

УДК 004.71; 621.39

**СТРУКТУРА СОТОВЫХ МОБИЛЬНЫХ СЕТЕЙ И ЗАДАЧИ ИХ ОПТИМИЗАЦИИ****А.З.МЕЛИКОВ\*, Н.И.АЛИШОВ\*\*, С.Г.ОРУДЖЕВА\*\*\*****\* Институт Кибернетики НАН Азербайджана, *agassi@science.az*****\*\* Институт Кибернетики им. В.М.Глушкова****НАН Украины, *anio\_n@mail.ru*.****\*\*\* Бакинский Государственный Университет, *orujeva@gmail.com***

*В данной работе рассматриваются принципы построения сотовых сетей, и обобщаются методы оптимизации и расчета критичных параметров сотовых сетей. Предложенные уравнения для расчета характеристик сети позволяют сравнить разные системы и выбрать оптимальную. Рассматриваются новые методы оптимизации.*

**Ключевые слова:** сотовые сети, эффективность системы, использование полосы частот, расчет характеристик сети.

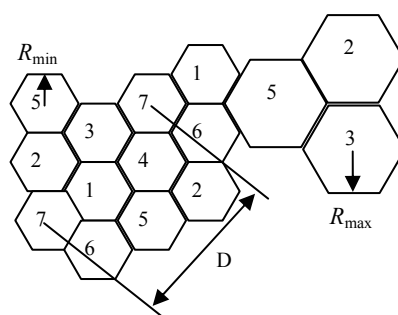
В настоящее время быстро развиваются системы беспроводного доступа. В связи с ограничением частотного ресурса, разработка новых систем беспроводного доступа приводит к острой потребности в частотном ресурсе и, как следствие, усложнению процедуры выделения частот [1]. Вне зависимости от технологии беспроводная связь характеризуется рядом особенностей, которые определяются спецификой распространения радиоволн. Последние, в частности, затухают при удалении от источника — базовой станции (это приводит к уменьшению соотношения сигнал/шум, при котором устойчивая связь невозможна), ослабляются предметами на пути их распространения и накладываются друг на друга при переотражениях от различных объектов (интерференция) и т.п. Все это приводит к снижению качества связи, а подчас делает коммуникации невозможными. Многие перечисленные выше проблемы беспроводной связи могут быть предотвращены еще на этапе проектирования сети. Например, в случае 802.11 требуется грамотный расчет необходимого числа базовых станций и их размещения для непрерывного покрытия предполагаемой зоны доступа с минимальными пересечениями зон покрытия и обеспечения требуемой производительности минимизируя расходы на оборудование. В виду ограниченности естественных ресурсов, актуаль-

ным является расчет оптимальных и ожидаемых параметров сети еще до ввода в эксплуатацию. Точный расчет характеристик сети при разных вариантах организации, может существенно повысить ее емкость и качество покрытия.

**Принципы построения сетей.** Сети сотовой связи получили свое название в соответствии с территориальным принципом распределения рабочих зон (сот) [2]. При этом допускается, что соты могут пересекаться и накладываться друг на друга, для обеспечения непрерывного покрытия. Границы сот условны и определяются допустимым отношением сигнал/шум для радиосигнала, поступающего от антенны базовой станции к мобильному телефону и наоборот. Чтобы избежать перекрестных помех между сотами их объединяют в кластеры – группы сот в зоне обслуживания с различными наборами частот. Основным недостатком сотовых сетей является повышенная сложность систем из-за сложного планирования сети и распределения частотного ресурса, а так же проблемы обслуживания абонента при его переходе из соты в соту – эстафетной передачи (handover, handoff). Достоинством является большая пропускная способность сети (по сравнению с сетями без повторного использования частот) за счет возможности повторного использования одних и тех же частот в различных сотах.

