

На правах рукописи

ТОКАРЬ Роман Сергеевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
АЛГОРИТМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
СОТОВЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2015 г.

Работа выполнена на кафедре «Радиотехнические системы» Федерального Государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования Московский технический университет связи и информатики (ФГОБУ ВПО МТУСИ)

Научный руководитель:

кандидат технических наук, профессор

Бонч-Бруевич Андрей Михайлович

Официальные оппоненты:

Приходько Виктор Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
ЗАО «Национальное Радиотехническое
Бюро» (НРТБ), генеральный директор

Мазепа Роман Богданович,
кандидат технических наук, профессор,
заведующий кафедрой МАИ

Ведущая организация:

ФГУП «Научно-исследовательский
институт радио»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2015 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д.219.001.03 при Федеральном Государственном образовательном бюджетном учреждении высшего профессионального образования Московский технический университет связи и информатики по адресу: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8а, ауд. А-455.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МТУСИ.

Автореферат разослан «__» _____ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д.219.001.03

к.т.н., доцент

Ерохин С.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

На сегодняшний день абонентская база сетей подвижной радиосвязи в мировом масштабе составляет более миллиарда абонентов, при этом темпы ее роста лишь увеличивается. Высоким темпам развития подвижной связи способствуют растущие потребности общества и конкуренция между компаниями операторами сетей связи.

Одна из главных проблем, характерных для России – недостаточность «кондиционного» частотного ресурса, который можно использовать без существенных ограничений на частотные, пространственные и энергетические параметры оборудования в диапазонах частот 400, 800, 900, 1800 МГц и 2 ГГц.

Диапазон 900 МГц, наиболее востребованный в системах сотовой подвижной связи, является самым сложным с точки зрения правовых и технических аспектов использования, поскольку используется для правительственной связи, воздушной радионавигации, спутниковой связи, для средств космической эксплуатации и исследований, систем ближней навигации и посадки.

При этом высвобождение радиочастотных средств является очень сложным процессом организационно-правовых и технико-экономических мер. И, что немаловажно, этот процесс требует колоссальных финансовых затрат.

В таких условиях перед компаниями-операторами остро встает вопрос о возможностях и способах эффективной модернизации и развития своих сетей.

К настоящему времени разработаны и широко используются многочисленные программные средства, позволяющие проектировать сети связи, оптимизировать частотно-территориальные планы, визуализировать радиопокрытие сетей и проблемные места с интерференцией, отслеживать информацию о качестве функционирования сетей.

Анализ возможностей таких средств и методик их применения выявил следующее:

- все упомянутые средства не могут ответить на вопрос, что делать с сетью при меняющейся нагрузке. Вопрос решается экспертным путем и не дает гарантий оптимального решения;

- «последовательный» характер использования программных средств не позволяет решать проблему одновременно с учетом всех ограничений, что дает неоптимальный результат;
- экспоненциальный рост сложности вычислительных алгоритмов, используемых в существующих программных средствах, приводит к тому, что сеть рассматривается не целиком, а фрагментами, что в большинстве случаев снижает эффективность решения.

Таким образом, разработка алгоритма поиска оптимальной топологии сети радиодоступа, имеющего приемлемую вычислительную сложность и позволяющего учитывать множество ограничивающих факторов, является одной из актуальных задач в рамках проблематики, относящейся к сетям сотовой подвижной связи.

Цель диссертационной работы состоит в разработке теоретических положений, методологических и практических предложений по решению задачи синтеза оптимальной топологии сети подвижной радиосвязи при низкой вычислительной сложности такого решения.

Объект исследования

Объектом исследования является сеть сотовой подвижной радиосвязи второго поколения стандарта GSM, хотя полученные методы и способы могут быть адаптированы к сетям практически любого поколения и стандарта, что подтверждено синтезом оптимальной сети четвертого поколения McWiLL.

Предмет исследования

Предметом исследования послужили проблемы практики и методологии работ по планированию и оптимизации сетей подвижной радиосвязи.

Научная новизна

Научная новизна предлагаемого решения заключается в том, что с использованием нового для этой области проектирования математического аппарата теории монотонных систем (ТМС) становится возможным аналитически строго решить поставленную задачу на исходном множестве большой мощности.

Практическая значимость работы

Практическая значимость состоит в том, что предложенные в диссертации разработки могут быть использованы в повседневной работе компаний-операторов сотовой связи и позволят планировать и развивать сети оптимальным образом,

максимально эффективно используя частотный ресурс и оборудование сети, имея при этом минимум базовых станций (БС).

Внедрение результатов работы осуществлено в ОАО «Мобильные ТелеСистемы» и ЗАО «НИРИТ», что подтверждается соответствующими актами.

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, были апробированы на проектах синтеза одноуровневой сети GSM для г.Костромы и г.Заречный Пензенской области, синтеза иерархической структуры сети GSM для г.Заречный, интеграции отдельных БС в существующее окружение сети GSM г.Дмитрова Московской области и для создания проекта развертывания сети четвертого поколения McWiLL. Также были предложены варианты использования разработанного алгоритма для целей планирования и оптимизации подвижных сетей как в виде следящей системы, так и в виде инструмента для анализа. Данные предложения могут применяться непосредственно в компаниях-операторах сотовых сетей связи.

Публикации

Результаты исследования докладывались на российских и международных научно-практических конференциях и семинарах. Основные положения диссертации отражены в 12 научных статьях, опубликованных в 3 журналах и 9 брошюрах.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения, содержит 13 таблиц, 43 рисунка. Список литературы включает 50 наименований. Общий объем диссертации составляет 148 листов, основная часть изложена на 129 листах.

Положения, выносимые на защиту

1. Применение аппарата теории монотонных систем к задаче синтеза оптимальной сети радиодоступа большой размерности гарантирует полиномиальную сложность алгоритма поиска и позволяет получить результат за приемлемое время, измеряющееся максимум единицами дней.
2. Введенные на множестве БС в соответствии с ТМС функции значимости, определяющие удачность расположения БС в рамках рассматриваемой сети и соответствие емкости секторов БС приходящейся на них с учетом расположения

БС нагрузке, позволяют реализовать сходящийся алгоритм синтеза оптимальной сети радиодоступа.

