

**ШОРИН Олег Александрович,
доктор технических наук, профессор
ТОКАРЬ Роман Сергеевич**

АЛГОРИТМ СИНТЕЗА СОТОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ 2G

В настоящее время, несмотря на стремительное развертывание в России сетей связи третьего поколения, по количеству обслуживаемых абонентов наиболее распространенными пока остаются сети 2G. Количество базовых станций в сетях 2G, обеспечивающих услуги связи в городах, измеряется сотнями и тысячами.

Учитывая особенности функционирования сетей второго поколения, например стандарта GSM, можно утверждать, что эффективность работы сети напрямую зависит от эффективности ее частотно-территориального плана.

Однако современные методы оптимизации сетей 2G представляют собой итерационную последовательную

процедуру оптимизации ее различных составляющих:

- ♦ топологии действующей сети (азимуты, высоты подвеса и углы наклона антенн функционирующих базовых станций (БС));
- ♦ емкости действующих БС;
- ♦ частотного плана для текущей топологии сети при имеющейся емкости действующих БС).

Поскольку система постоянно развивается, то оптимизированная по перечисленным выше компонентам сеть через некоторое время перестает справляться с текущим объемом трафика по причине нехватки частотного ресурса (выражается в повышении уровня внутрисистемной интерферен-

ции и, как следствие, в снижении качества предоставления услуг связи) или из-за невозможности дальнейшего увеличения емкости существующих БС (аппаратные ограничения используемого оборудования БС).

Решение этой задачи в добавлении в уже существующую сеть новых БС. Это, в свою очередь, требует пересмотра частотно-территориального плана, то есть выполнения очередной итерации процедуры оптимизации сети.

Ввиду последовательного характера выполнения операций, каждая из которых требует значительного времени на внедрение, получаем далеко не оптимальную работу сети на протяжении рассматриваемого периода.



Рис. 1. Карта г. Костромы

Решением проблемы может быть совместная взаимоувязанная оптимизация частотно-территориального плана с одновременным учетом:

- ♦ количества доступных частот;
- ♦ максимально допустимой емкости каждой из действующих БС;
- ♦ мест возможной установки 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 на разговорных каналах, покрытие с уровнем сигнала не ниже заданного, определенное C/I).

Основным ограничением при решении задачи, поставленной таким образом, является экспоненциальный рост сложности вычислительных алгоритмов.

На основе теории монотонных систем [1] и подходов [2] был разработан алгоритм, позволяющий свести вычислительную сложность к полиномиальной, что, в свою очередь, позволяет решать поставленную задачу практически в режиме реального времени.

Цель данной статьи – описание алгоритма синтеза сотовой системы связи стандарта GSM на примере гипотетической сети GSM900 в г. Костроме (рис. 1).

Алгоритм синтеза сети оптимальной топологии и емкости

Пусть имеется территория S_0 , обслуживаемая системой сотовой связи и частотный ресурс F_0 , доступный оператору сети связи. Предположим, что известна модель нагрузки в сети и ее можно представить в виде матрицы $T_{m \times n}$, каждый элемент которой отражает абонентскую нагрузку на элементарном участке обслуживаемой территории. Так же будем считать, что определено множество W_0 потенциальных мест установки БС – географические координаты (x, y) и высота размещения антенн h . Под БС далее будем понимать совокупность трех секторов, установленных в одной географической точке.

Таким образом, из множества W_0 базовых станций получим множество W_0' секторов, для каждого из которых необходимо задать набор существенных технологических параметров. К существенным технологическим параметрам отнесем параметры, влияющие на физическую зону покрытия сектора:

- b – угол наклона антенн;
- P_{cu} – мощность передатчика;
- $g(n_{TRX})$ – потери в комбайнере (при добавлении 3-го и 5-го передатчиков требуется применение соответствующего комбайнера);
- $n_{TRX} = 2, 4, 6$;
- $q(h)$ – потери в фидере.

В итоге из множества W_0' получим новое множество W , содержащее все рассматриваемые сектора с тремя вариантами емкости в виде Сектор $_i$ _КлассЕмкости $_j$ ($i = 1...3 \times N$, где N – количество потенциальных мест установки БС; $j = 1, 2, 3$).

