_1 & 0 & -y_3 \\ 0 & y_2 & -y_3 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ d_{12} \\ d_{13} \\ d_{23} \end{bmatrix}.$$

В матричном виде для произвольного числа БС:

$$Y \cdot R = D, \quad (3)$$

где Y – матрица размерностью $2n \times n$, содержащая n элементов y_i и устанавливающая связь между БС. R – вектор-столбец неизвестных радиусов обслуживания БС размерностью $n \times 1$. D – вектор-столбец размерностью $2n \times 1$, содержащий n нулей и n элементов d_{ij} , n – количество БС.

Исходя из известной формулы комбинаторики $C_n^m = \frac{n!}{(n-m)! \cdot m!}$, в общем случае система

(3) содержит $\frac{2 \cdot n!}{(n-2)! \cdot 2!} = \frac{n!}{(n-2)!}$ уравнений при n неизвестных, то есть является переопределенной. Решая ее с помощью метода наименьших квадратов (МНК) [17], получаем вектор-столбец искомых радиусов действия БС:

$$R = \left[Y^T \cdot Y \right]^{-1} \cdot Y^T \cdot D. \quad (4)$$

Используя МНК, мы минимизируем как взаимное перекрытие БС, так и зазор между ними, учитывая распределение нагрузок. На рис. 1 приведены результаты расчёта зон покрытия

БС при заданной нагрузке для разного количества БС. Кластером принято считать совокупность БС размерностью 3, 4, 7, 12, 19 и т.д., но на практике могут возникать ситуации, когда для покрытия заданной территории необходимо установить иное количество БС, например, 2 или 5, как это изображено на рис. 1а и 1г. На рис. 1б между БС есть пространство, не охваченное связью (они приведены для иллюстрации нахождения решения (4)), которое можно устранить, введя поправочный коэффициент перекрытия зон (умножить полученные в результате решения (4) радиусы на этот коэффициент); так, на рис. 1в вводится частичное перекрытие, сокращающее площадь не охваченной связью территории, на рис. 1г такое перекрытие обеспечивает связь на всей территории.