*Разделение на соты.* Разделить обслуживаемую территорию на соты можно основываясь на измерениях статистических характеристик распространения сигналов в системах связи или расчете параметров распространения сигнала для конкретного района [3]. В первом случае всю обслуживаемую территорию делят на одинаковые по форме соты, а затем с помощью закона статистической радиофизики определяют их размеры и расстояния до других зон, в пределах которых выполняются условия допустимого взаимного влияния. Как и при любом теоретическом расчете, не учитывающем особенностей рельефа, мы получим завышенные расстояния для обеспечения допустимого уровня взаимных помех. Более приемлем второй вариант разделения на зоны обслуживания. В этом случае тщательно измеряют или рассчитывают параметры системы для определения минимального количества базовых станций, обеспечивающих удовлетворительное обслуживание абонентов на всей территории, определяют оптимальное место расположения базовой станции с учетом рельефа местности, возможность использования направленных антенн, пассивных ретрансляторов и смежных станций в момент пиковой нагрузки и т. д. Для оптимального (т. е. без перекрытия или пропусков участков) разделения территории на соты могут быть использованы такие фигуры как треугольник, квадрат и шестиугольник. Наиболее подходящей фигурой является шестиугольник, так он идеально вписывается в соту с антенной круговой направленности.

*Повторное использование частот.* Основной идеей, на которой базируется принцип сотовой связи, является повторное использование частот в несмежных сотах [4]. Каждая из сот обслуживается своим передатчиком с невысокой мощностью и определенным набором доступных частот. Это позволяет без помех использовать повторно частоты каналов этого передатчика в другой, удаленной на определенное расстояние, соте. Пример построения сот при использовании семи частот представлен на рис.1. Как было сказано, группа сот с различными наборами частот называется кластером. Определяющим его параметром является количество используемых в соседних сотах наборов частот. Базовые станции, на которых допускается повторное использование выделенного набора частот, удалены друг от друга на расстояние  $D$ , или на, так называемый, «защитный интервал» (рис. 1.) [4], на котором перекрестные помехи минимальны.



**Рис. 1**

Величина  $D$  определяется исходя из перекрестных помех между сотами с одинаковым набором частот. При этом оперируют не абсолютным значением  $D$ , а соотношением  $D/R$ , где  $R$  – радиус соты. Из соотношения находят необходимую мощность передатчика. Площадь покрытия базовой станции определяет также число абонентов, способных одновременно вести переговоры на всей территории обслуживания. Следовательно, уменьшение радиуса соты позволяет не только повысить эффективность использования выделенной полосы частот и увеличить абонентскую емкость системы, но и уменьшить мощность передатчиков и чувствительность приемников базовых и подвижных станций.

Важным достоинством сотовых сетей является возможность постепенного развертывания этих систем на обслуживаемой территории во времени и в пространстве, что позволяет использовать доходы, полученные при начале эксплуатации системы для ее развития. Основой этого служит принцип расщепления сот (рис. 1). При пространственном подходе учитывается территориальная загрузка сети (максимальная - в деловом центре, минимальная - в «спальных» районах и пригородах). В зави-

симости от этого и от возможности оператора в обеспечении качественного покрытия меняется коэффициент расщепления сот и R.

**Методы оптимизации и расчета характеристик сети.** Решение радиотехнических проблем и планирование использования частот тесно взаимосвязаны и требуют оптимизации в соответствии с необходимыми для потребителя параметрами связи. Существует три пути усовершенствования: повышение пропускной способности без увеличения используемого ресурса, повышение надежности поддержания связи, повышение скорости передачи.

Для получения оптимальных рабочих характеристик системы сотовой связи необходимо сбалансировать три основных параметра: зону покрытия, качество передачи речи и емкость сети. Поскольку они взаимосвязаны, оператору не удастся оптимизировать их одновременно. Из чего следует, что оптимизировать надо особо критичные показатели, такие как коэффициент повторного использования частот (существенно влияет на емкость системы), расстояние между элементами сети с одинаковыми списками частот и схемы распределения списков частот как в кластере, так и, вообще, в сети.

Одним из методов оптимизации является повышение эффективности использования спектра частот и повышение емкости сети [5]. Внедрение технологии повторного использования частот в сети сотовой связи повышает эффективность использования существующего радиочастотного диапазона и увеличивает емкость сети по сравнению с традиционными решениями, когда покрытие площади осуществляется одним передающим устройством на одной частоте. Однако в системах сотовой связи различных стандартов нельзя использовать все доступные частоты в каждой соте из-за возникновения взаимных помех. В целях сведения к минимуму их величины необходимо планировать доступные частоты для каждой соты.

Для выбора оптимального соотношения между основными параметрами сотовой сети выполняют оптимизацию таких показателей эффективности сети как: соотношением  $D/R$ , коэффициент повторного использования частот ( $k_{нов}$ ) и собственно коэффициента эффективности. Одним из перспективных способов оптимизации использования радио спектра, который будет рассмотрен ниже, является использование общего пула частот для всех операторов или в пределах кластера одного оператора.