Для каждого класса емкости определим максимально допустимую нагрузку $MaxTraff$ по формуле Эрланг В для уровня блокировок 2%. Необслуженным трафиком $LostTraff$ будем считать трафик, превышающий значение $MaxTraff$ для рассматриваемого сектора с определенным классом емкости.

Радиосетью будем называть любое подмножество H элементов Сектор $_i$ _КлассЕмкости $_j$ из множества W , которое обеспечивает обслуживание заданного трафика с требуемым качеством. При этом сектору i радиосети может соответствовать только один элемент Сектор $_i$ _КлассЕмкости $_j$ из множества W .

Оптимальной радиосетью будем называть радиосеть, состоящую из множества H^{opt} секторов необходимого класса емкости, имеющего минимальную мощность и обеспечивающего отсутствие необслуженного трафика на рассматриваемой территории.

Тогда критерий оптимальности можно сформулировать так:

$$\begin{cases} |H^{opt}| = \min |H| \\ QoS \leq 2\% \end{cases} \Big|_{S_0, T_{m \times n}}$$

При этом оптимальная радиосеть будет обладать следующими свойствами:

1. Площадь обслуживания любого сектора S_{serv} (в окружении секторов соседних БС) будет максимально приближена к площади покрытия этого сектора S_{cov} для данной конфигурации и класса емкости.
2. Трафик для любого сектора в зоне обслуживания с площадью S_{serv} не будет превышать максимально допустимую нагрузку $MaxTraff$ для этого сектора с текущим классом емкости.
3. Оптимальная радиосеть будет безызыточной в том смысле, что удаление любого имеющегося сектора будет приводить либо к нарушению условия сплошного радиопокрытия, либо к появлению необслуженного трафика (максимальная емкость секторов определяется объемом имеющегося частотного ресурса F_0).

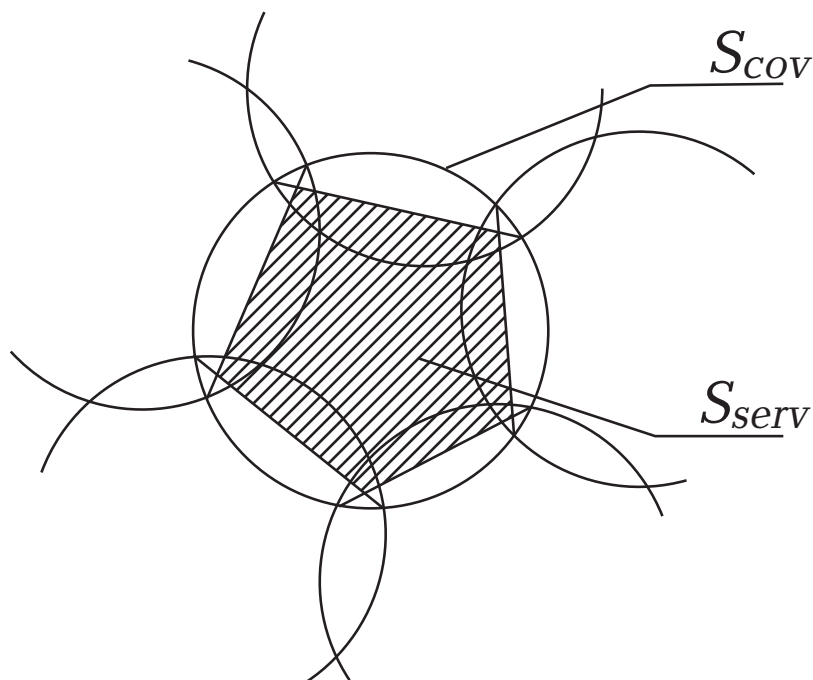


Рис. 2. Площадь обслуживания и площадь покрытия для сектора в окружении соседей

В рамках теории монотонных систем искомая оптимальная радиосеть будет представлять собой ядро исходного множества W или набор наиболее связанных друг с другом элементов. При этом элементами являются сектора базовых станций, связанные друг с другом через площадь покрытия и трафик.

Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо построить алгоритм формирования ядра исходного множества W .