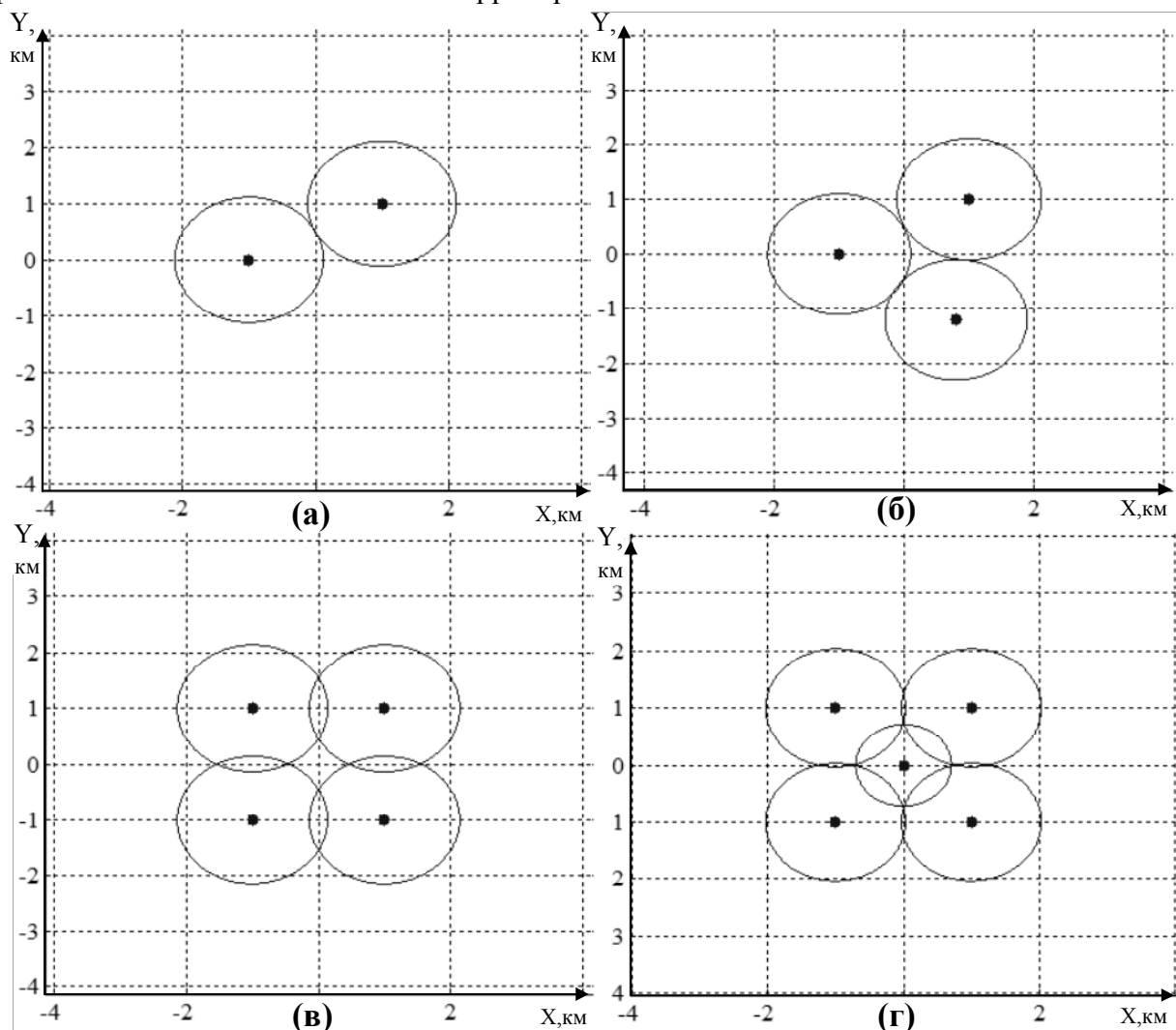


Рис. 1. Результаты расчёта покрытия БС при равномерной плотности распределения абонентов: а – для двух БС, б – для трех БС, в – для четырех БС, г – для пяти БС

3. Расчёт покрытия БС с учетом распределения абонентов

В описываемом выше подходе нагрузка на БС y_i является фиксированной и не зависит от радиуса покрытия БС, что противоречит реальности. С увеличением радиуса увеличивается площадь покрытия, а значит и количество обслуживаемых абонентов и нагрузка на БС. Таким образом, величина y_i является функцией радиуса покрытия базовой станции r_i .

Для того чтобы определить зависимость нагрузки от радиуса покрытия базовой станции, введем двумерную плотность распределения абонентов на территории, предназначенной для

проектирования сети сотовой связи (рис. 2). Распределение, изображенное на рис. 2, соответствует территории с высокой пиковой нагрузкой в центре. Данное распределение сформировано в среде MatLAB и носит демонстративный характер. Для расчета реальных задач распределение должно быть построено на основе анализа данных геоинформационных систем (ГИС).

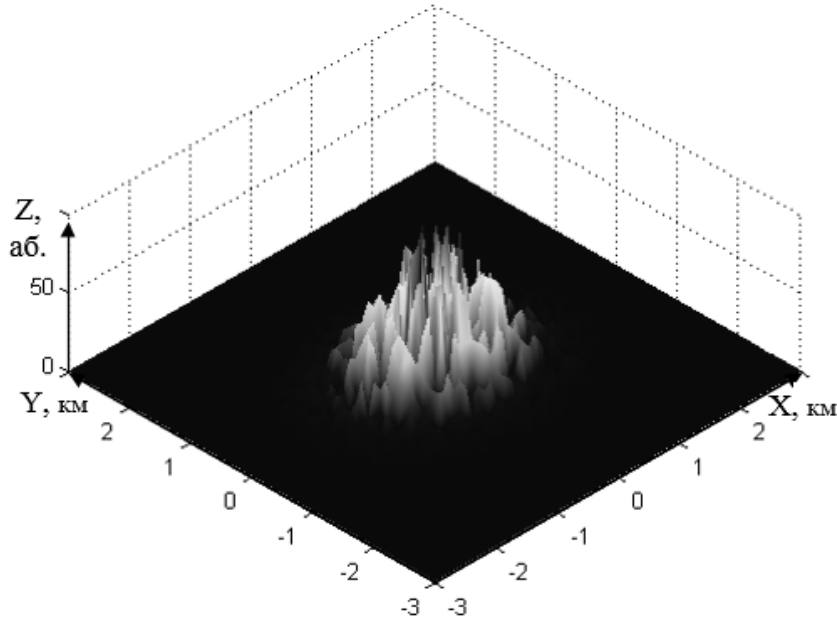


Рис. 2. Распределение абонентов

На рис. 2 осями OX и OY обозначены координаты в километрах, Oz – количество абонентов в выбранной координатной точке. Процесс формирования подобной карты может быть основан на анализе ГИС или иных баз данных, на которых нанесены жилые дома с информацией об их этажности, учреждения массового посещения (аэропорты, вокзалы, стадионы). Процесс анализа подобных баз данных будет сводиться к трем этапам:

1. Формирование карты распределения пользователей на основании информации о типе здания и количестве этажей.
2. Усреднение между зданиями, благодаря которому учитывается перемещение абонентов.
3. Дискретизация по координатной сетке. На этом этапе выбирается шаг дискрета и считается количество пользователей, находящихся в окрестности выбранной точки, которое является значением по координате Oz .

По сформированной карте распределения плотности абонентов можно ввести нагрузку БС как функцию радиусов зон покрытия. Для этого вычисляется набор значений интегралов, выражаемых через конечные суммы:

$$S(r_i) = \sum_{x_i=0}^{r_i} \sum_{y_i=0}^{y_i} K(x_i, y_i), \quad \sqrt{(x_{i0} - x_i)^2 + (y_{i0} - y_i)^2} \leq r_i, \quad (5)$$

где $S(r_i)$ – количество пользователей в области с центром в точке (x_{i0}, y_{i0}) , ограниченной окружностью радиусом r_i ; элементы массива r_i изменяются с шагом, равным дискрету координатной сетки в выбранном диапазоне. Аппроксимация массива S проводится полиномом степени N . На рис. 3 приведена зависимость среднеквадратического отклонения (СКО) ошибки аппроксимации от степени полинома N для плотности распределения абонентов, изображенной на рис. 2. СКО считается как:

$$\sigma(N) = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{r_i=0}^R (y^N(r_i) - S(r_i))^2}, \quad (6)$$

где K – объем выборки (количество дискретов r_i), $y^N(r_i)$ – значение функции количества абонентов при радиусе обслуживания базовой станции, равном r_i и аппроксимирующем полиноме порядка N , $S(r_i)$ – реальное количество абонентов в площади, ограниченной r_i , R – максимальный рассматриваемый радиус.

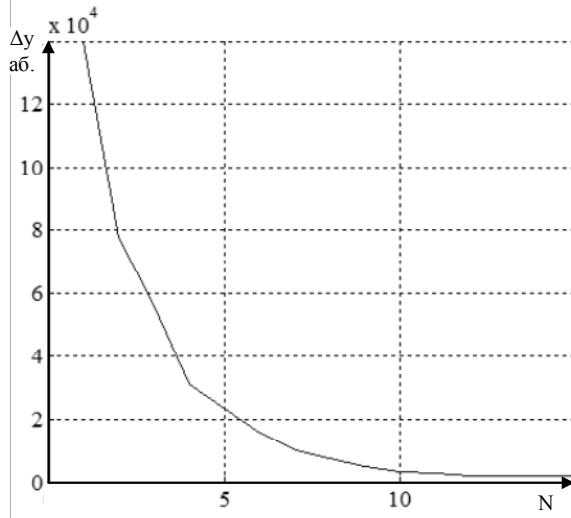


Рис. 3. Зависимость СКО ошибки аппроксимации от степени полинома

С увеличением порядка аппроксимирующего полинома увеличивается точность, однако также увеличивается вычислительная сложность алгоритма. Поэтому целесообразно взять N равным не менее 8.

Подставляя в (3) получившееся выражение для нагрузки на БС, получим:

$$\begin{cases} r_1 \cdot p_1(r_1) - r_2 \cdot p_2(r_2) = 0 \\ r_1 \cdot p_1(r_1) - r_3 \cdot p_3(r_3) = 0 \\ r_2 \cdot p_2(r_2) - r_3 \cdot p_3(r_3) = 0 \\ r_1 + r_2 = d_{12} \\ r_1 + r_3 = d_{13} \\ r_2 + r_3 = d_{23} \end{cases}, \quad (7)$$

$$p(r_i) = a_{i1}r_i^N + a_{i2}r_i^{N-1} + \dots + a_{iN}r_i + a_{iN+1},$$

где a_{ik} – коэффициенты аппроксимирующего полинома нагрузки БС $p(r_i)$ порядка N , i – номер БС, k – номер коэффициента, $k = 1..N+1$.

