

Разработка алгоритмического и программного обеспечения процессов управления радиоресурсами в сетях мобильной связи на основе методов Густафсона–Кесселя и Монжа–Канторовича

К. Н. Зотов, И. В. Кузнецов, Р. Р. Жданов

Наиболее динамично развивающейся отраслью телекоммуникаций на сегодняшний день является сотовая связь различных стандартов. Технологии сотовых систем изменяются с такой скоростью, что еще не успевают полностью развернуться сети 3G на территории России, как уже внедряются 4G. Четвертое поколение отличается технологией LTE-advanced, которая подразумевает интеллектуальную сеть с самообучением и частичной подстройкой своих параметров. Функции распределения радиоресурса сети сотовой связи этого стандарта ложатся на базовые станции. Однако еще не разработаны четкие алгоритмы управления такими сетями. Инженерные центры «большой тройки» операторов в России не имеют учебных пособий, раскрывающих данный вопрос. В рамках ситуационно-адаптивного планирования радиоресурсов в системах радиосвязи предлагается способ определения узлов спроса и распределения абонентов по полученным узлам на основе алгоритма нечеткой кластеризации Густафсона–Кесселя. Полученные конгломераты абонентов обрабатываются с помощью алгоритма транспортной задачи Монжа–Канторовича и интегрируются в существующие сети сотовых операторов связи

Ключевые слова: позиционирование, ситуационно-адаптивное планирование, кластерный анализ, узел спроса, алгоритм Густафсона–Кесселя, транспортная задача Монжа–Канторовича.

1. Введение

Постоянный рост рынка систем мобильной связи всех стандартов обусловлен возрастающим количеством функций оператора связи. Появляются приложения для мобильных устройств, требующие большей зоны покрытия, устойчивого приёма, более высоких скоростей передачи данных и полного отсутствия блокировок и отказов в обслуживании.

В таком аспекте развития основной упор ложится не на перестроение физической части сети оператора связи, а на логические компоненты: модели эффективного управления, системы распределения частотно-временных и канальных ресурсов сети, внедрение дифференцированного доступа (рис. 1).

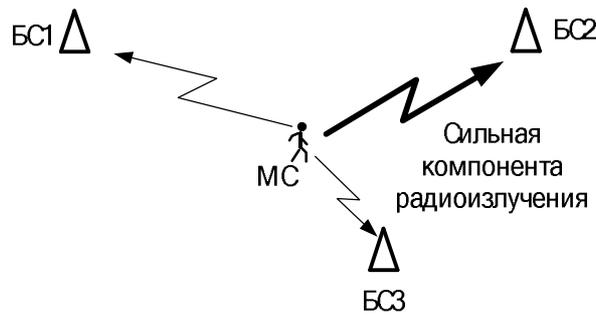


Рис. 1. Традиционная модель доступа к радиоресурсам системы подвижной связи

Традиционная модель доступа к радиоресурсам сети подвижной связи основана на условном позиционировании абонента в сети в момент подключения по наиболее сильной компоненте радиоизлучения [1].

В такой системе связи отсутствует прогноз распределения нагрузки, создаваемой абонентами. Сеть оператора работает круглосуточно в режиме полной мощности включения излучателей и приёмников в ожидании аномального явления в виде резкого изменения концентрации абонентов внутри обслуживаемой соты. При этом в случае факта аномального явления в результате большого количества обращений к базовым станциям оператора связи в отдельно взятой зоне (соте) происходит блокировка и отказ в обслуживании.

Задачей управления в сети оператора является равномерное распределение всех радиоресурсов с учётом аномальных явлений.

Предлагаемая концептуальная модель (рис. 2) дифференцированного доступа абонентов к радиоресурсам в системах сотовой связи отличается от известных введением дополнительных функций позиционирования, кластеризации и управления каналным ресурсом, позволяет повысить эффективность систем сотовой связи с учётом предъявляемых требований по качеству QoS (CoS). Модель позволяет совершать прогнозирование в рассматриваемых системах.

Возникает необходимость статистической «фильтрации» абонентов для объединения их в группы (кластеры) на основе территориальной конгломерации.

