

В.М. Безрук, Д.В. Чеботарёва  
Харьковский национальный университет радиоэлектроники

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ СЕТЕЙ СОТОВОЙ СВЯЗИ

© Безрук В.М., Чеботарёва Д.В., 2008

**Представлены теоретические и практические особенности применения методов многокритериальной оптимизации для разных этапов планирования сетей сотовой связи – предварительного планирования и планирования транспортной сети.**

**There are represented theoretical and practical features of application of the methods multicriteria optimization for different stages of planning of networks of cellular communication – preliminary planning and planning of a transmission network.**

### **Постановка проблемы и её связь с важными научными заданиями**

Во всем мире быстрыми темпами развиваются сотовые сети мобильной связи. В условиях такого бурного развития возрастают требования к качеству и срокам планирования сетей сотовой связи (ССС). Обеспечить качественную радиосвязь можно только при условии эффективного планирования, которое невозможно без использования многокритериальной оптимизации с учетом совокупности показателей качества.

Во время создания и совершенствования сети мобильной связи решаются две неразрывно связанные задачи: планирование сети и оптимизация сети (перепланирование по результатам эксплуатации с целью повышения эффективности сети) [1–5].

Планирование СССР включает три основных этапа:

- предварительное планирование;
- детальное планирование;
- планирование сотовой транспортной сети (трансмиссии).

*Предварительное планирование* сети связано с выбором стратегии построения сети, заданием покрытия, емкости, параметров качества связи. Кроме того, на этапе предварительного планирования оценивают компоновку сети и предполагаемое размещение элементов сети радиодоступа; количество базовых станций, необходимое для выбранного покрытия [1]. В результате этого этапа должен быть создан первоначальный развернутый план реализации сети.

*Детальное планирование* осуществляется на базе данных, полученных на этапе предварительного планирования. На этапе детального планирования СССР выполняются такие операции: компьютерное проектирование сети для создания необходимого радиопокрытия территории; анализ помех (соканальных, внешних, шумов); частотное планирование; планирование СВЧ-каналов; документирование и пр. Этот этап включает планирование радиосети и системы коммутации сети.

При планировании радиосети (RNP – Radio Network Planning) в СССР необходимо определить тип и точное месторасположение базовых станций, тип и размещение антенных систем, расчет зон покрытия и границ базовых станций с учетом данных об абонентском трафике, а также оформить детальный план сети, включающий результаты по предыдущему пункту, а также результаты измерений и тестирования радиопокрытия территории.

В процессе планирования системы коммутации сети (SNP – Switching Network Planning) оценивается объем переключений; устанавливается уровень сетевого исполнения в соответствии с заданной коммутационной емкостью сети; рассматривается реализация систем коммутации и сигнализации сети; отрабатываются правила для маршрутизации, защиты, синхронизации и управления

коммутацией; определяются матрицы речевого и сигнального трафика; оценивается необходимая аппаратура для реализации вышеприведенных задач. После этого выполняется детальный план с выбранным количеством входов (например, схема сети, план маршрутизации, цифровой анализ, детали управления, план нумерации, план загрузки и др.) с учетом возможного будущего расширения сети.

*Планирование транспортной сети* (СТНП – Cellular Transmission Network Planning). На этом этапе главной задачей является разработка структуры (топологии) сети, обеспечивающей взаимодействие между всеми узлами сети (базовыми станциями, базовыми контроллерами, центром коммутации).

На всех этапах планирования ССС необходимо принимать во внимание совокупность противоречивых требований к сети, которые можно строго учитывать, используя методы многокритериальной оптимизации.

Эта работа посвящена теоретическим и практическим аспектам применения методов многокритериальной оптимизации на разных этапах планирования – предварительном планировании и планировании транспортной сети с учетом совокупности противоречивых показателей качества.

### **1. Методология многокритериальной оптимизации при проектировании систем**

В самом общем случае ССС можно рассматривать как упорядоченное множество элементов, отношений и их свойств. Однозначное их задание полностью определяет сложную систему, то есть цель работы, ее структуру, эффективность.