Использование аппарата теории монотонных систем требует определения весовых функций секторов базовых станций и задания положительных и отрицательных действий на множестве W .

Для определения уровня значимости элемента $a_i \in W$ введем две весовые функции (далее *вес по площади* и *вес по трафику*).

В качестве веса по площади используем предложенный в [2] относительный запас по потенциальной площади обслуживания:

$$\pi_i = (S_{cov\ i} - S_{serv\ i}) / S_{cov\ i}$$

где $S_{cov\ i}$ — потенциальная площадь обслуживания i -ого элемента;

$S_{serv\ i}$ — площадь обслуживания i -ого элемента в окружении соседних.

Потенциальная площадь обслуживания определяется технологическими параметрами и классом емкости сек-

тора. Площадь обслуживания определяется условиями приоритетности доступа в сеть, то есть более высоким уровнем сигнала относительно соседних секторов (рис. 2).

Как видно из рис. 2, наибольшей значимостью обладают сектора, у которых S_{serv} близка к S_{cov} . Такие сектора будут иметь наименьшие веса по площади.

Введенный таким образом вес сектора по площади π является безразмерной величиной и, как видно из формулы, лежит в диапазоне $[0, 1]$.

Нулевое значение веса π соответствует предельной ситуации, когда S_{serv} совпадает с S_{cov} , то есть рассматриваемый сектор расположен изолированно и вокруг нет соседних БС. Такая ситуация не допустима, так как нарушается условие обеспечения сплошного покрытия.

Значение веса π , равное единице, соответствует другой предельной ситуации, когда $S_{serv} = 0$. В этой ситуации сектор считается наименее значимым и может быть удален без нарушения условия обеспечения сплошного покрытия.

В ситуациях, когда S_{serv} близка к S_{cov} , то есть базовые станции расположены на расстояниях, приближающихся к максимальным, удаление какого-либо элемента сети может привести к появлению участка сети без покрытия.

Вес сектора по трафику будем опре-

делять по следующей формуле:

$$\rho_i = (MaxTraffi_i - RealTraffi_i) / MaxTraffi_i,$$

где $MaxTraffi_i$ — максимально допустимый трафик для сектора в соответствии с его классом емкости, определенный по формуле Эрланг В при уровне блокировок 2%;

$RealTraffi_i$ — текущий трафик в секторе, находящемся в окружении соседних БС и имеющем площадь обслуживания S_{serv} . Введенный таким образом вес сектора по трафику ρ тоже является безразмерной величиной и лежит в диапазоне $[-\infty, 1]$.

Вес сектора по трафику будет равен 1 только в случае, когда его $S_{serv} = 0$. Это означает, что данный сектор не несет никакой полезной нагрузки и его значимость в этом смысле минимальна.

Наилучшим весом по трафику с точки зрения полезности сектора будем считать вес $\rho = 0$. В этом случае можно говорить о полной утилизации ресурсов сектора в рамках его класса емкости при заданном критерии качества.

Случай, когда вес сектора окажется меньше нуля, будет свидетельствовать о том, что реальный трафик превышает максимально допустимый для данного сектора при текущем классе емкости. Такая ситуация крайне нежелательна и, если она возникла в результате удаления какого-либо соседнего сектора или БС, служит сигналом о том, что удаление невозможно по причине возникновения необслуженного трафика в сети.

После описания весовых функций определим необходимые согласно теории монотонных систем понятия положительных и отрицательных действий над элементами исходного множества W .

Под положительным действием, или действием типа «+», будем понимать операцию добавления сектора или базовой станции в рассматриваемую систему. Под отрицательным действием, или действием типа «-», будем понимать операцию исключения сектора или базовой станции из рассматриваемой системы.

При этом, согласно теории монотонных систем, при удалении из системы какого-либо элемента, то есть после отрицательного действия, зона его



Рис. 3. Потенциальные места установки БС в г. Костроме

обслуживания и вся нагрузка должны перераспределиться между соседними элементами, а веса всех оставшихся элементов должны уменьшиться, причем как по площади, так и по трафику.