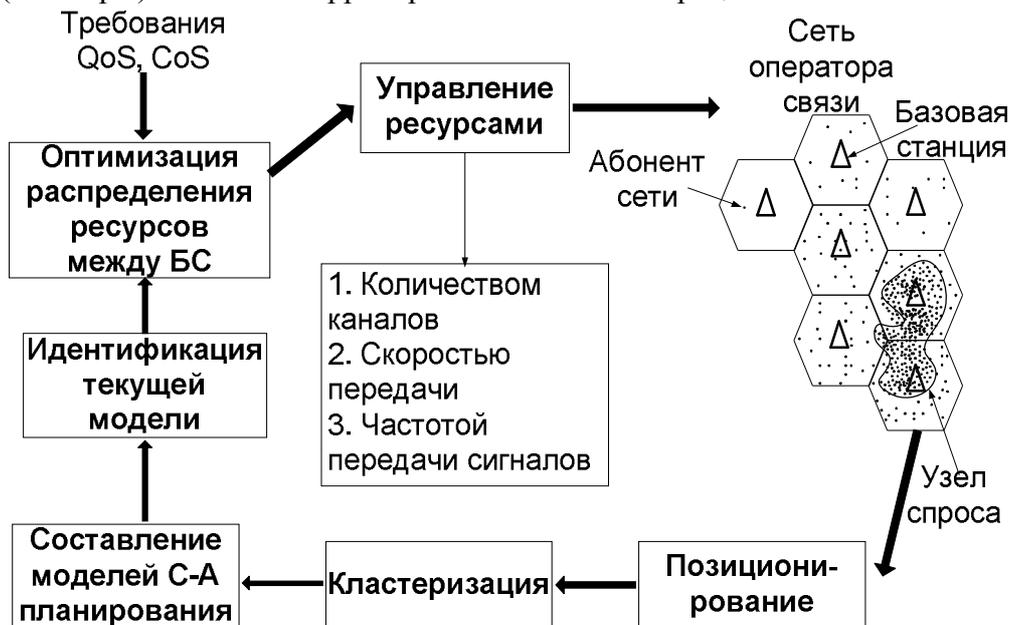


Рис. 2. Концептуальная модель дифференцированного доступа абонентов к радиоресурсам

Таким «фильтрующим» методом может быть кластеризация всех позиционированных тем или иным способом мобильных устройств [2]. В результате кластеризации могут быть

получены узлы спроса – центры кластеров. Такие узлы спроса будут отражать наиболее концентрированную степень нагрузки в локальной зоне обслуживания, требующей вовлечения дополнительных радиоресурсов (свободные частотные полосы, каналы связи и т.д.). С целью более эффективного управления радиоресурсами необходимо решить следующие задачи управления:

1. Обеспечить динамическую кластеризацию мобильных устройств с выделением узлов спроса.
2. Обеспечить распределение необходимого количества радиоресурсов по узлам спроса без физического перестроения существующих сетей операторов мобильной связи.



Рис. 3. Система дифференцированного доступа на основе кластерного анализа трафиковых процессов

В такой системе возможно внедрение параметров QoS и CoS (качества и классов обслуживания) путем выставления приоритета на те или иные зоны, услуги, кластеры и пр. (рис. 3). Дифференцированное обслуживание в таких сетях будет являться наиболее адекватным и будет происходить на уровне QoS. Происходит замкнутое управление радиоресурсами системы с ситуационно-адаптивным планированием. При этом оптимальное управление канальными ресурсами наиболее удобно производить с использованием задачи Монжа–Канторовича. Алгоритм управления радиоресурсами дифференцированного доступа абонентов к радиоресурсам сети оператора связи позволяет исключить блокировки (отказы) в обслуживании и оптимизировать распределение каналов между абонентами и базовыми станциями в зоне обслуживания.

2. Постановка задачи

Применительно к концепции управления радиоресурсами систем мобильной связи общая задача кластеризации сводится к определению границ (координат) кластеров, по сути, являющихся агрегированным источником сообщений, а также классификации трафика этих источников сообщений. При этом решение задачи кластеризации должно происходить в режиме реального времени.