Таким образом, (5) представляет собой переопределенную систему нелинейных уравнений порядка $N+1$. Для нахождения корней применим метод Ньютона, основанный на линеаризации функций и последовательном приближении [15, 18]. Для определенной системы нелинейных уравнений:

$$R_{t+1} = R_t - \frac{F(R_t)}{J(R_t)}, \quad (8)$$

где R_{t+1} – вектор-столбец искомых радиусов, R_t – вектор-столбец искомых радиусов в предыдущей итерации, $F(R_t)$ – значение функций, выраженных из системы (3) при $R = R_t$, $J(R_t)$ – матрица частных производных (матрица Якоби) в точках R_t . В первой итерации вектор R_1 формируется как решение системы линейных уравнений (5) для априорной информации о нагрузках.

Для переопределенной системы нелинейных уравнений (6) с учетом (4) преобразуется в:

$$R_{t+1} = R_t - \left[J^T(R_t) \cdot J(R_t) \right]^{-1} \cdot J^T(R_t) \cdot F(R_t), \quad (9)$$

Условием выхода из алгоритма является условие:

$$\max(R_{t+1} - R_t) < \varepsilon, \quad (10)$$

где ε – допустимая погрешность определения радиусов, $\max(R_{t+1} - R_t)$ – максимальный элемент вектора приращений радиусов. Значение погрешности ε целесообразно выбирать равным дискрету распределения абонентов по территории. В расчетах, результаты которых приведены в данной работе, значение ε составляет 10 метров.

Обобщенная схема алгоритма расчёта зон обслуживания БС приведена на рис. 4. Алгоритм реализован в пакете MatLab.

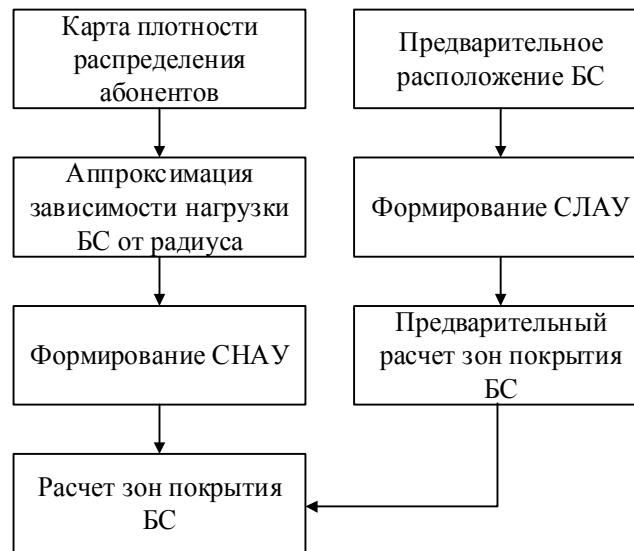


Рис. 4. Обобщенная схема алгоритма расчёта зон покрытия БС

4. Результаты моделирования и выводы

На рис. 5 приведены результаты расчёта зон покрытия станций при заданном распределении абонентов (рис. 2). Результаты расчёта иллюстрируются трехмерными рисунками с плотностью распределения абонентов и зонами покрытия БС, изображенными цилиндрами. Как видно из рис. 5а, нагрузка распределяется между двумя БС, которые расположены на некотором удалении от центра концентрации абонентов. При увеличении количества БС нагрузка на каждую станцию и их радиусы уменьшаются (рис. 5б, 5в). При проектировании сети целесообразно выбирать такое расположение и количество станций, чтобы рассчитанная нагрузка не превышала заявленную производительность БС.

Алгоритм позволяет производить оптимизацию зон покрытия путем изменения координат БС и оценивать нагрузку на каждую станцию. Коррекция зон может производиться путем умножения радиуса на коэффициент k , который является аналогом регулирования мощности передающей антенны БС.

Авторами предложен алгоритм, позволяющий производить расчёт радиусов покрытия БС и зоны обслуживания кластера БС сетей сотовой связи при неравномерном распределении абонентов. Расчёт основан на решении переопределенной системы нелинейных алгебраических уравнений, учитывающих распределение нагрузки и расстояния между БС.

Разработанная программа может использоваться операторами сотовой связи как совместно с программами, анализирующими затухание сигнала и электромагнитную совместимость, так и самостоятельно при проектировании кластера из нескольких БС.