Основная идея предлагаемого алгоритма оптимизации состоит в следующем: после построения исходного множества W , которое представляет собой набор элементов $Сектор_i_КлассЕмкости_j$, для каждого элемента определим веса π и ρ . Множество W при этом имеет такую особенность, что любой сектор представлен в нем тремя вариантами, различающимися только классом емкости. Чем выше у сектора класс емкости, тем меньше зона обслуживания.

При совместном рассмотрении всех вариантов всех секторов веса, отличных от единицы, будут иметь только варианты секторов с наименьшим классом емкости (т.к. уровень сигнала у них больше уровней сигнала остальных «своих» вариантов с большими классами емкости). У всех остальных вариантов S_{serv} будет равно 0, и, следовательно, веса будут равны единице.

При исключении элементов множества W по критерию площади удалению подлежат либо сектора, у которых все варианты имеют вес $\pi = 1$, либо вес варианта с наименьшим классом емкости является наибольшим из всех во множестве W , но при этом отличным от нуля.

Удаление элемента может состояться только с условием сохранения сплошного покрытия в сети. Если оно нарушается, то рассматриваемый элемент возвращается обратно, фиксируется и в дальнейшем не может быть удален ни по какому из критериев.

При исключении элементов множества W по критерию трафика удалению подлежат только варианты секторов с весом $\rho < 0$. Варианты секторов с $\rho \in (0; 1]$ не удаляются по критерию трафика.

Если при исключении варианта сектора нарушается условие сплошного радиопокрытия, то удаленный вариант возвращается на место, фиксируется и в дальнейшем не может быть удален.

Подготовка исходных данных

Для начала необходимо составить исходное множество W_0 , представляющее собой совокупность мест расположения действующих БС (если таковые

Таблица 1.

Количество приемопередатчиков	Макс. трафик для 2% блокировок, Эрл
$0 < x < 3$	9,0
$2 < x < 5$	24,6
$4 < x < 9$	59,1

Таблица 2

Количество приемопередатчиков	Потери в комбайнере, дБм
$0 < x < 3$	1,2
$2 < x < 5$	3
$4 < x < 9$	6

имеются), а также возможных мест установки БС. Это возможно сделать при наличии любой геоинформационной системы с цифровой картой местности и параметрами застройки.

Для действующих БС предусмотрен специальный флаг, запрещающий исключение из рассмотрения этих БС в процессе оптимизации. Это значит, что для них возможна оптимизация только таких параметров, как количество приемопередатчиков, высота размещения антенн, мощность излучения и т.д.

В рассматриваемом примере было выбрано 30 мест установки БС (рис. 3). При этом все БС были помечены как «потенциальные», то есть в процессе оптимизации разрешалось исключение любой БС.

Для каждой БС необходимо описать ее сектора (предполагаем, что все БС — трехсекторные) с помощью следующих параметров:

- ♦ азимут (для всех БС азимуты секторов были определены как 0, 120 и 240°);
- ♦ тип антенн (был выбран один тип антенн для всех БС);
- ♦ высота размещения антенн или диапазон изменения (для всех секторов каждой из БС в качестве высоты подвеса указывалась высота здания, на котором эта БС размещалась);
- ♦ угол наклона антенн или диапазон изменения (физический угол наклона 2°, электрический тоже 2°);
- ♦ мощность приемопередатчиков (для всех приемопередатчиков 48 дБм) и т.д.

Необходимо отметить, что набор и детализация перечисленных параметров влияют на степень точности расчетов зон покрытия, но никак не на работу алгоритма!

Таким образом, мы получаем множество секторов W_0 с набором существенных технологических параметров.

Далее для каждой конфигурации сектора в смысле количества устанавливаемых приемопередатчиков задаются:

- ♦ максимальный объем обслуживаемого трафика (табл. 1) исходя из допустимого уровня блокировок и доли трафика half-rate;
- ♦ дополнительные потери при комбайнировании (2:2, 4:2 и т.д.), так как это сказывается на площади обслуживания сектора при фиксированных параметрах антенно-фидерного тракта (табл. 2).

В итоге из множества W_0' получим новое множество W , содержащее все рассматриваемые сектора с тремя вариантами емкости.