3. Разработанный алгоритм позволяет решать задачу частотно-территориального планирования сотовых сетей радиосвязи от второго до четвертого поколения.
4. Разработанный алгоритм позволяет реализовать следящую систему для автоматизации процесса поиска решений по модернизации действующих сетей подвижной радиосвязи, работающую в интерактивном режиме квазиреального времени - времени, допустимого для реагирования на изменяющуюся на сети обстановку и определяемого внутренними регламентирующими документами компании-оператора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы работы, формулировку цели и основных задач исследования, описывает научную и практическую ценность работы, основные положения, выносимые на защиту, а так же структуру диссертации.

В **главе 1** проведен анализ проблем частотно-территориального планирования сетей подвижной радиосвязи, выявлены актуальные для компаний-операторов на сегодняшний день задачи:

- глобального пересмотра ЧТП существующих сетей 2G, продиктованные необходимостью высвобождения частотного спектра для нужд расширения сетей 3G и развертывания сетей 4G;
- планирования и развертывания сетей четвертого поколения.

Исследованы проблемы, возникающие в процессе эксплуатации и развития развернутых сетей, связанные с необходимостью удержания заданных показателей емкости и качества обслуживания при растущей нагрузке, а также технологические способы достижения этой цели на канальном, базовом и сетевом уровнях.

Приведен обзор существующего программного обеспечения, доступного на настоящий момент и используемого в компаниях-операторах для планирования и оптимизации своих сетей, а также методы использования этого ПО. Схематически показано, какое воздействие оказывают на сеть различные оптимизационные мероприятия и какие при этом требуются относительные трудозатраты.

При анализе традиционного процесса частотно-территориального планирования выявлен его основной недостаток, обусловленный последовательным

итерационным характером выполнения операций планирования топологии сети (азимуты, высоты подвеса и углы наклона антенн БС), емкости базовых станций, частотного плана для топологии сети при имеющейся емкости БС и состоящий в том, что каждая из этих операций требует значительного времени на проведение, что в случае с функционирующей сетью приводит к неоптимальной ее работе на протяжении продолжительного периода времени.

Исходя из этого, предложен способ совершенствования традиционного процесса в виде взаимоувязанной процедуры с одновременным учетом:

- доступного частотного ресурса;
- максимально допустимой емкости каждой из задействованных БС;
- мест и параметров возможной установки новых БС;
- текущего или прогнозируемого трафика на сети;
- особенностей распространения радиосигнала каждой из рассматриваемых БС;
- заданных критериев качества работы сети (уровень блокировок, покрытие с уровнем сигнала не ниже заданного, определенное соотношение «сигнал/интерференция»).

Основным ограничением при решении таким образом поставленной задачи с использованием существующих подходов является экспоненциальный рост сложности вычислительных алгоритмов, не позволяющий найти решение задачи за приемлемое время.

Вместе с тем, наиболее целесообразным интервалом наблюдения за сетью для принятия решения о необходимости проведения ее модернизации определен недельный интервал, из чего следует, что период поиска оптимальной конфигурации сети должен измеряться максимум единицами дней.

В главе 2 после определения значимых системных параметров:

- территории площадью S , на которой необходимо обеспечить сплошное радиопокрытие;
- карты трафика в виде матрицы $T_{m \times n}$;
- доступного частотного диапазона F ;
- требуемого качества предоставления услуг Q ,

формируется множество W_{BC} всех потенциальных мест установки базовых станций в виде координат $(x_0, y_0)_i$ и высот установки антенн h_i , множество W_K секторов всех БС из W_{BC} исходя из условия трехсекторной организации каждой БС:

$$W_K = (\{ \vec{K}_{ijk} \}: \vec{K}_{ijk} = \{ \langle x_0, y_0 \rangle_i, h_i, azmt_{ij}, ant_typ_{ij}, \beta_m^{ij}, \beta_e^{ij}, P_{TRX}^{ij}, L_f^{ij}, L_c^{ijk}, N_{TRX}^{ijk} \}), \quad (1)$$

где \vec{K}_{ijk} – вектор существенных с точки зрения формирования зон радиопокрытия технических характеристик k -ой конфигурации j -го сектора i -ой базовой станции, $k = 1 \dots 3, j = 1 \dots 3, i = 1 \dots |W_{BC}|$:

$azmt_{ij}$ – азимут антенны;

ant_typ_{ij} – тип антенны;

β_m^{ij} – угол механического наклона антенны j -го сектора i -ой базовой станции;

β_e^{ij} – угол электрического наклона антенны j -го сектора i -ой базовой станции;

P_{TRX}^{ij} – реальная мощность на выходе передатчика j -го сектора i -ой базовой станции;

L_f^{ij} – потери в фидере j -го сектора i -ой базовой станции;

L_c^{ij} – потери в комбайнере АФУ j -го сектора i -ой базовой станции;

N_{TRX}^{ij} – максимально допустимое количество передатчиков j -го сектора i -ой базовой станции,

причем потери в комбайнере АФУ в общем случае напрямую зависят от количества установленных в секторе приемопередатчиков:

$$L_c^{ij} = \begin{cases} 1.2 \text{ дБм при } N_{TRX}^{ij} = 1, 2 - \text{конфигурация 1;} \\ 3 \text{ дБм при } N_{TRX}^{ij} = 3, 4 - \text{конфигурация 2;} \\ 6 \text{ дБм при } N_{TRX}^{ij} = 5, 6, 7, 8 - \text{конфигурация 3.} \end{cases} \quad (2)$$

При таком описании L_c^{ij} у каждого сектора может быть три конфигурации с точки зрения L_c^{ij} и N_{TRX}^{ij} , т.е. $L_c^{ij} = f(N_{TRX}^{ij}) = L_c^{ijk}$, где k – номер соответствующей конфигурации.

Сетью радиодоступа в рамках построения называется любое подмножество множества W_K , обеспечивающее удовлетворение заданных системных параметров.

Оптимальной сетью радиодоступа называется сеть радиодоступа, описываемая множеством W^{opt} , которое удовлетворяет заданным системным параметрам и при этом содержит минимальное количество элементов.