Задачами оптимального управления канальными ресурсами в системах радиосвязи являются:

1. Определение текущей потребности нагрузки в сети сотовой связи с учётом возможных перемещений абонентов.

2. Выбор, распределение и оптимизация частотно-временного ресурса сети с учётом необходимой пропускной способности системы связи.

3. Оптимальное прогнозирование и управление размерами зон радиопокрытия базовыми станциями с учётом требуемого качества обеспечения приёма сигналов.

4. Идентификация и оценка изменения нагрузки в сети, обусловленной урбанизационными, сезонными, временными и иными факторами.

Моделями, позволяющими решать эти задачи, являются модели ситуационно-адаптивного планирования [3]. Под ситуационно-адаптивным планированием понимается изменение конфигурации сети мобильной связи средствами интеллектуального управления с использованием методов оптимального частотно-территориального планирования.

Процессы в системе мобильной радиосвязи удобно представить на основе географической (пространственно-временной) модели подвижности трафика. Предлагаемый трафик может быть оценён при помощи географических и демографических областей обслуживания с учётом оперативного позиционирования абонентов внутри сети как средствами самой сети связи, так и спутниковыми навигационными системами (для случаев использования смартфонов с соответствующим программным обеспечением). Полагается, что оценка трафика на основе позиционирования МС даёт более чёткую картину пространственно-временной нагрузки, чем статистические методы.

За основу географической модели пространственного распределения вызовов взята конгломерация трафика на отдельные точки, так называемые узлы спроса.

Абоненты сети сконцентрированы так, чтобы программа кластеризации выделила узел спроса на границе радиопокрытия двух базовых станций. Следовательно, необходимо распределить каналный ресурс системы радиосвязи. Задача распределения радиоресурсов между L базовыми станциями к узлам спроса с минимальными тратами энергоресурсов и максимальным количеством соединений есть ни что иное, как классическая задача линейного программирования, задача Монжа–Канторовича, она же транспортная задача. Это математическая задача специального вида о поиске оптимального распределения однородных объектов.

3. Решение задачи

Целью алгоритма кластеризации методом Густафсона–Кесселя является автоматическая классификация множества объектов [4], которые задаются векторами признаков в пространстве признаков. Этот алгоритм определяет кластеры и соответственно классифицирует объекты. Кластеры представляются нечёткими множествами, границы между кластерами также являются нечёткими. Алгоритм кластеризации методом Густафсона–Кесселя предполагает, что объекты принадлежат всем кластерам с определённой вероятностью. Степень принадлежности определяется расстоянием от объекта до соответствующих кластерных центров. Данный алгоритм итерационно вычисляет центры кластеров и новые степени принадлежности объектов.

Часть 1. Алгоритм кластеризации методом Густафсона–Кесселя:

Шаг 1. Формирование массива исходных данных.

Шаг 2. Определение необходимого количества кластеров [5].

Шаг 3. Задание уровня точности ε и весового коэффициента β , определяющего степень размытия кластеров ($\beta \in [1;2]$). Формирование случайной матрицы нечёткого разбиения.

Шаг 4. Вычисление матрицы центров кластеров:

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^N U_j^\beta(i) \cdot p_i}{\sum_{i=1}^N U_j^\beta(i)}, \quad (1)$$

где $U_j^\beta(i)$ – матрица нечёткого разбиения, промежуточный ответ;

p_i – массив исходных данных, физическая характеристика, по которой объединяются абоненты в кластеры (нагрузка, тип нагрузки, расстояние до узла спроса и пр.);

N – количество абонентов исследуемой сети.

Шаг 5. Вычисление матрицы ковариации:

$$S_j = \sum_{i=1}^N U_j^\beta(i) \cdot (p_i - c_j) \cdot (p_i - c_j)^T, \\ A_j = |S_j|^{\frac{1}{n}} \cdot S_j^{-1}. \quad (2)$$

Шаг 6. Вычисление расстояния между абонентами и узлами спроса:

$$U_j(i) = \frac{\|p_i - c_j\|_{A_j}^{\frac{2}{1-\beta}}}{\sum_{i=1}^m \|p_i - c_j\|_{A_j}^{\frac{2}{1-\beta}}}, \quad (3)$$

где $\| \cdot \|$ – матричная норма (например, Евклидова норма).