Снижение  $D/R$  и увеличение  $k_{нов}$ , достигается за счет снижения допустимого отношения сигнал-шум (применение цифровых методов передачи, помехоустойчивое кодирование и модуляция), или применения секторного обслуживания сот, это позволяет получить значение  $D/R$  минимально возможной (через одну соту), одновременно повышая  $k_{нов}$ .

Эффективным способом снижения уровня помех может быть использование направленных секторных антенн с узкими диаграммами направленности, меньший угол так же позволяет использовать антенны с лучшей направленностью, что увеличивает дальность действия. В секторе такой направленной антенны сигнал излучается преимущественно в одну сторону, а уровень излучения в противоположном направлении сокращается до минимума. Повышение пропускной способности на ограниченном частотном спектре требует как можно более частого повторного использования частотных каналов в массиве сот и в то же время ограничения критичных областей помех. Одним из способов организации повторного использования частот, который применялся в аналоговых системах сотовой подвижной связи первого поколения, был способ, использующий антенны базовых станций с круговыми диаграммами направленности. Он предполагает передачу сигнала одинаковой мощности по всем направлениям, что для абонентских станций эквивалентно приему помех от всех базовых станций со всех направлений. Деление сот на секторы позволяет чаще применять частоты в сотах повторно. Общеизвестный способ повторного использования частот в организованных, таким образом, сотах основан на применении 3-секторных антенн для каждой базовой станции и трех соседних базовых станций с формированием ими девяти групп частот. В этом случае используются антенны с шириной диаграммы направленности  $120^\circ$  (рис. 2а).

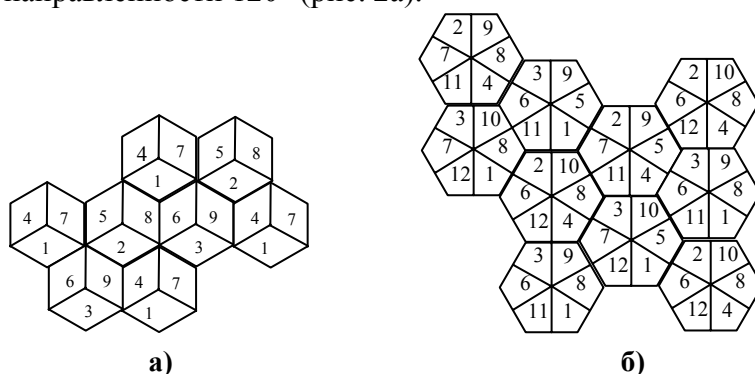


Рис. 2

Высокую эффективность использования полосы частот и, следовательно, высокое число абонентов сети, работающих в этой полосе, обеспечивает разработанный фирмой Motorola способ повторного использования частот, при котором задействуются две базовые станции [5]. При реализации этого способа каждая частота используется дважды в пределах кластера, состоящего из 4 сот; базовая станция каждой из них может работать на 12 частотах, используя антенны с диаграммой направленности шириной  $60^\circ$  (рис. 2б). Данный вариант распределения частот по сотам кластера не является единственным возможным, но благодаря

многовариантному чередованию частот, позволяет получить расстояние между секторами с одинаковыми частотами значительно больше  $D$ . Есть возможность построения 12 секторных базовых станций, при использовании антенн с диаграммой направленности шириной  $30^\circ$ , но на данный момент это существенно повышает стоимость базовой станции и схемы распределения частот в кластере, так как с ростом количества радиоустройств и секторов провайдер сталкивается с увеличением расходов на оборудование и его обслуживание. Кроме того, приходится решать вопросы, связанные с расширением инфраструктуры, такие, например, как аренда места на крышах.