Очевидно, что из множества W_K можно составить не один вариант сети радиодоступа в виде подмножества $W \subseteq W_K$. Кроме того, так как исходное множество W_{BC} является избыточным по числу БС, то W содержит меньшее количество элементов. Тогда критерий оптимальности можно записать в виде:

$$W^{opt} = \arg \min_{W \subseteq W_K} |W| \Big|_{F, S, Q, T_{max}} \quad (3)$$

Критерий (3) формализует задачу синтеза оптимальной сети радиодоступа. Сеть, построенная по критерию (3), обладает следующими существенными свойствами:

1. Множество базовых станций сети будет полностью безизбыточным.
2. Площадь зоны обслуживания S_{serv}^{ij} j-го сектора i-ой базовой станции, находящегося в окружении соседних секторов, будет максимально приближена к зоне покрытия S_{cov}^{ij} этого сектора.
3. Эффективность частотно-территориального плана с интерференционной точки зрения будет максимальной, если базовые станции будут располагаться преимущественно в местах концентрации трафика.

Таким образом, задача синтеза оптимальной сети радиодоступа представляет собой задачу выбора числа и мест размещения БС и сводится к перебору всех возможных вариантов. Такой подход имеет экспоненциальную сложность при большом количестве рассматриваемых БС и делает задачу не решаемой. Т.е., необходимо разработать алгоритм, позволяющий получить искомое подмножество W^{opt} из исходного множества W_K за приемлемое время. Применение теории монотонных систем гарантирует полиномиальную сложность алгоритма поиска оптимальной сети.

Для того, чтобы воспользоваться теорией монотонных систем, из рассматриваемых элементов необходимо сформировать монотонную систему и ввести уровни их значимости. Тогда множество W будет соответствовать **определимому множеству**, а искомое подмножество W^{opt} – **ядру** исходного множества W_K .

Связи между секторами характеризуются пересечением зон их радиопокрытия, **уровни значимости** определяются следующим образом: для любого элемента сети

$\alpha_l \in W_K$, где $l = 1 \dots |W_K|$, исходя из \vec{K}_l с использованием любой из известных специализированных программ, рассчитывается *площадь покрытия* S_{cov} . Рассмотрев α_l в окружении соседей, вычисляется *площадь обслуживания* S_{serv} элемента α_l .

Учитывая, что конфигурации одного сектора отличаются друг от друга дополнительными потерями в комбайнере L_c^{ijk} , то при совместном их рассмотрении все комбинации, кроме комбинации с минимальной емкостью, имеют нулевую площадь обслуживания S_{serv} .

Из конфигураций с ненулевой площадью обслуживания выделяется подмножество комбинаций, имеющих ненулевую уникальную площадь обслуживания S_{uniq} - территорию, на которой необходимый уровень сигнала обеспечивает только данный сектор, т.е. $W_K = H_{S_{serv}=0} \cup H_{S_{serv} \neq 0}$, $H_{S_{serv} \neq 0} = H_{S_{uniq}=0} \cup H_{S_{uniq} \neq 0}$.

Каждому $\alpha_l \in W_K$ ставится в соответствие значение *максимально допустимого трафика* $Traf_{maxl}$ и значение *текущего трафика* $Traf_{realb}$ приходящегося на элемент α_l , находящийся в окружении соседей и имеющий площадь обслуживания S_{servl} .

Одним из требований к оптимальной сети, состоящей из элементов множества W^{opt} , является требование, чтобы площадь ее обслуживания не была меньше площади обслуживания исходной избыточной сети, описываемой множеством W_K . Под площадью обслуживания сети понимается сумма площадей обслуживания каждого из входящих в нее элементов. Таким образом, разность между площадями обслуживания исходной и «промежуточной» сети - *необслуженная площадь* $UnservedArea$ - всегда должна оставаться равной нулю. Ситуация появления $UnservedArea > 0$ недопустима, т.к. нарушается принцип сплошного покрытия.

На основе описанных выше свойств формируются характеристики:

$$\pi_l = \begin{cases} 1, & \text{если } \alpha_l \in H_{S_{serv}=0}, \\ \frac{S_{covl} - S_{servl}}{S_{covl}}, & \text{если } S_{uniq} = 0, \\ 0, & \text{если } \alpha_l \in H_{S_{serv} \neq 0} \text{ и } S_{uniq} \neq 0. \end{cases} \quad (4)$$

$$\rho_l = \begin{cases} 0, & \text{если } UnservedArea = 0 \text{ и } Traf_{maxl} - Traf_{reall} > 0, \\ -1, & \text{если } UnservedArea = 0 \text{ и } Traf_{maxl} - Traf_{reall} \leq 0, \\ -1, & \text{если } UnservedArea > 0 \text{ или } \exists \alpha_{ijk} : Traf_{maxijk} - Traf_{realijk} \leq 0, k = 3. \end{cases} \quad (5)$$

Первая характеристика описывает удачность расположения данного элемента в рамках рассматриваемой сети, *вторая* – соответствие емкости данного элемента приходящейся на него с учетом его расположения нагрузке. Поскольку базовая станция не может иметь менее трех секторов, исключение по критерию расположения производится только на уровне базовой станции целиком. Поэтому и оценка должна производиться тоже на уровне базовой станции как совокупности трех ее секторов согласно формуле:

$$\lambda_i = \begin{cases} 0, \text{ если } \forall j, k \in [1, 3] \exists ! \pi_{ijk} = 0, \\ \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 \pi_{ijk}. \end{cases} \quad (6)$$

В общем случае, три из девяти конфигураций трех секторов одной базовой станции имеют значение π , отличное от единицы, шесть (с $S_{serv} = 0$) - значение, равное 1. Если у БС имеется хотя бы одна комбинация с $S_{uniq} > 0$, то значение λ этой БС по критерию расположения равно 0. Это свидетельствует о том, что данная БС имеет наибольшую значимость и ее удаление заведомо приведет к тому, что показатель *UnservedArea* станет больше 0. Наименьшую же значимость имеет БС с наибольшим λ , так как наибольшее λ свидетельствует о том, что конфигурации данной БС в совокупности имеют наибольший запас по площади обслуживания.