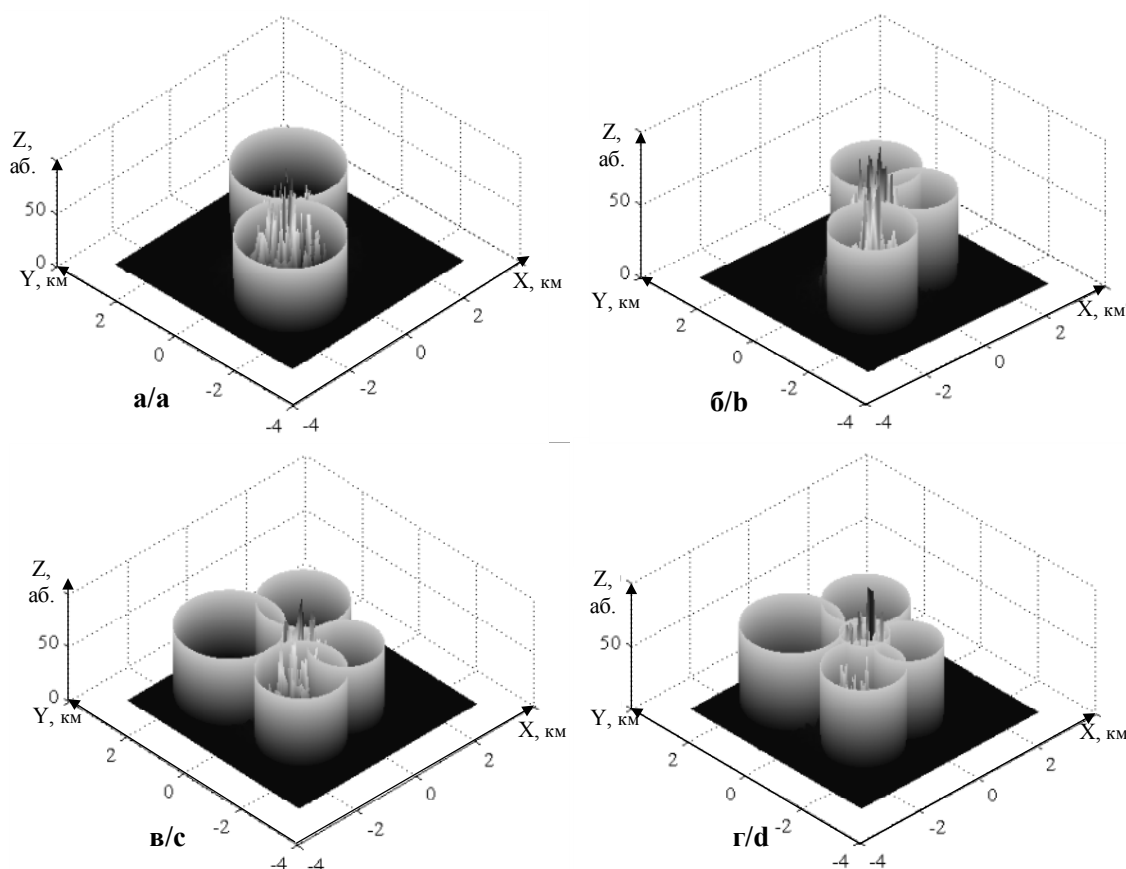


Рис. 5. Результаты расчёта покрытия БС при заданной плотности абонентов:
а – для двух БС, б – для трех БС, в – для четырех БС, г – для пяти БС

Литература

1. *Rappaport T. S.* Wireless communications: principles and practice. New Jersey: prentice hall PTR. 1996. V. 2. 736 p.
2. *Бабков В. Ю., Вознюк М. А., Михайлов П. А.* Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. М.: Горячая линия–Телеком, 2007. 536 с.
3. *Sreng V., Yanikomeroğlu H., Falconer D.* Coverage enhancement through two-hop relaying in cellular radio systems // Wireless Communications and Networking Conference, WCNC2002. 2002. V. 2. P. 881–885.
4. *Motley A. J., Keenan J. M. P.* Personal communication radio coverage in buildings at 900 MHz and 1700 MHz // Electronics Letters. 1988. V. 24, №. 12. P. 763–764.
5. *Lieska K., Laitinen E., Lähteenmäki J.* Radio coverage optimization with genetic algorithms // Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. The Ninth IEEE International Symposium on. 1998. V. 1. P. 318–322.
6. *Markus O.* Method and apparatus for planning a cellular radio network by creating a model on a digital map adding properties and optimizing parameters, based on statistical simulation results: пат. 5561841 США. 1996.
7. *Ho M. J., Stuber G. L., Austin M. D.* Performance of switched-beam smart antennas for cellular radio systems // Vehicular Technology, IEEE Transactions on. 1998. V. 47, №. 1. P. 10–19.
8. *Ashraf I., Claussen H., Ho L. T. W.* Distributed radio coverage optimization in enterprise femto-cell networks // Communications, IEEE International Conference on. 2010. P. 1–6.