Вначале рассмотрим общую методологию многокритериальной оптимизации систем как взаимосвязанную совокупность методов формирования множества допустимых проектных решений, выбора подмножества Парето-оптимальных решений и сужения его до единственного проектного решения.

Решение задачи выбора оптимального проектного варианта системы включает формирование множества допустимых вариантов системы, определение совокупности показателей качества, задание критерия оптимальности системы, а также выбор вариантов системы, оптимальных по заданному критерию оптимальности [6–8].

Полагается, что каждый вариант системы  $\phi = (s, \vec{\beta}) \in \Phi_\Delta$  определяется структурой  $s$  (совокупностью элементов и связей) и вектором параметров  $\vec{\beta}$ . В частности, задаваемые ограничения на условия работы, структуру  $s \in S_\Delta$  и параметры  $\beta \in B_\Delta$ , а также на значения показателей качества, определяют множество допустимых проектных решений  $\Phi_\Delta = S_\Delta \times B_\Delta$ . Здесь существуют противоречивые требования. С одной стороны, желательно с максимальной полнотой представить все возможные варианты системы, чтобы не пропустить потенциально лучших вариантов. С другой стороны, существуют ограничения, определяемые допустимыми затратами (времени и средств) на проектирование системы.

Для формализации постановки задачи оптимального проектирования системы должно быть составлено математическое описание условий работы, структуры, показателей качества и критерия оптимальности системы в целом. Формализованная постановка задачи проектирования системы дает возможность использовать при выборе оптимальных проектных решений математические методы моделирования и многокритериальной оптимизации систем.

*Задание критерия оптимальности* для выбора наилучшей альтернативы на множестве допустимых проектных решений системы связано с формализацией представления заказчика системы о ее оптимальности. Могут быть использованы два подхода: ординалистический и кардиналистический [6–8].

Ординалистический подход апеллирует к порядку (лучше–хуже) и основан на введении некоторых бинарных отношений на множестве допустимых альтернатив. В этом случае предпочтение – это бинарное отношение  $R$  на множестве  $\Phi_\Delta$ , отражающее представление заказчика, что альтернатива  $\phi'$  лучше альтернативы  $\phi''$ :  $\phi'R\phi''$ .

Решение  $\phi^{(o)} \in \Phi_{\partial}$  называется оптимальным по отношению строгого предпочтения  $\succ$ , если не существует других решений  $\phi \in \Phi_{\partial}$ , для которых было бы справедливо отношение  $\phi \succ \phi^{(o)}$ . Множество всех оптимальных решений по отношению  $\succ$  обозначается через  $opt_{\succ} \Phi_{\partial}$ . В зависимости от структуры допустимого множества и свойств отношения  $\succ$  множество оптимальных решений может содержать единственный элемент, конечное либо бесконечное количество элементов.

Кардиналистический подход к описанию предпочтений приписывает каждой альтернативе  $\phi \in \Phi_{\partial}$  некоторое число  $U$ , интерпретируемое как полезность (ценность) альтернативы  $\phi$ . Каждая функция полезности определяет соответствующее отношение предпочтения  $R$  на множестве  $\Phi_{\partial}$ . Вариант  $\phi'$  предпочтительнее варианта  $\phi''$  тогда и только тогда, когда  $U(\phi') \geq U(\phi'')$ . В этом случае говорят, что определена функция полезности  $U(\bullet)$ , которая является индикатором предпочтения заказчика системы.

С учетом существования совокупности требований к полезности системы возникают задачи оценивания и оптимизации проектных решений по совокупности показателей качества

$$\vec{k}(\phi) = (k_1(\phi), k_2(\phi), \dots, k_m(\phi)). \quad (1)$$

Задачи оптимизации по совокупности показателей качества (1) называются задачами многокритериальной либо векторной оптимизации [6-8]. В результате решения таких задач находится подмножество Парето-оптимальных (эффективных) проектных решений, которое в общем случае содержит не один, а несколько вариантов системы, недоминирующих по отношению строгого предпочтения.