С точки зрения сети необходимо определить уровень доступа — минимальный уровень сигнала, при котором мобильная станция будет «видеть» сеть. В примере уровень доступа был определен как -104 дБм.

Модель трафика T_{mkl} также может быть определена с помощью геоинформационной системы (ГИС), снабженной соответствующим слоем/модулем. В качестве примера использовалась модель равномерного распределения нагрузки по территории со значениями 0,26 и 0,05 Эрл/км².

На этом этап подготовки данных считается завершенным.

Синтез оптимальной сети согласно предлагаемому алгоритму

По подготовленным исходным данным с помощью программы расчета зон радиопокрытия для каждого сектора рассматриваемой в проекте БС в зависимости от конфигурации производится расчет зон покрытия. Данные по уровню сигнала для всех рассматриваемых элементов множества W в рамках территории обслуживания помещаются в специальную базу данных.

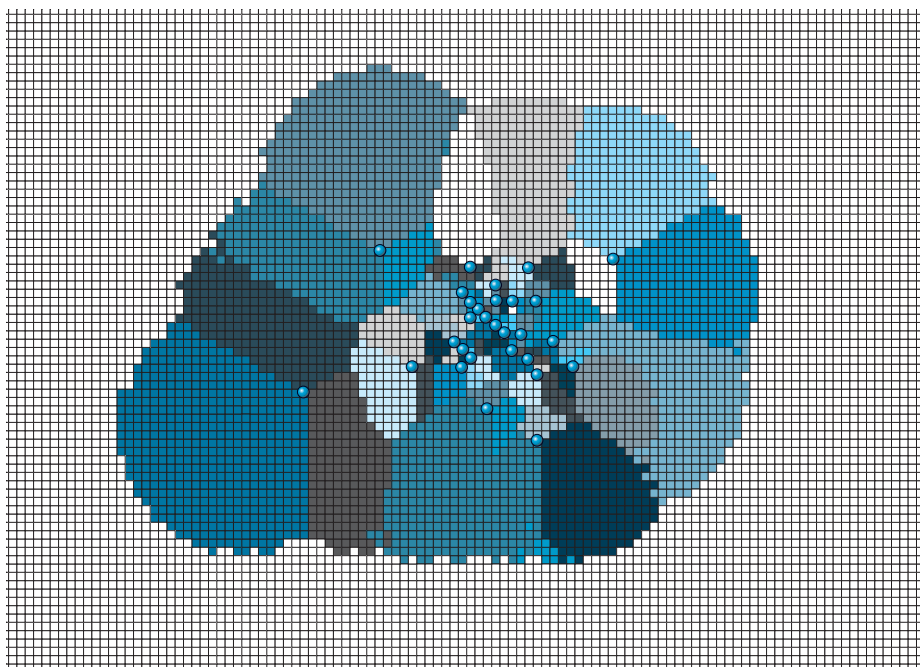


Рис. 4. Исходная сеть (пример 1)