Шаг 7. Алгоритм нечёткой кластеризации останавливается при выполнении следующего условия:

$$\|U_j(i) - U_j^*(i)\| < \varepsilon. \quad (4)$$

Шаг 8. Определение центра масс полученных нечётких фигур в виде конечных координат (x,y) и степени принадлежности исходных данных к центрам масс.

Часть 2. Алгоритм работы управления каналными ресурсами с применением транспортной задачи:

Шаг 1. Нахождение аргументов x_{kl} , обеспечивающих минимум функционала J :

$$J = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^L c_{kl} \cdot x_{kl} \rightarrow \min, \quad (5)$$

где c_{kl} – условная средняя стоимость (вес) передачи сообщений, приходящейся на один канал, из k -го узла спроса в l -ую базовую станцию;

x_{kl} – планируемое число каналов, которое будет использоваться l -ой базовой станцией для обслуживания k -го узла спроса;

$\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^L c_{kl} \cdot x_{kl}$ – общая (суммарная) стоимость канального распределения в системе мобильной связи.

Шаг 2. Определение условий физической реализуемости:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^L x_{kl} = N_k^{full}, k = \overline{1, N}, x_{kl} \leq 0 \\ \sum_{k=1}^N x_{kl} \leq N_k^{bs}, l = \overline{1, L} \\ \sum_{k=1}^N N_k^{full} \leq \sum_{l=1}^L N_k^{bs}, \end{cases}$$

где N_k^{full} – количество потребных каналов для обслуживания k -го узла спроса, определяемое как сумма каналов по всем заявкам в исследуемой области;

N_k^{bs} – максимальное число разрешённых (допустимых) каналов для l -ой базовой станции.

4. Пример

Моделирование задач происходило на программном обеспечении, написанном на языке C++. Точки и начальные центры кластеров берутся случайным образом на поле размером 500×500 условных единиц длины. Максимальное количество итераций, заложенное в программу, равно 300. Погрешность расчётов – 10^{-5} . Для решения поставленных задач были разработаны программы [6, 7].

Интерфейс поля «Точки» позволяет генерировать количество точек, кратное 100, либо указывать местоположение абонентов вручную. Текущая картина может быть сохранена или загружена из ранее проводимых опытов. Кнопка «очистить» позволяет очистить экран от всех вычислений и опытов. Поле «Расчёты» позволяет выбрать алгоритм кластеризации, задать количество кластеров, коэффициент нечёткости и нарисовать границы нечётких кластеров по методу Вороного [8] (рис. 4). Поле «Разладка» позволяет провести дополнительное исследование области точек. При этом необходимо выбрать длину стороны ячейки, на которые будет разбито поле исследования и порог разладки. Порог разладки отражает изменение концентрации абонентов в процентном соотношении.