Значение ρ_l элемента α_l равно 0 только в случае, когда у него имеется запас по емкости по сравнению с приходящимся на него трафиком. Отрицательное значение ρ_l свидетельствует о том, что нагрузка превышает максимально допустимую емкость сектора, а значит – данная конфигурация имеет минимальную ценность.

Основной проблемой при рассмотрении сетей сотовой подвижной связи является проблема ограниченности имеющегося частотного ресурса, что приводит к ограничению емкости сети. Попытка увеличить емкости сети за счет увеличения количества приемопередатчиков приводит к появлению интерференции и снижению качества предоставляемых сетью услуг. По этой причине вводится еще один показатель - Φ , который характеризует достаточность частот для каждого элемента α_l из множества W_K в рамках частотно-территориального плана:

$$\Phi = \begin{cases} 0, \text{ если в рамках ЧТП частот для назначения достаточно,} \\ -1, \text{ если нет.} \end{cases} \quad (7)$$

Для удобства данный показатель рассматривается на уровне сети в целом. Количество частот, необходимых для каждого элемента α_l , определяется по количеству приемопередатчиков, требующихся для обслуживания $Traf_{real l}$.

При удалении произвольного α_l из множества W_K обслуживаемая им территория S_{servl} перераспределяется между оставшимися элементами множества $W_K \setminus \{\alpha_l\}$. При этом запас по площади обслуживания у элементов, разделивших между собой площадь обслуживания исключенного элемента, уменьшается, у остальных – никак не меняется. Аналогичное происходит и с нагрузкой: трафик, генерируемый на территории обслуживания исключенного элемента, перераспределяется вместе с территорией обслуживания, это приводит к увеличению нагрузки у элементов, разделивших между собой площадь обслуживания исключенного элемента, у остальных – никак не меняется. Таким образом, значения характеристик π , λ и ρ для элементов множества $W_K \setminus \{\alpha_l\}$ либо уменьшаются, либо остаются неизменными, что в полной мере соответствует **свойству монотонности**.

Конструктивно алгоритм синтеза оптимальной сети состоит из двух этапов:

- этап I: отыскание определимого множества W ;
- этап II: выделение из W искомого множества W^{opt} .

Процедура выделения определимого множества на **этапе I** из исходной совокупности W_K аналогична процедуре выделения ядер из [Муллат И. Э. Экстремальные подсистемы монотонных систем. Часть 1, 2// Автоматика и телемеханика. – 1976, №5, №8]. Здесь основная идея состоит в следующем: после построения исходного множества W_K для каждого элемента определяются веса π и ρ , а затем веса λ для каждой БС по весам π входящих в нее конфигураций. Наименее важные (т.е. с максимальным весом λ) БС удаляются как совокупности трех секторов. При этом удаление не должно приводить ни к появлению у оставшихся секторов $\rho < 0$ (что свидетельствует о превышении допустимой для них нагрузки), ни к $UnservedArea > 0$.

Важно отметить, что постановка задачи и предложенный алгоритм с точностью до обозначений совпадает с предложенным И. Э. Муллатом алгоритмом поиска ядра и, следовательно, гарантирует его наличие.

Для полученного на этапе I определимого множества W с точки зрения веса λ возможны два варианта:

1. В рамках множества не существует ни одной БС с весом $\lambda > 0$, т.е., каждая из БС имеет уникальную зону обслуживания. Исключение любой БС заведомо приведет к уменьшению площади обслуживания сети связи, что недопустимо.
2. В рамках множества существует одна или несколько БС с $\lambda > 0$. Только эти БС могут быть кандидатами на исключение, т.к. они не имеют уникальной зоны обслуживания. Таким образом, на этапе II задача сводится к последовательности попыток исключения БС, не имеющих уникальной зоны покрытия, чье удаление не приводило бы к нарушению емкостных ограничений.

Для решения задачи, описанной в п. 2, используется алгоритм, аналогичный применяемому на этапе I, с той разницей, что невозможность исключения очередной БС не приводит к остановке. В этом случае вес «проблемной» БС принудительно обнуляется и она более не влияет на процедуру поиска «наихудшего» элемента – кандидата на удаление. В итоге получается подмножество множества W , в котором веса λ всех БС равны нулю, что полностью соответствует пункту 1. Таким образом, определяется искомое множество W^{opt} .

Приведенная выше процедура завершает **этап II** алгоритма синтеза оптимальной сети радиодоступа.

Время синтеза оптимальной сети связи по разработанному алгоритму можно оценить формулой (8), построенной в соответствии с конструктивной процедурой.

$$T_{\text{АЛГ}} = \sum_{k=n}^m k \times 3 \times (t_{Sserv} + t_{Suniq}) + (k-1) \times 3 \times (t_{Sserv} + t_{Traf real}) + t_{\Phi} + \quad (8)$$

$$+ p[(m-1) \times 3 \times (t_{Sserv} + t_{Traf real}) + t_{\Phi}] + \sum_{k=m-1}^{p+1} [k \times 3 \times (t_{Sserv} + t_{Suniq}) + (k-1) \times 3 \times (t_{Sserv} + t_{Traf real}) + t_{\Phi}],$$

где: t_{Sserv} – время расчета площади обслуживания конфигурации сектора, с;

t_{Suniq} – время расчета уникальной площади обслуживания конфигурации сектора, с;

$t_{Traf real}$ – время расчета реальной нагрузки на конфигурацию сектора, с;

t_{Φ} – время расчета ЧТП сети, с;

n – потенциальное число мест установки БС;

m – число БС, вошедших в определяемое мн-во после завершения этапа I;

p – число БС, вошедших в оптимальную сеть радиодоступа.

Как следует из формулы (8), вычислительная сложность предложенного алгоритма является полиномиальной.

В главе 3 решена практическая задача синтеза оптимальной по критерию (3) одноуровневой однодиапазонной сети связи стандарта GSM для города Костромы. На основе анализа карты территории и застройки определено исходное множество площадок-кандидатов, составившее 30 позиций. Площади покрытия секторов S_{cov} этих БС и карта трафика рассчитаны в стандартизованном и должным образом откалиброванном ПО, используемом для таких нужд компаниями-операторами сетей сотовой связи.