Следует отметить, что, по существу, постановка многокритериальных задач оптимизации связана с заменой (аппроксимацией) представления заказчика об оптимальности системы некоторым другим понятием оптимальности, которое удастся строго формализовать и свести задачу проектирования системы к конструктивной оптимизационной процедуре при векторном критерии оптимальности.

*Методы выбора Парето-оптимальных решений.* Парето-оптимальные решения могут быть найдены как непосредственно на множестве допустимых решений  $\Phi_{\partial}$  с применением введенных бинарных отношений предпочтения, так и в пространстве оценок введенных показателей качества (1), которое также называется критериальным пространством. Каждый вариант системы  $\phi$  отображается из множества допустимых решений  $\Phi_{\partial}$  в критериальное пространство  $V \in R^m$

$$V = \vec{K}(\Phi_{\partial}) = \{\vec{v} \in R^m \mid \vec{v} = (k_1(\phi), k_2(\phi), \dots, k_m(\phi)), \phi \in \Phi_{\partial}\}. \quad (2)$$

Здесь каждому проектному решению  $\phi$  соответствует своя оценка выбранных показателей качества  $\vec{v} = \vec{k}(\phi)$  и, наоборот, каждой оценке соответствует проектное решение (в общем случае не обязательно одно).

Отношению строгого предпочтения  $\succ$  на множестве  $\Phi_{\partial}$  соответствуют отношения  $\succ$  и  $\geq$  в критериальном пространстве оценок  $V$  [6, 7]. Для любых двух проектных решений  $\phi', \phi'' \in \Phi_{\partial}$ , для которых верно  $\vec{k}(\phi') \geq \vec{k}(\phi'')$ , всегда имеет место отношение  $\phi' \succ \phi''$ .

Следует отметить, что для заказчика желательно получить наилучшее значение каждого показателя. Однако на практике этот случай встречается очень редко. Показатели качества системы (1) могут быть трех типов; нейтральными, согласованными между собой и конкурировать между собой. В первых двух случаях оптимизация системы может осуществляться в отдельности по каждому из показателей качества. В третьем случае достигнуть потенциального значения каждого из показателей в отдельности не представляется возможным. При этом может быть достигнут лишь согласованный оптимум введенных целевых функций – оптимум по критерию Парето. Такой оптимум означает, что дальнейшее улучшение каждого из показателей может быть достигнуто лишь за счет ухудшения остальных показателей качества системы.

Оптимальности по критерию Парето в критериальном пространстве соответствует подмножество Парето-оптимальных оценок  $P(V) = opt_{\geq} V$ , которые соответствуют недоминируемым вариантам системы по отношению предпочтения  $\succ$  на множестве допустимых вариантов  $\Phi_{\delta}$ . Вариант системы  $\phi^o$  включается в подмножество Парето (и для соответствующей оценки  $\bar{v} = \bar{k}(\phi^o) \in P(V) = opt_{\geq} V$ ), если на множестве  $\Phi_{\delta}$  не существуют другие варианты системы  $\phi$ , для которых выполняется векторное неравенство [6, 7]

$$\bar{k}(\phi) \geq \bar{k}(\phi^o). \quad (3)$$

Таким образом, последовательно выполняя перебор и сравнение всех вариантов в критериальном пространстве согласно (3), на множестве  $\Phi_{\delta}$  выделяют подмножество Парето-оптимальных вариантов системы. Остальные варианты системы являются, безусловно, худшими. Нахождение Парето-оптимальных проектных решений может осуществляться либо непосредственно согласно (3), либо с использованием специальных методов, например, весового метода, метода рабочих характеристик [8].