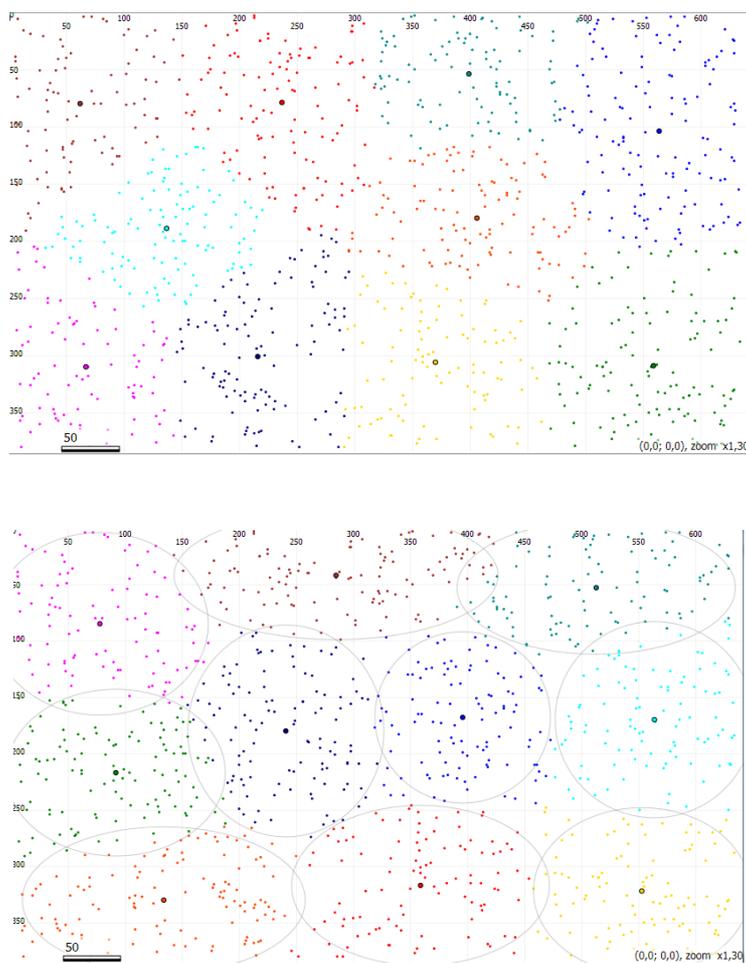


Рис. 4. Визуализация результатов нечёткой кластеризации методом Густафсона–Кесселя для большого количества абонентов

Любую существующую систему сотовой связи можно проанализировать по следующим этапам.

1. Позиционирование абонентов сети.
2. Выделение узлов спроса (кластеризация) масс позиционированных абонентов с помощью алгоритмов, предложенных выше (рис. 5).

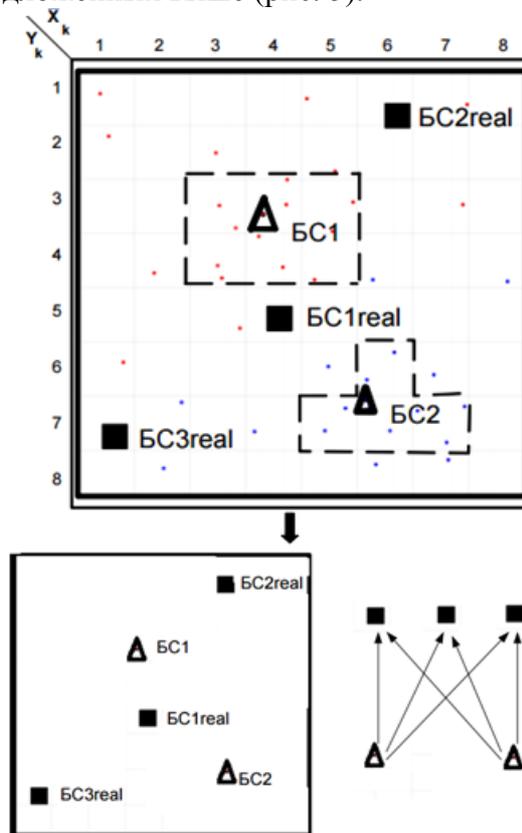


Рис. 5. Представление результата перераспределения радиоресурса с учётом его оптимального использования

Для проведения эксперимента был выбран густонаселённый район, где присутствуют и крупные транспортные развязки с присутствием общественного, частного и коммерческого транспорта, и муниципальные учреждения, и бизнес-центры, и социальные учреждения.

Согласно описанным выше этапам необходимо провести позиционирование абонентов сети. Проанализировав по существующим картам города выделенный район, делаем вывод, что преобладают здания пятиэтажной высоты со стандартной шириной улиц и плотностью застройки. Учитывая, что рассматривается система GSM900/1800, выбираем систему позиционирования, основанную на модели расчёта затухания радиосигнала Окамура–Хата. Точность позиционирования составляет 129 метров, площадь исследуемой области составит 12.04 км².