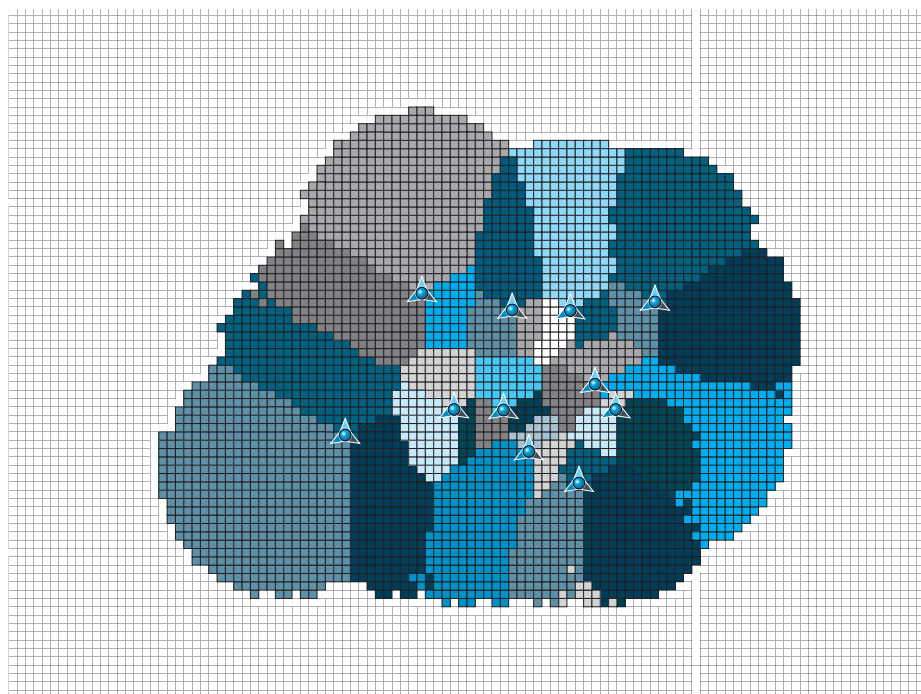


Рис. 5. Оптимизированная сеть (пример 1)

На основании этой информации производится расчет зон обслуживания (территории, где рассматриваемый сетевой элемент обеспечивает наибольший из всех уровень сигнала), после чего определяется объем трафика, обслуживаемого каждым сетевым элементом.

Если предположить, что на начальном этапе оптимизации сеть, полученная из элементов множества W , настолько избыточна, что в ней отсут-

ствует необслуженный трафик, то дальнейшая оптимизация может вестись по следующему сценарию.

1. Для всех сайтов как совокупности трех секторов рассчитать веса π .
2. Исключить наихудший сайт на основе анализа весов π (сайт не должен иметь свойство «не может быть удален»). При этом площадь и трафик, обслуживаемые этим сайтом, перераспределяются между соседними элементами сети.
3. Если после этого в сети не появятся ни необслуженный трафик ни необслуженная территория (под необслуженной территорией следует понимать места, где уровень сигнала меньше определенного значения), то можно утверждать что оставшиеся элементы сети обеспечивают сплошное покрытие рассматриваемой территории и способны обслужить весь трафик с заданным уровнем качества, а тогда можно перейти к п. 1.

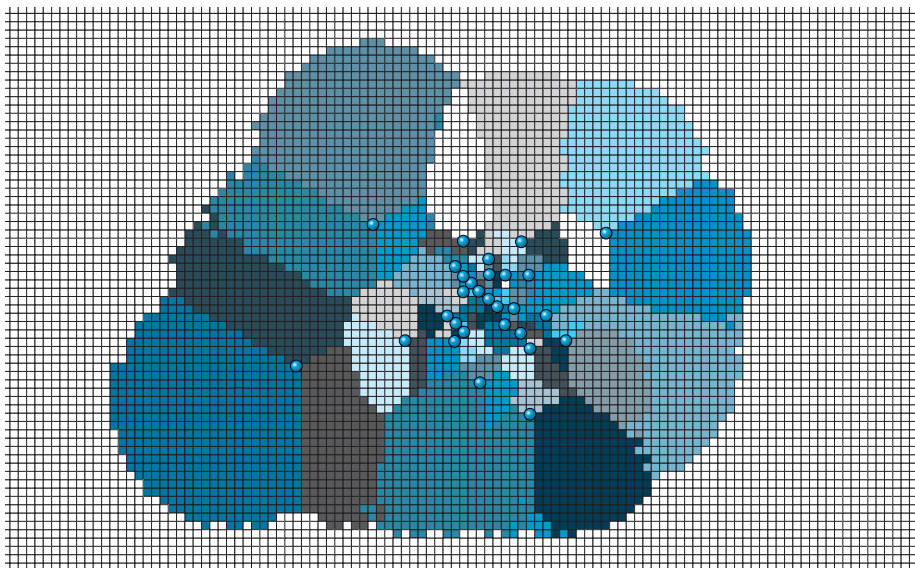


Рис. 6. Исходная сеть (пример 2)

4. Если в сети появится необслуженная территория, следовательно удаленный сайт нужно вернуть на место и зафиксировать как уникальный для части рассматриваемой территории, а значит, более не подлежащий удалению. После этого перейти к п. 1.
5. Если в сети появится необслуженный трафик, необходимо на основе критерия по трафику, рассчитав веса q , попытаться утилизировать необслуживаемый трафик, удаляя наихудшие по q элементы. Если это не удастся (не хватит емкости или возникнет необслуживаемая территория), необходимо поступить, как в п. 4. В противном случае — сразу перейти к п. 1.
6. Повторять пп. 1 – 5 до тех пор, пока во множестве W не останутся только «зафиксированные» элементы. Это будет свидетельствовать об окончании процесса оптимизации.