В соответствии с предложенным алгоритмом на первом этапе за 15 шагов определено множество W , включающее 11 БС. При этом пересчету подвергались, согласно алгоритму, значения S_{serv} , S_{uniq} , $Traf_{real}$, $UnservedArea$, π , λ и ρ . Далее за 1 шаг из W выделено искомое оптимальное множество в 10 БС. Исходная «избыточная» и оптимальная сети показаны на рис. 1.

В таблице 1 приведено изменение весов π , λ , ρ , трафика $Traf_{real}$ и площади уникального обслуживания $UniqCovArea$ для тех БС, которые вошли в оптимальное множество, на рис. 2 – изменение весов БС в процессе поиска определяемого множества.

Время счета данного примера на ЭВМ с процессором Intel Core 2 Duo 2.00 GHz и объемом оперативной памяти 2 Гб в разработанном программном комплексе составило 35 минут.

Практическая применимость разработанного алгоритма подтверждена решением задач проектирования простой и иерархической сети стандарта GSM для г.Заречный Пензенской области, интеграции новой БС в существующее сетевое окружение в г.Дмитров Московской области, а также при проектировании сети McWiLL.

В главе 4 по результатам приведенных в главе 3 изысканий разработана модель следящей системы (рис. 3), которая имеет в своей основе алгоритм синтеза сети подвижной радиосвязи оптимальной топологии и позволяет использовать этот

алгоритм в автоматическом режиме для формирования рекомендаций по необходимым изменениям на сети в процессе изменения реальной нагрузки.



Рис. 1. Исходная и оптимальная сеть для г.Костромы

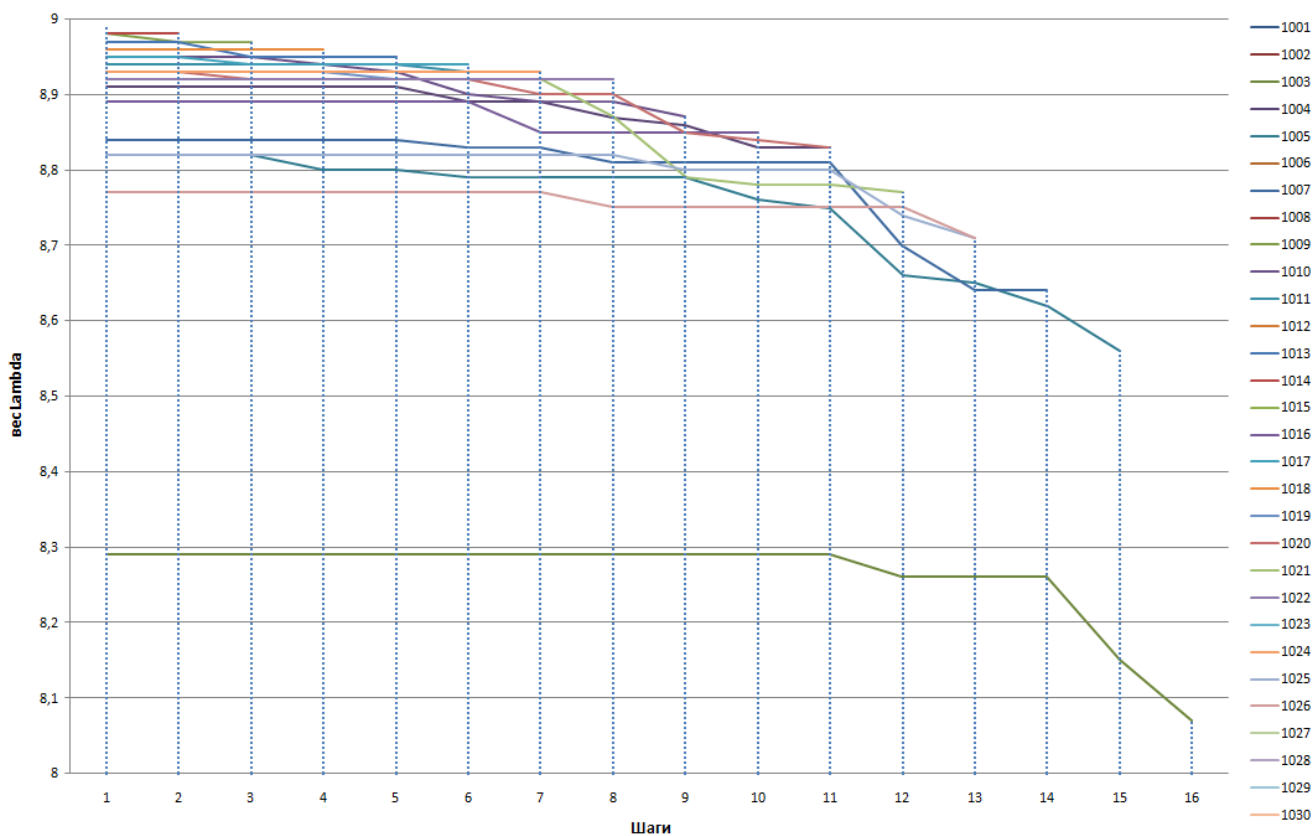


Рис. 2. Изменение весов БС в процессе построения определимого множества

Здесь объект управления – сеть мобильной сотовой связи как совокупность приемо-передающих базовых станций и транспортной системы до уровня контроллеров базовых станций. Задача такой системы – обслуживание заявок абонентов с заданным уровнем качества.