На втором этапе анализа существующей сети необходимо выделить узлы спроса (кластеризовать полученные массы абонентов). Для этого предлагается использовать алгоритмы кластеризации узлов спроса на основе разладки и нечёткой кластеризации.

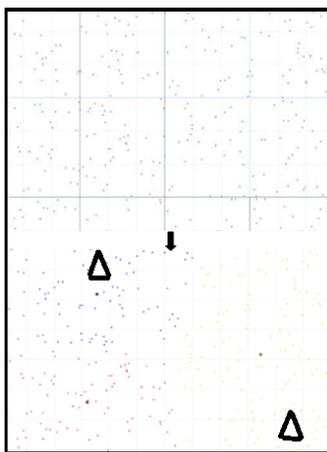


Рис. 6. Этапы кластеризации позиционированных абонентов

Позиционированные абоненты сети оператора связи могут быть перенесены в программу для кластерного анализа. Первым шагом будет являться выделение областей разладки, появление аномального явления, обусловленное изменением концентрации абонентов на 20 %.

Программно задаётся условие разделения множества абонентов на 3 кластера для вычисления их взвешенных центров. Как видно на рис. 6, черными треугольниками отмечены существующие БС сотового оператора. После обработки информации по заданному квадрату города программное обеспечение определило три точки наиболее эффективного расположения БС (жирные черные точки). Эти три точки являются расчетными узлами спроса.

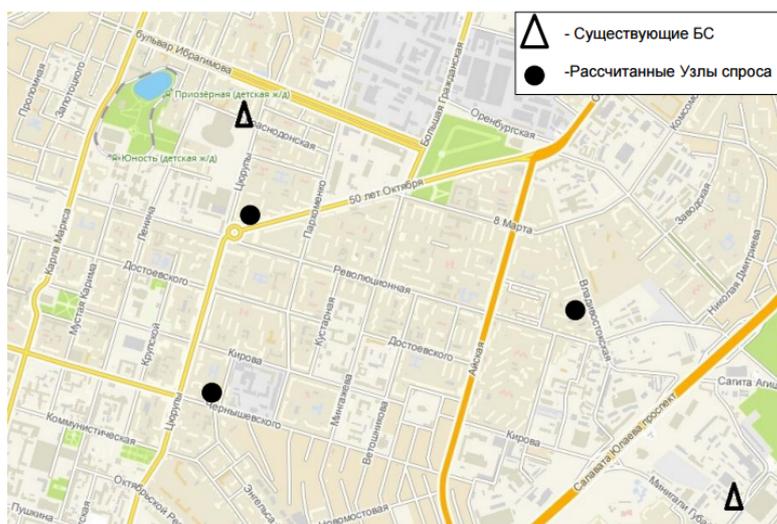


Рис. 7. Рекомендуемое расположение базовых станций оператора связи

На рис. 7 представлено оптимальное размещение БС сотового оператора с учётом реальной нагрузки и пространственного расположения абонентов.

Таким образом, предлагаемая зона обслуживания в 12 квадратных километров с учётом реальной картины нагрузки на сеть может быть полностью покрыта и обслужена тремя БС.

5. Заключение

Современные технологии требуют модернизации своей логической части (управление и пр.) с минимальными перестроениями физической составляющей («топологии» сетей). Со-

товые сети уже развёрнуты и функционируют достаточно успешно. Преобразования, ведущие к улучшению качества обслуживания, увеличению скорости передачи данных, увеличению количества функций оператора и предлагаемых услуг конечному потребителю, должны происходить незаметно для абонентов сети. Такие методы компьютерного моделирования и прогнозирования различных технологических процессов с использованием радиоволн уже применяются в различных областях науки и практики [9]. Предлагаемая модель и программные продукты позволяют использовать имеющиеся в сети оператора сигналы и команды для дополнительной функции выделения узлов спроса. Введение в эксплуатацию подобного ПО позволит не просто улучшить качество обслуживания по параметрам QoS и CoS [10], но и позволит более подробно изучать трафиковые процессы и радиосети в целом [11].