В частности, в случае применения весового метода Парето-оптимальные проектные решения находятся путем оптимизации взвешенной суммы частных целевых функций

$$\underset{\phi \in \Phi_{\delta}}{extr} [k_p(\phi) = \lambda_1 k_1(\phi) + \lambda_2 k_2(\phi) + \dots + \lambda_m k_m(\phi)], \quad (4)$$

в которой весовые коэффициенты  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$  выбираются из условия  $\lambda_i > 0, \sum_{i=1}^m \lambda_i = 1$ . Парето-оптимальными решениями являются те варианты системы, которые удовлетворяют условию (4) при разных допустимых комбинациях весовых коэффициентов  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ .

Метод рабочих характеристик состоит в том, что все целевые функции, кроме одной, например, первой, переводятся в разряд ограничений типа равенства и ищут ее оптимум на допустимом множестве  $\Phi_{\delta}$

$$\underset{\phi \in \Phi_{\delta}}{extr} [k_1(\phi)], \quad k_2(\phi) = K_{2\phi}; \quad k_3(\phi) = K_{3\phi}, \dots, k_m(\phi) = K_{m\phi}. \quad (5)$$

Здесь  $K_{2\phi}, K_{3\phi}, \dots, K_{m\phi}$  – некоторые фиксированные, но произвольные значения показателей качества. Оптимизационная задача (5) решается последовательно для всех допустимых комбинаций указанных фиксированных значений  $K_{2\phi}, K_{3\phi}, \dots, K_{m\phi}$ .

При решении оптимизационных задач (4), (5) получается некоторая многомерная поверхность в критериальном пространстве, которая при определенных условиях совпадает с Парето-оптимальной поверхностью [6–8]. Следует отметить, что каждая точка Парето-оптимальной поверхности обладает свойством  $m$ -кратного согласованного оптимума по Парето, то есть этой точке соответствует потенциально достижимое значение одного из показателей  $k_{i_{opt}}$  при фиксированных значениях остальных  $(m-1)$  показателей качества.

Парето-оптимальная поверхность описывается любым из таких соотношений

$$k_{1_{opt}} = f_{no}^1(k_2, k_3, \dots, k_m), \dots, k_{m_{opt}} = f_{no}^m(k_1, k_2, \dots, k_{m-1}). \quad (6)$$

Соотношения (6) представляют собой многомерные диаграммы обмена (МДО) между показателями качества. МДО показывают, как потенциально достижимое значение одного из показателей зависит от значений других  $m-1$  показателей.

Таким образом, полученная в критериальном пространстве Парето-оптимальная поверхность связывает между собой потенциально достижимые значения показателей качества (в общем случае зависимых и конкурирующих между собой). Поэтому, получая подмножество Парето-оптимальных оценок показателей качества, тем самым находят многомерные потенциальные характеристики (МПХ) системы и связанные с ними МДО показателей качества.

По сравнению с широко используемыми одномерными потенциальными характеристиками систем МПХ дают качественно новую информацию для анализа проектных решений. МПХ дают представление о потенциально возможных значениях совокупности связанных и противоречивых показателей качества и соответствующих возможностях системы. Кроме того, анализируя МДО, можно выяснить, как необходимо изменить значения одних показателей качества системы для улучшения других показателей, а также выяснить, как при этом следует изменить структуру и параметры системы.

Если найденное подмножество Парето-оптимальных вариантов системы оказалось узким, то на дальнейших этапах проектирования можно использовать любой из них. Как правило, подмножество Парето-оптимальных вариантов содержит много вариантов систем. Поэтому возникает задача сужения найденного подмножества Парето-оптимальных проектных решений с привлечением дополнительной информации об отношениях предпочтения заказчика системы.

*Методы сужения множества Парето до единственного проектного решения.* Как правило, для последующих этапов проектирования должен быть выбран единственный вариант системы. Поэтому возникает необходимость сужения подмножества Парето-оптимальных проектных решений до единственного варианта системы с привлечением дополнительной информации об отношениях предпочтения заказчика. Такая информация появляется в результате всестороннего анализа Парето-оптимальных вариантов системы, в частности, их структуры, параметров, МДО показателей качества, относительной важности введенных показателей качества и пр. Полученная при этом дополнительная информация о предпочтениях заказчика используется для построения некоторой скалярной целевой функции, оптимизация которой приводит к выбору единственного варианта системы.