Таблица 1

| Site | Sector | Начальное мн-во | | | | | Определимое мн-во | | | | | Оптимальное мн-во | | | | |
|------|--------|------------------------------|------------|--------|-------|-----------|------------------------------|------------|--------|-------|-----------|------------------------------|------------|--------|-------|-----------|
| | | <i>ServedAreaATot = 1905</i> | | | | | <i>ServedAreaATot = 1905</i> | | | | | <i>ServedAreaATot = 1905</i> | | | | |
| | | Uniq Cov Area | Traff Real | ρ | π | λ | Uniq Cov Area | Traff Real | ρ | π | λ | Uniq Cov Area | Traff Real | ρ | π | λ |
| 1001 | 1 | 10 | 6,2 | 0 | 0 | 0 | 10 | 6,2 | 0 | 0 | 0 | 10 | 6,6 | 0 | 0 | 0 |
| 1001 | 2 | 15 | 5,7 | 0 | 0 | | 15 | 5,7 | 0 | 0 | | 18 | 7,65 | 0 | 0 | |
| 1001 | 3 | 29 | 7,9 | 0 | 0 | | 29 | 7,9 | 0 | 0 | | 29 | 7,9 | 0 | 0 | |
| 1002 | 4 | 22 | 6,9 | 0 | 0 | 0 | 22 | 6,9 | 0 | 0 | 0 | 22 | 6,9 | 0 | 0 | 0 |
| 1002 | 5 | 0 | 2,35 | 0 | 0,76 | | 0 | 2,35 | 0 | 0,76 | | 0 | 2,5 | 0 | 0,75 | |
| 1002 | 6 | 7 | 5,75 | 0 | 0 | | 7 | 5,75 | 0 | 0 | | 7 | 6 | 0 | 0 | |
| 1005 | 13 | 0 | 0,55 | 0 | 0,95 | 8,82 | 0 | 0,55 | 0 | 0,95 | 8,56 | 0 | 0,55 | 0 | 0,95 | 0 |
| 1005 | 14 | 0 | 0,1 | 0 | 0,99 | | 0 | 1,95 | 0 | 0,82 | | 0 | 1,95 | 0 | 0,82 | |
| 1005 | 15 | 0 | 1,3 | 0 | 0,88 | | 0 | 2,25 | 0 | 0,79 | | 6 | 5 | 0 | 0 | |
| 1008 | 22 | 6 | 3,55 | 0 | 0 | 0 | 6 | 3,6 | 0 | 0 | 0 | 6 | 3,6 | 0 | 0 | 0 |
| 1008 | 23 | 0 | 0,25 | 0 | 0,97 | | 0 | 0,65 | 0 | 0,92 | | 0 | 0,65 | 0 | 0,92 | |
| 1008 | 24 | 0 | 0,55 | 0 | 0,93 | | 0 | 0,6 | 0 | 0,92 | | 0 | 0,6 | 0 | 0,92 | |
| 1015 | 43 | 0 | 0,55 | 0 | 0,95 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0,81 | 0 | 0 | 2,65 | 0 | 0,74 | 0 |
| 1015 | 44 | 0 | 1,3 | 0 | 0,87 | | 0 | 1,45 | 0 | 0,85 | | 0 | 1,45 | 0 | 0,85 | |
| 1015 | 45 | 13 | 5,25 | 0 | 0 | | 13 | 5,35 | 0 | 0 | | 14 | 6,7 | 0 | 0 | |
| 1023 | 67 | 11 | 4,7 | 0 | 0 | 0 | 11 | 4,7 | 0 | 0 | 0 | 11 | 4,7 | 0 | 0 | 0 |
| 1023 | 68 | 0 | 1 | 0 | 0,89 | | 0 | 1,45 | 0 | 0,84 | | 0 | 1,45 | 0 | 0,84 | |
| 1023 | 69 | 0 | 0,45 | 0 | 0,95 | | 0 | 1,1 | 0 | 0,88 | | 0 | 1,1 | 0 | 0,88 | |
| 1027 | 79 | 0 | 0,85 | 0 | 0,86 | 0 | 0 | 1,1 | 0 | 0,82 | 0 | 0 | 1,1 | 0 | 0,82 | 0 |
| 1027 | 80 | 11 | 4,25 | 0 | 0 | | 11 | 4,25 | 0 | 0 | | 11 | 4,25 | 0 | 0 | |
| 1027 | 81 | 5 | 2,8 | 0 | 0 | | 5 | 2,8 | 0 | 0 | | 5 | 2,8 | 0 | 0 | |
| 1028 | 82 | 0 | 1,15 | 0 | 0,9 | 0 | 0 | 1,95 | 0 | 0,84 | 0 | 0 | 1,95 | 0 | 0,84 | 0 |
| 1028 | 83 | 9 | 3,5 | 0 | 0 | | 9 | 3,5 | 0 | 0 | | 9 | 3,5 | 0 | 0 | |
| 1028 | 84 | 0 | 0,25 | 0 | 0,98 | | 0 | 2 | 0 | 0,83 | | 0 | 2 | 0 | 0,83 | |
| 1029 | 85 | 0 | 0,3 | 0 | 0,96 | 0 | 0 | 0,3 | 0 | 0,96 | 0 | 0 | 0,3 | 0 | 0,96 | 0 |
| 1029 | 86 | 1 | 3,8 | 0 | 0 | | 1 | 3,95 | 0 | 0 | | 1 | 3,95 | 0 | 0 | |
| 1029 | 87 | 0 | 0,35 | 0 | 0,95 | | 0 | 1,25 | 0 | 0,83 | | 0 | 1,25 | 0 | 0,83 | |
| 1030 | 88 | 12 | 4,7 | 0 | 0 | 0 | 12 | 4,7 | 0 | 0 | 0 | 12 | 4,7 | 0 | 0 | 0 |
| 1030 | 89 | 14 | 5,15 | 0 | 0 | | 14 | 5,15 | 0 | 0 | | 14 | 5,15 | 0 | 0 | |
| 1030 | 90 | 0 | 1,8 | 0 | 0,76 | | 0 | 1,8 | 0 | 0,76 | | 0 | 1,8 | 0 | 0,76 | |

Цель управления – поддержание сети связи в состоянии, при котором уровень качества обслуживания заявок абонентов будет не ниже заданного при условии того, что развитие и модернизация сети производится в рамках установленного бюджета.