Литература

1. *Гольдштейн Б. С., Соколов Н. А., Яновский Г.Г.* Сети связи: учебник для вузов. СПб: БХВ – Петербург. 2010. 400 с.
2. *Бодянский Е. В., Колчигин Б. В., Волкова В. В., Плисс И. П.* Адаптивная нечеткая кластеризация данных на основе метода Густафсона–Кесселя // *Международный научный журнал Управляющие системы и машины.* 2013. № 2. С. 40–46.
3. *Султанов А. Х., Кузнецов И. В., Камалов А. Э.* Модели, задачи и алгоритмы ситуационно-адаптивного планирования радиоресурсов систем мобильной широкополосной связи // *Журнал Инфокоммуникационные технологии* 2011. Т.9. № 1. С. 19–25.
4. *Gustafson D. E., Kessel W. C.* Fuzzy clustering with a fuzzy covariance matrix // *IEEE Conference on Decision and Control including the 17th Symposium on Adaptive Processes.* 1979. P. 761–766.
5. *Зотов К. Н., Кузнецов И. В., Салов А. С., Симбирцева Д. С., Стрельникова Л. В.* Разработка алгоритмов кластерного анализа концентрации абонентских устройств в системах мобильной связи // *Журнал Электрические и информационные комплексы и системы.* 2015. Т. 11, № 1. С. 90–96.
6. Программа расчёта местоположения мобильных станций в сетях сотовой связи. Регистрационный номер № 2014614131.
7. Программа расчёта узлов спроса на основе кластерного анализа местоположения абонентов в сетях сотовой связи. Регистрационный номер № 2014613981.
8. *Препарата Ф., Шеймос М.* Вычислительная геометрия: Введение. М.: Мир. 1989. 295 с.
9. *Воробьев Н. П., Сошников А. А., Титов Е. В.* Использование компьютерного моделирования для оценки электромагнитных загрязнений // *Журнал Ползуновский вестник.* 2009. № 4. С. 31–33.
10. *Шринивас Вегешна.* Качество обслуживания в сетях IP: учебник. М.: Издательский дом «Вильямс». 2003. 368 с.
11. *Волков Л. Н., Немировский М. С., Шинаков Ю. С.* Системы цифровой радиосвязи. Базовые методы и характеристики: учебное пособие. М.: Эхо Трендз. 2005. 392 с.

*Статья поступила в редакцию 26.04.2016;
переработанный вариант — 12.05.2016*

Зотов Кирилл Николаевич

к.т.н., доцент кафедры телекоммуникационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета (450000, Респ. Башкортостан, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12), тел.: 8-960-388-8811; e-mail: zkn2002@inbox.ru.

Кузнецов Игорь Васильевич

д.т.н., доцент, профессор кафедры телекоммуникационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета (450000, Респ. Башкортостан, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12), тел.: 8-906-102-5487.

Жданов Руслан Римович

к.т.н., доцент кафедры телекоммуникационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета (450000, Респ. Башкортостан, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12), тел.: 8-927-236-7088; e-mail: rtz348@mail.ru.

Algorithms and software development of management processes of radio resource in mobile systems based on Gustafson–Kessel and Monge–Kantorovich methods

K.N. Zotov, I.V. Kuznetsov, R.R. Zhdanov

The most dynamic telecommunications industry today is different cellular standards. Cellular technologies are changing so fast that 4G and 5G are being implemented while 3G has not yet deployed on the territory of Russia. 5G has a featured technology called LTE-advanced that is self-learning intelligent network with partial corrective adjustment. In this case, distributive functions for wireless resource of cellular network are to be fulfilled by base stations. However, clear algorithms of control for such type of network haven't yet developed. Russian mobile operators have no teaching guides to understand that idea. Method of clusters localization is proposed as part of *situational concept* and adaptive planning to identify nodes of demand and distribute subscribers among these nodes via Gustafson–Kessel fuzzy clustering algorithm. These subscriber conglomerates are processed using Monge–Kantorovich transportation problem algorithm and integrated into existing mobile networks.

Keywords: positioning, situational-adaptive planning, cluster analysis, demand node, Gustafson–Kessel algorithm, transporting of Monge–Kantorovich algorithm.