Одним из распространенных способов сужения подмножества Парето-оптимальных решений является построение скалярной функции ценности, оптимизация которой приводит к выбору одного варианта системы из подмножества Парето. В частности, может быть использована аддитивная форма целевой функции [6–8]

$$F(k_1, k_2, \dots, k_m) = \sum_{j=1}^m c_j f_j(k_j), \quad (7)$$

где  $c_j$  – шкалирующие коэффициенты,  $f_j(k_j)$  – некоторые скалярные функции полезности, являющиеся оценками полезности варианта системы  $\phi$  по  $j$ -му показателю качества  $k_j(\phi)$ .

Существуют специальные методики опроса экспертов и пакеты программ, реализующие на ЭВМ процедуры получения значений коэффициентов  $c_j$ . При этом может быть использован известный метод анализа иерархий Саати.

Для построения скалярной целевой функции может также использоваться подход, основанный на теории размытых множеств. Наиболее общая форма функции принадлежности, интерпретированная в терминах теории размытых множеств, имеет вид [7, 8]

$$\xi_k^-(k_1, k_2, \dots, k_m) = \frac{1}{m} \left\{ \sum_{j=1}^m [\xi_j^-(k_j)]^\beta \right\}, \quad (8)$$

где  $\xi_j^-(k_j)$  – некоторая функция принадлежности значения показателей  $k_j$  к наилучшим потенциально возможным значениям.

При использовании лексографического подхода к выбору единственного проектного решения из подмножества Парето-оптимальных полагается, что весь набор показателей  $k_1, k_2, \dots, k_m$  строго упорядочен по важности и при сравнении проектных решений используется лексико-графическое отношение их оценок  $\vec{v}' \text{ lex } \vec{v}''$ . Это означает – из пары оценок (и соответствующих им проектных решений) предпочтительнее та оценка, у которой первая компонента вектора  $\vec{v}'$  (оценка показателя качества  $k_1(\phi)$ ) больше – независимо от соотношений между остальными компонентами вектора оценок  $\vec{v}$ . Когда первые компоненты двух оценок одинаковы, то предпочтительнее оценка (и

соответствующее проектное решение), имеющая большую вторую компоненту (остальные компоненты этой оценки могут при этом "значительно уступать") и т.д.

Следует отметить, что окончательный выбор оптимальных проектных решений должен производиться лишь в пределах найденного подмножества Парето-оптимальных решений, которое получено в результате исключения безусловно худших проектных решений из множества допустимых вариантов системы.

## 2. Практические особенности многокритериальной оптимизации при номинальном планировании ССС

Рассмотрим некоторые практические особенности применения методов многокритериальной оптимизации при планировании сетей радиосвязи на примере сетей сотовой связи (ССС) [9–13]. Нахождение оптимальных вариантов ССС включает такие этапы:

- задание исходного множества вариантов сетей, которые отличаются стандартами, выделенной полосой частот, количеством и активностью абонентов, обслуживаемой территорией, секторизацией и высотой подвеса антенн, мощностью передатчиков базовых станций, параметром затухания радиоволн и др.;
- выделение множества допустимых вариантов с учетом ограничений на структуру и параметры сетей, а также ограничений на значение показателей качества;
- выбор подмножества Парето-оптимальных вариантов сетей с использованием безусловного критерия предпочтения;
- анализ полученных Парето-оптимальных вариантов сетей, их многомерных потенциальных характеристик и многомерных диаграмм обмена показателей качества;
- выбор единственного варианта сети из подмножества Парето.

Сначала формируется множество допустимых вариантов ССС, которые определялись различными исходными данными, в частности, это планируемое количество абонентов в сети, размеры обслуживаемой территории, активность абонентов, выделенная для организации сети ширина полосы частот, размеры кластеров, допустимая вероятность блокирования вызова, процент времени ухудшения качества связи.