9. *Chan G. K.* Propagation and coverage prediction for cellular radio systems // *Vehicular Technology*, IEEE Transactions on. 1991. V. 40, №. 4. P. 665–670.
10. *Yanikomeroglu H., Falconer D. D., Sreng V. M.* Coverage enhancement through two-hop peer-to-peer relaying in cellular radio networks // *Broadband Communications and Wireless Systems (BCWS) Centre Department of Systems & Computer Engineering*, Carleton University, Ottawa, Canada. 2002. P. 3–4.
11. *Попов В. А., Веропаева В.Я., Верховский Я.М.* Алгоритм оптимальной кластеризации для сетей сотовой связи. [Электронный ресурс]. URL: http://ea.donntu.org:8080/jspui/bitstream/123456789/1833/1/Popov_Voropaeva_Verch.pdf (дата обращения: 10.03.2016).
12. *Кузнецов И. В., Блохин В. В., Султанов А. Х.* Разработка модели и алгоритмов стохастической идентификации ситуации в системе мобильной связи // *Материалы Шестой Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций»*, Уфа, 2005. С. 28–30.
13. *Егоров Л. Л., Кологривов В. А.* Нелинейная задача расчёта зон обслуживания базовых станций // *Доклады ТУСУРа*. 2009. Т. 20, №. 2. С. 21–25.
14. *Егоров Л. Л., Кологривов В. А., Мелихов С. В.* Алгоритм расчёта зон покрытия базовых станций сотовой связи // *Доклады ТУСУРа*. 2009. Т. 19. С. 15–21.
15. *Егоров Л. Л., Кологривов В. А., Мелихов С. В.* Методика коррекции зон обслуживания базовых станций при оптимизации сотовой структуры сетей связи. // *Доклады ТУСУРа*. 2010. Т. 22, № 2. С. 15–21.
16. *Baltzis K. B.* Hexagonal vs circular cell shape: a comparative analysis and evaluation of the two popular modeling approximations. – *Cellular Networks - Positioning, Performance Analysis, Reliability*, 2011. P. 106–122.
17. *Стрелъ Г.* Линейная алгебра и ее применения. М: Мир, 1980. 459 с.
18. *Кологривов В.А.* Прикладные математические методы в радиотехнике. Часть 1. Аналоговые системы. Томск: ТУСУР, 2012. 159 с.

*Статья поступила в редакцию 20.04.2016;
переработанный вариант – 19.05.2016*

Покаместов Дмитрий Алексеевич

аспирант, ассистент кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (634050, Томск, пр. Ленина 40), e-mail: dmaltomsk@mail.ru.

Кологривов Василий Андреевич

доцент кафедры радиотехнических систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (634050, Томск, пр. Ленина 40), e-mail: mrc@main.tusur.ru.

Бабур-Карателли Галина Петровна

PhD, научный сотрудник кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (634050, Томск, пр. Ленина 40), e-mail: galinababur@gmail.com.

Крюков Яков Владимирович

аспирант, ассистент кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (634050, Томск, пр. Ленина 40), e-mail: yaachik@gmail.com.

Calculation of base station coverage cluster for a given subscriber distribution**D. Pokamestov, V. Kologrivov, G. Babur, Ya. Kryukov**

The algorithm for calculating the radius of cellular base stations at given information about network load is developed. Algorithm description of a cellular cluster using predetermined system of linear equations taking into account the distribution of the load and the distance between stations is taken as a principle. Base station loading is defined as a function of subscriber's number in its coverage area. With inhomogeneous subscriber's distribution, load function is formed using a power approximation of subscriber's array. According to obtained algorithms, a program was written in MatLab that allows you to evaluate the cluster service area of several base stations. The program can be used in the design of communication systems in urban areas and in major infrastructure projects, such as industrial zones, or oil and gas fields.

Keywords: cellular base station, base station coverage area, a cluster of mobile communication, subscriber's distribution.