Для сотовой сети выбор оптимальной конфигурации очень важен [6], поскольку она определяет схему повторного использования частоты, которая воспроизводится по всей сети с минимальными изменениями, чтобы предотвратить возможные помехи. Именно возможность повторного применения одних и тех же частот определяет высокую эффективность использования частотного спектра в сотовых системах связи. Смежные базовые станции, использующие различные наборы частотных каналов, образуют группу из  $L$  станций. Если каждой базовой станции выделяется набор из  $N$  каналов с шириной полосы каждого  $F_k$ , то общая ширина полосы, занимаемая системой сотовой связи, без учета перекрытия и промежутков между каналами составит:

$$F = F_k \cdot \left( \frac{N \cdot L}{k_{нов}} \right), \quad (1)$$

где  $k_{нов}$  является коэффициентом повторения частот. Из формулы (1) видно, что при жестко заданных  $F_k$ ,  $F$  и  $L$  (зачастую определяются типом сотовой связи), и заведомо ограниченному  $N$ , единственным вариантом оптимизации использования полосы частот является выбор системы с максимальным  $k_{нов}$ . Для расчета коэффициента повторения частот, в системах с разными вариантами повторного использования частот, можно воспользоваться выражением:

$$k_{нов}(L, Dn, Fn) := \frac{L \cdot Dn}{Fn},$$

$$k_{нов}(L, Dn, Fn) \rightarrow \max,$$

где  $Dn$  – количество секторов в соте, а  $Fn$  – количество доступных частот в системе. Приведенное выражение оперирует параметрами в кластерах с одинаковыми сотами, для реальных систем требуется расчет средних параметров по кластеру.

Для увеличения числа одновременно работающих абонентских станций можно использовать методики динамического распределения частотно-временного ресурса: пакетный режим передачи, предоставле-

ние каналов между абонентами в паузах речи (при использовании технологии DTX в речевых кодеках).

Одним из самых перспективных методов рационального использования полосы частот является использование общего частотного пула между операторами. При таком подходе все операторы имеют общий пул частот (ОПЧ) и собственный пул частот (СПЧ). СПЧ используется для обменов системной информацией и поддержания в сети минимально необходимого числа абонентов. ОПЧ используется для выделения списка частот, или их диапазонов, каждому из операторов в зависимости нагрузки на сеть. Данный метод исходит из неравномерности нагрузки на сети разных операторов. Для избежания отказа обслуживания в сети одного из операторов, можно выполнять отзыв частотного ресурса из другой сети, пользуясь таблицей долей частотного ресурса каждого оператора. Дополнительным плюсом данной методики по всей вероятности, будет уменьшение конкуренции между операторами и повышение конкурентоспособности новых операторов.

Для любой сотовой сети одной из важнейших характеристик является ее предельная емкость. Как правило, при хорошем территориально-частотном планировании сети максимально возможное число обслуживаемых в ней абонентов значительно (до 50 раз) больше числа организованных в сети каналов связи. Это вызвано тем, что радиоканалы жестко не закреплены за подвижными станциями, каждой из них может быть присвоен любой свободный канал из общего набора (в пределах соты). Кроме того, для определения емкости сети важен коэффициент повторного использования частот применяемого в ней стандарта. Общее число доступных каналов связи в сотовой сети (емкость сети) определяется формулой:

$$C = L_{общ} \cdot N \cdot k_{нов} \cdot n,$$

где  $N$  – среднее количество каналов в соте;  $L_{общ}$  – число сот в сети;  $k_{нов}$  – коэффициент повторного использования частот;  $n$  – коэффициент уплотнения канала. При расчете теоретической емкости сети необходимо учитывать, что реальная емкость зависит не только от числа организованных каналов, но и от территориального распределения трафика в часы максимальной нагрузки, а также от того, насколько хорошо ему соответствует организация сети. Однако решающее влияние на емкость сети оказывают два обстоятельства: диапазон выделенных частот (частотный ресурс) и способ организации радиоканалов. Реальная емкость сети тесно связана с эффективностью системы в целом. Для расчета эффективности системы, можно использовать критерий, основанный на соотношении емкости системы и ее площади по отношению к количеству секторов, то есть:

$$SYS_{eff} = \frac{C \cdot S}{M^2},$$

где  $SYS_{eff}$  – эффективность,  $C$  – общее число каналов трафика,  $S$  – площадь зоны обслуживания,  $M$  – общее число секторов в сети (рассчитывается как  $M = L_{общ} \cdot Dn$ ). Если рассмотреть идеальную сотовую сеть, состоящую из однотипных сот с одинаковым числом секторов, то эффективность системы, в целом, будет определяться эффективностью отдельно взятого сектора. Важнейшими техническими характеристиками сектора являются число каналов трафика  $N$  (определяет максимальное число абонентов, которые могут обслуживаться данным сектором) и полезная площадь покрытия сектора  $S_{sec}$ . В результате, эффективность отдельного сектора может быть выражена как:  $SEC_{eff} = N \cdot S_{sec}$ . В идеальном случае, очевидно, общее число каналов трафика будет равно сумме каналов всех секторов:  $C^{max} = N \cdot M$ , а лучшим значением общей площади обслуживания будет произведение площади обслуживания одного сектора на их количество, то есть  $S^{max} = S_{sec} \cdot M$ , тогда  $SEC_{eff} = \frac{C^{max} \cdot S^{max}}{M^2} = \frac{C \cdot S}{M^2} = SYS_{eff}$ .