В частности, при оптимизации могут быть выбраны такие показатели качества ССС как: вероятность ошибки, емкость сети, количество базовых станций в сети, эффективность использования радиочастотного спектра, вероятность блокировки, площадь покрытия. При их оценивании должны быть рассчитаны основные технические параметры ССС. Приведем соотношения, которые могут быть использованы для оценки основных показателей качества [3, 11]:

1. Общее количество частотных каналов, выделяемых для развертывания ССС в этом регионе

$$N_k = \text{int}(\Delta F / F_k), \quad (3)$$

где  $\text{int}(x)$  – целая часть числа  $x$ ;  $F_k$  – полоса частот, занимаемая одним частотным каналом ССС.

2. Количество радиочастот, необходимое для обслуживания абонентов в одном секторе каждой соты,

$$n_S = \text{int}(N_k / C \cdot M). \quad (4)$$

3. Величина допустимой телефонной нагрузки в одном секторе одной соты или в соте (для базовых станций, имеющих антенны с круговой диаграммой направленности), которая определяется соотношениями

$$A = n_O \left[ 1 - \sqrt{1 - (P_{\text{бл}} \sqrt{\pi n_O / 2})^{1/n_0}} \right] \quad \text{при } P_{\text{бл}} \leq \sqrt{\frac{2}{\pi n_O}}, \quad (5)$$

$$A = n_O + \sqrt{\frac{\pi}{2} + 2n_O \ln(P_{\text{бл}} \sqrt{\pi n_O / 2})} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad \text{при } P_{\text{бл}} > \sqrt{\frac{2}{\pi n_O}}, \quad (6)$$

где  $n_O = n_S \cdot n_a$ ;  $n_a$  – количество абонентов, которые одновременно могут использовать один частотный канал (определяется стандартом).

4. Количество абонентов, обслуживаемых базовой станцией и зависящее от количества секторов, допустимой телефонной нагрузки и активности абонентов,

$$N_{aBTS} = M \text{int}(A / \beta). \quad (7)$$

5. Необходимое количество базовых станций на заданной территории обслуживания

$$N_{BTS} = \text{int}(N_a / N_{aBTS}), \quad (8)$$

где  $N_a$  – заданное количество абонентов, которых должна обслуживать ССС.

6. Радиус соты, при условии, что нагрузка распределена по всей зоне равномерно,

$$R = \sqrt{\frac{1,21 \cdot S_0}{\pi N_{BTS}}}. \quad (9)$$

7. Величина защитного расстояния между BTS с одинаковыми частотными каналами

$$D = R\sqrt{3C}. \quad (10)$$

8. Необходимая мощность на входе приемника, определяемая с использованием первого уравнения передачи

$$P_{np.MS} = P_{пер.BTS} + G_{BTS} - 70 - 26,161 \lg(f, \text{МГц}) + 13,821 \lg(h_{BTS}, \text{м}) - [45 - 6,55 \lg(h_{BTS}, \text{м})] \lg(R, \text{км}) - \alpha; \quad (11)$$

где  $G_{BTS}$  – коэффициент усиления антенны БС;  $f$  – средняя частота рабочей полосы частот;  $h_{BTS}$  – высота подвеса антенны базовой станции;  $R$  – радиус соты;  $\alpha$  – полные потери в фидере, в качестве которого используется высокочастотный коаксиальный кабель.

9. Вероятность ошибки в процессе сеанса связи

$$P_{ош} \approx \frac{1}{(\sqrt{3C} - 1)^{2k}}. \quad (12)$$

10. Эффективность использования радиоспектра, определяемая количеством активных абонентов, приходящихся на единицу полосы частот на передачу (или прием),

$$\gamma = 1,21 \frac{S_0}{\pi R^2 F_k C}. \quad (13)$$

После расчета основных параметров согласно (3) – (13) должен быть разработан начальный частотно-территориальный план сети. Распределение базовых станций по обслуживаемой территории осуществляется с условием обеспечения пространственного разнесения БС, работающих на одинаковых частотах.