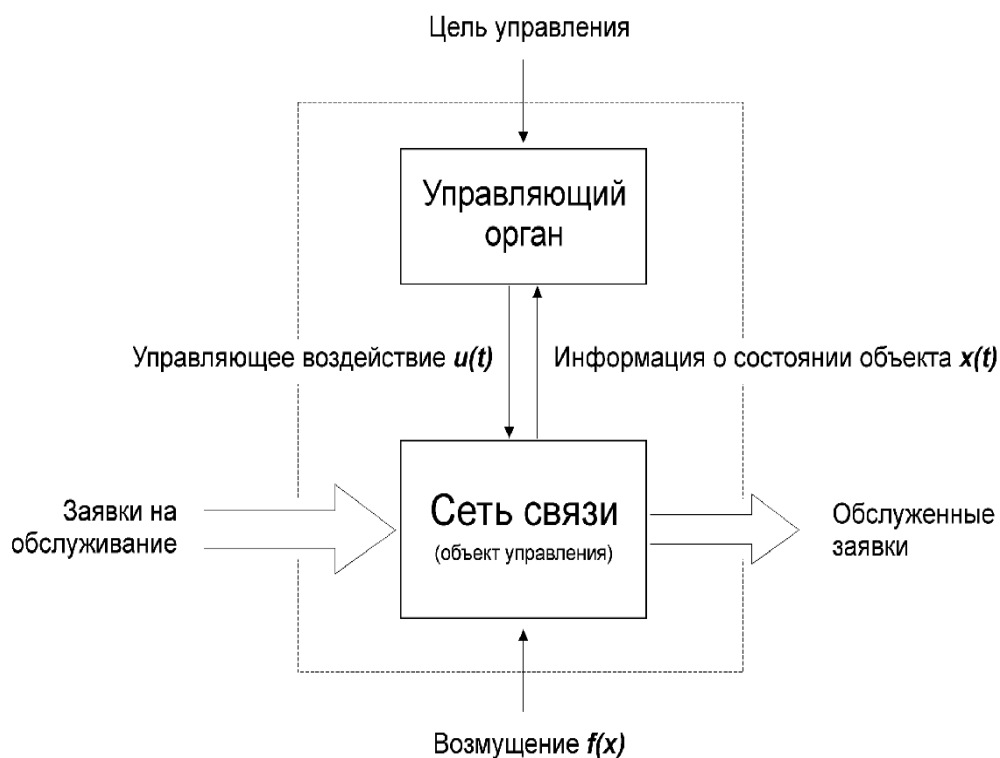


Рис. 3. Сеть связи как объект системы управления

Под возмущениями понимаются такие события как резкие флуктуации трафика, аварии на сети, задержки в поставке оборудования, затягивание сроков ввода в эксплуатацию объектов связи и т.д.

Функции управляющего органа реализуются в виде программного комплекса, который получает информацию о состоянии сети в виде статистических данных и показаний счетчиков процессов, происходящих в сети, сравнивает ключевые показатели качества работы сети с показателями качества, заданными в цели управления, и, в случае несоответствия, на основании имеющегося алгоритма синтезирует варианты управляющих воздействий. На основании этих вариантов лицо, ответственное за принятие решения по модернизации сети, принимает решение о тех или иных действиях.

Общая схема «непрерывного» процесса оптимизации сети приведена на рис. 4, а реализация этого процесса продемонстрирована на сети GSM г.Костромы.

В **приложении** описаны используемые на практике модели распространения радиосигнала, модели макро- и микросот, приведена процедура калибровки этих моделей, в конце показан эффект от калибровки.