В реальности общая эффективность системы всегда хуже эффективности отдельно взятой соты. Причины этого, очевидно, кроются в несоответствии общей емкости и покрытия сети простой сумме соответствующих характеристик отдельных секторов, причем в основном за счет некачественного покрытия. Понятно, что рассчитанная, таким образом, эффективность системы, является по своей природе статичной и не учитывает динамичность нагрузки и специфику той или иной сети (например, функции handover, в процессе работы которой одному абоненту может выделяться большое количество частот).

**Выводы.** В данной работе рассматриваются принципы построения сотовых сетей, и обобщаются методы оптимизации и расчета критических параметров сотовых сетей. Предложенные уравнения для расчета характеристик сети позволяют сравнить разные системы и выбрать оптимальную. Реализации конкретных технологий и стандартов - будь то GSM, CDMA, CDMA2000, в общем, укладываются в рамки описанных методов оптимизации и расчетов параметров. Однако для каждого из этих стандартов существуют свои особенности, которые в некоторых случаях предусматривают дополнения к данному материалу (иногда попросту необходимые), или же наоборот - принципиально не используют названные элементы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Меликов А.З., Пономаренко Л.А., Паладюк В.В., Телетрафик. Модели, методы, оптимизация. Киев: Политехника, 2007, 256 с.

2. Самуйлов К.Е., Никитина М.В. Сети сотовой подвижной связи в стандарте GSM // Сети и системы связи. Электронный журнал. М.: 1996, № 06, с. 10-14.
3. Зеленский А.А., Солодовник В.Ф. Системы Радиосвязи // ХАИ. Харьков, 2002, №6, с. 10-14.
4. Принципы функционирования систем сотовой радиосвязи // Internet. — cdma100.chat.ru
5. Райсеви П., Матиас К. Передача данных по сетям сотовой связи // Сети и системы связи. М.: 1996, №5, [http://www.ccc.ru/magazine/depot/96\\_05/read.html?0303.htm](http://www.ccc.ru/magazine/depot/96_05/read.html?0303.htm)
6. Как преодолеть узкие места в широкополосной радиосвязи // Компьютер Пресс, Электронный журнал. М.: 2001, №7, <http://www.compress.ru/article.aspx?id=11218&iid=445>

## **MOBİL ŞƏBƏKƏLƏRİN STRUKTURASI VƏ ONLARIN OPTİMALLAŞDIRMA MƏSƏLƏLƏRİ**

**A.Z.MƏLİKOV, N.İ.ƏLİŞOV, S.H.ORUCOVA**

### **XÜLASƏ**

Verilmiş işdə mobil şəbəkələrin qurulması prinsipləri, optimallaşdırma metodları və mobil şəbəkələrin kritik parametrləri nəzərdən keçirilir. Şəbəkənin xarakteristikalarının hesablanması üçün təklif edilmiş tənliklər fərqli sistemləri müqayisə etməyə və ən optimalını seçməyə imkan verir.

**Açar sözlər:** mobil şəbəkələr, sistemin effektivliyi, tezlik zolaqlarının istifadəsi, şəbəkənin xarakteristikasının hesablanması.

## **STRUCTURE OF CELLULAR MOBILE NETWORKS AND THE PROBLEMS OF OPTIMIZATION**

**A.Z.MALIKOV, N.I.ALISHOV, S.H.ORUJOVA**

### **SUMMARY**

The paper reviews the principles of cellular networks, and summarizes the methods of optimization and calculation of critical parameters of cellular networks. The proposed equations for calculating the characteristics of the network allow comparing different systems and choosing the best. New methods of optimization have been considered.

**Key words:** cellular networks, system efficiency, the use of frequency bands, the calculation of network characteristics.

*Поступила в редакцию 16.09.2010 г.*

*Принято к печати 10.03.2011 г.*