В итоге мы получим сеть, состоящую из максимально связанных элементов, то есть удаление любого из них будет приводить или к возникновению необслуженной территории, или к появлению необслуживаемого трафика, который никак нельзя утилизировать. Это и будет являться оптимизированной сетью с точки зрения заданных критериев.

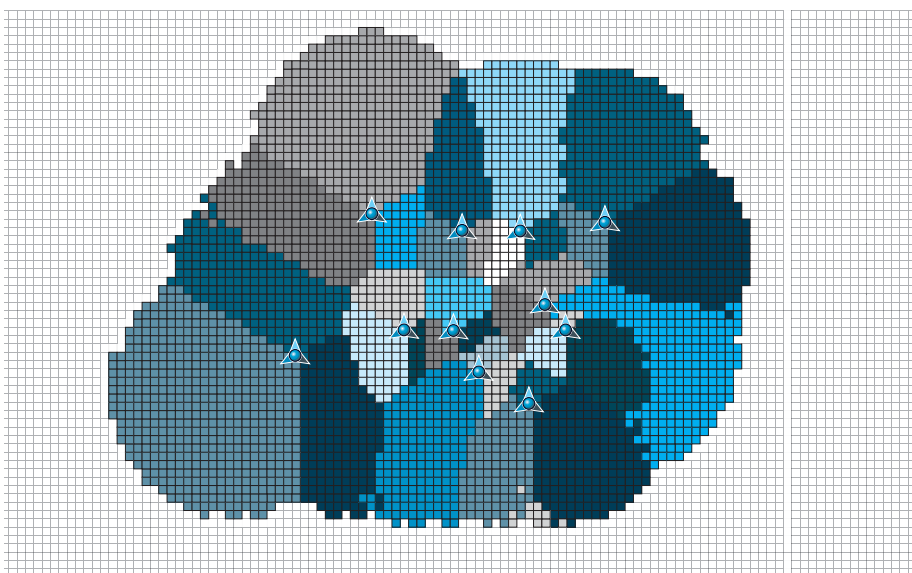


Рис. 7. Оптимизированная сеть (пример 2)

Результаты оптимизации

Пример 1

Территория 10800 км² (120x90 км); трафик 0,05 Эрл/км²; необслуженная территория 7255 км²; необслуженный трафик: 41,5 Эрл. Исходная сеть (рис. 4): количество сайтов 30. Оптимизированная сеть (рис. 5): количество сайтов 11.

Пример 2

Территория 10800 км² (120x90 км); трафик 0,26 Эрл/км²; необслуженная территория 7255 км². Исходная сеть (рис. 6): количество сайтов 30; необслуженный трафик 704 Эрл. Оптимизированная сеть (рис. 7): количество сайтов 13; необслуженный трафик 672,36 Эрл.

ВЫВОДЫ

Предлагаемый алгоритм позволяет синтезировать сеть сотовой связи достаточно больших размеров, с учетом всех необходимых параметров, имеющую оптимальную топологию и емкость без организации прямого перебора возможных вариантов конфигурации сети и в режиме «реального» времени. Получаемый результат не зависит от опыта и квалификации проектировщика, исключает влияние субъективных мнений.

Дополнительное преимущество заключается в том, что быстрота проведения процедуры оптимизации позволяет делать ее столь угодно часто, благодаря чему можно перейти от одноразовых периодических оптимизаций к процессу постоянной адаптации сети под изменяющуюся нагрузку.

Литература

1. Мулат И.Э. Экстремальные подсистемы монотонных систем. Часть 1, 2/ Автоматика и телемеханика, 1976, №№ 5, 8.
2. Гуляев А.В., Шорин О.А. Синтез оптимальной сети радиодоступа WCDMA при известной модели нагрузки/ Электросвязь, 2002, № 9.