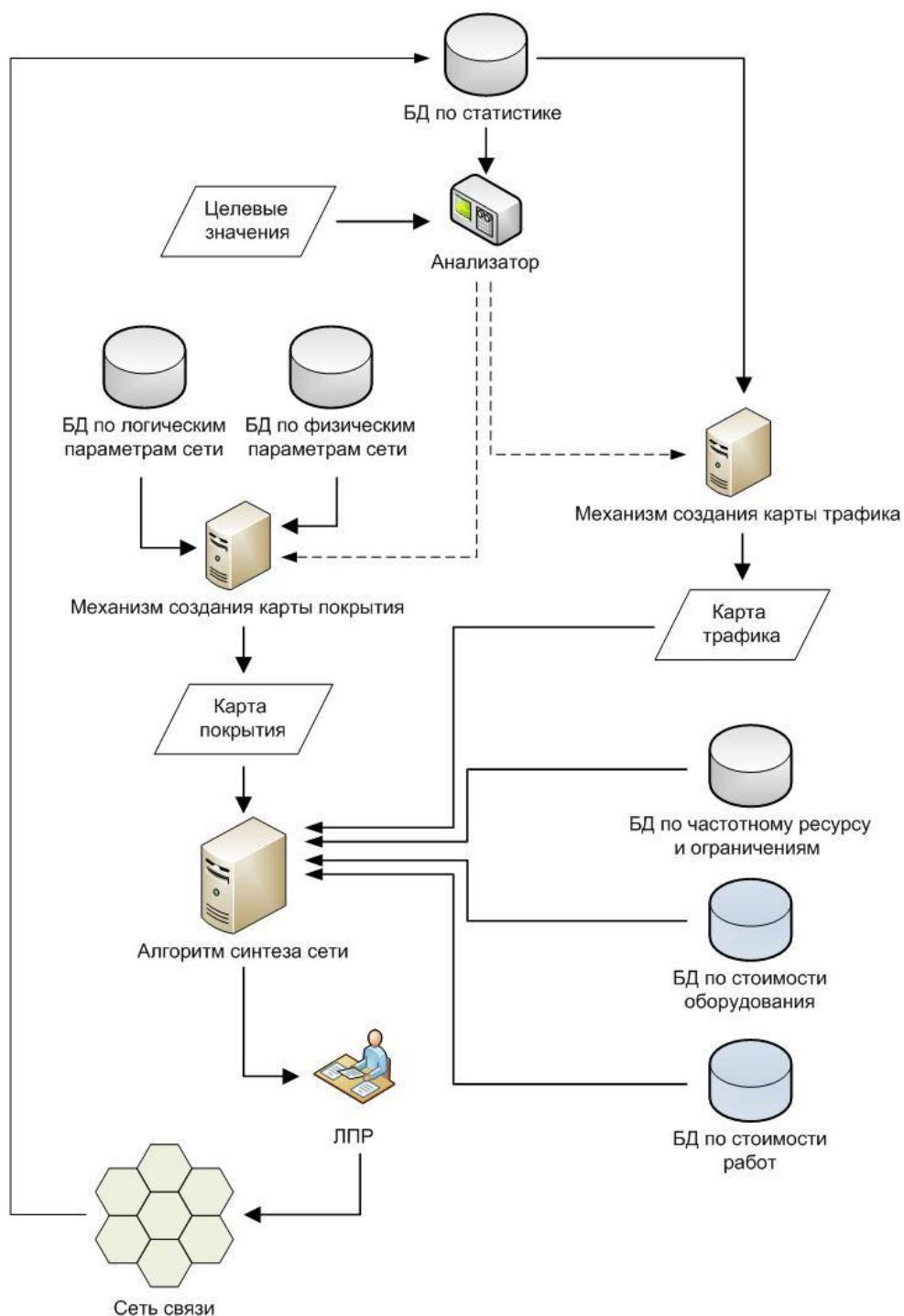


Рис. 4. Общая схема организации оптимизационного процесса
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

Все задачи, сформулированные в настоящей диссертационной работе, решены. Проведенные исследования позволили выявить проблемы, возникающие в процессе роста и развития современных сетей подвижной радиосвязи, проанализировать возможности современного программного обеспечения по проектированию и оптимизации, методы его использования. На основе изученного традиционного

подхода к планированию предложено усовершенствование, которое легло в основу разработанного алгоритма синтеза сети оптимальной топологии и конфигурации.

По результатам исследования был сформулирован и формализован критерий оптимальности сети подвижной радиосвязи, заключающийся в организации сети радиодоступа с минимальным количеством базовых станций, каждая из которых имеет по три сектора в конфигурации, позволяющей обслуживать трафик с заданным уровнем качества, одновременно учитывающей имеющийся у оператора сети частотный ресурс и обеспечивающей, соответственно, заданный уровень интерференции.

Для обеспечения возможности проведения тестирования разрабатываемого алгоритма были созданы модели трафика, расчета уровня сигнала сети и привязки трафика. На основе этих моделей было создано соответствующее программное обеспечение.

В соответствии с построенными моделями и сформулированным критерием оптимальности на основе теории монотонных систем был разработан алгоритм синтеза оптимальной сети и проведен анализ его рабочих характеристик, показавший его полиномиальную вычислительную сложность.

Для подтверждения работоспособности синтезированного алгоритма был детально рассмотрен процесс построения оптимальной сети радиодоступа стандарта GSM для г.Костромы. Результаты подтвердили эффективность созданного алгоритма.

В дополнение к этому было продемонстрировано применение алгоритма для решения задач проектирования простых и иерархических сетей, интеграции новых БС в существующее сетевое окружение. Кроме того, на примере сети McWiLL было показано, что предложенный алгоритм может использоваться для создания проектов сетей четвертого поколения.

По результатам использования алгоритма была предложена модель следящей системы, позволяющая проводить оптимизацию сети в автоматизированном режиме. Принцип работы следящей системы продемонстрирован на проекте сети для г. Костромы.

Таким образом, все задачи, поставленные в рамках диссертационной работы, были выполнены, цель построения алгоритма синтеза оптимальной сети подвижной радиосвязи с низкой вычислительной сложностью достигнута.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Токарь Р.С., Шорин О.А. Алгоритм синтеза сотовых систем связи 2G. // Спецтехника и связь. – 2008 г. – №1, с. 58-63.
2. Токарь Р.С. Алгоритм автоматизированного проектирования сотовых систем связи. // Вестник связи. – 2010 г. – № 11, с. 10-12.
3. Токарь Р.С., Шорин О.А. Алгоритм синтеза оптимальной сети беспроводного широкополосного доступа. // Электросвязь. – 2014 г. – № 1.

Прочие публикации:

4. Токарь Р.С., Бонч-Бруевич А.М. Управление процессом распределения радиочастотного ресурса базовой станции сети транкинговой связи. // Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы». / Под редакцией Шахгильдяна В.В. – М.: Инсвязьиздат, 2003. – С. 203, 204.
5. Токарь Р.С., Бонч-Бруевич А.М. Автоматизированная система развития сети сотовой связи. // Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы». / Под редакцией Шахгильдяна В.В. – М.: Инсвязьиздат, 2006. – С. 163, 164.
6. Токарь Р.С., Бонч-Бруевич А.М. Структурная оптимизация систем связи. // Тезисы докладов НТК профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава МТУСИ. – М.: МТУСИ, 2005. – С. 180, 181.
7. Токарь Р.С., Бонч-Бруевич А.М. Оценка эффективности работы сети связи. // Тезисы докладов НТК профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава МТУСИ. – М.: МТУСИ, 2006. – С. 199, 200.
8. Токарь Р.С., Шорин О.А. Алгоритм синтеза оптимальной радиосети системы сотовой связи. // Труды XXII конференции «Мобильный бизнес: тенденции развития и проблемы реализации систем мобильной связи в России и за рубежом». Греция, октябрь 2007, с. 21-27.
9. Токарь Р.С. Алгоритм оптимизации сети сотовой связи стандарта GSM. // Труды XXVI конференции «Мобильный бизнес: перспективы развития и проблемы реализации систем мобильной связи в России и за рубежом». Марокко, октябрь 2009, с. 92-100.
10. Токарь Р.С. Алгоритм оптимизации радиосети стандарта GSM на основе

теории монотонных систем. // Труды XXVII конференции «Мобильный бизнес: тенденции развития и проблемы реализации систем мобильной связи в России и за рубежом». Мексика, апрель 2010, с. 28-36.

11. Токарь Р.С., Шорин О.А. Синтез оптимальной сети мобильного радиодоступа McWill. // Труды XXXIV конференции «Перспективы развития и проблемы реализации систем мобильной связи в России и за рубежом», РАЕН, Испания, 2013, с. 6-15.
12. Токарь Р.С., Шорин О.А. Алгоритм синтеза оптимальной сети беспроводного широкополосного доступа // Международный форум информатизации (МФИ-2006). Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы». – М.: МТУСИ, 2013, с. 120.