Затем должен быть выполнен поиск Парето-оптимальных вариантов сетей в критериальном пространстве оценок введенных показателей качества (1) по критерию Парето согласно (3). Единственный вариант ССС из подмножества Парето может быть выбран из условия экстремума скалярной целевой функции (7) или с использованием других методов сужения подмножества Парето к единственному решению.

В работах [10–12] рассмотрены примеры многокритериальной оптимизации ССС. Для выбора оптимальных проектных решений на основе теории многокритериальной оптимизации был разработан программный комплекс [11]. Он состоит из двух частей, которые решают такие задачи:

1) задание исходных данных и расчет значений совокупности показателей качества для некоторого допустимого множества вариантов ССС (программа реализована в среде MathCad);

2) выбор подмножества Парето-оптимальных вариантов ССС в критериальном пространстве оценок показателей качества и сужение его до единственного варианта сети (программа реализована в среде Delphi).

### 3. Практические особенности многокритериальной оптимизации при планировании транспортной сети ССС

Планирование транспортной сети (трансмиссии) – это планирование сети проводной или радиорелейной связи, обеспечивающей взаимодействие между BTS (базовыми станциями), BSC (базовыми контроллерами) и MSC (центром коммутаций) [15].

В результате этапа детального планирования радиосети создается план точного месторасположения базовых станций и базовых контроллеров, которые необходимо соединить проводными или беспроводными линиями связи для организации транспортной сети.

При планировании транспортной сети главной задачей является создание проекта оптимальной топологии сети и выбор типа линий связи, используемых в сети. При этом возможна либо установка собственных радиорелейных линий связи, либо прокладка волоконно-оптических линий связи, либо аренда уже существующих радиорелейных линий связи, вписывающихся по местоположению и условиям устойчивой радиосвязи в разрабатываемую сотовую сеть.

Каждая базовая станция должна быть соединена с базовым контроллером. Это соединение может быть организовано как напрямую, так и через другие базовые станции, поскольку оборудование BTS имеет гибкие возможности построения сети передачи различной конфигурации. Возможно создание сетей с топологическими структурами "звезда", "цепь", и "дерево". Зачастую может быть использована смешанная топология, включающая элементы всех вышеперечисленных топологий.

При выполнении этого этапа планирования сети необходимо учесть проблему соединения и координации больших потоков различной информации, а также выбрать высоконадежные широкополосные каналы, позволяющие обеспечить надежную связь между BTS и BSC.

В известных подходах к планированию транспортной сети при оптимизации топологии сети передачи по одному какому-либо показателю (например, по длине или стоимости) используют алгоритмы поиска кратчайшего дерева или определения максимального потока, такие, как алгоритмы Прима, Краскала, Исау-Вильямса, Фогеля и др. [9] При учете двух или более показателей качества появляются определенные трудности, так как многие показатели зависят не только друг от друга, но и от полученной в итоге топологии сети, например, пропускная способность зависит от того, напрямую BTS соединена с BSC или через другие базовые станции.

Поэтому важной задачей этого этапа планирования является многокритериальная оптимизация топологической структуры сети по совокупности показателей качества [5–7]. Чтобы решить на практике эту задачу планирования, необходимы детальная информация о структуре сотовой сети, полученная на предыдущих этапах планирования, формулировка задач сети и требований к ее качеству обслуживания.

Для начала оптимизации необходимо иметь такие исходные данные:

- план (карту) расположения базовых станций, базовых контроллеров и центра коммутации;
- совокупность показателей качества, согласно которым следует оценивать допустимые варианты топологий сети передачи;
- длины возможных пролетов (расстояния между узлами сети – BTS и BSC), их стоимостные характеристики, необходимую пропускную способность и другие данные.

При этом необходимо определить и отбросить пролеты, где нет радиовидимости или существуют какие-либо причины, препятствующие построению линии связи на этом участке.

*Выбор показателей качества транспортных сетей.* При планировании транспортных сетей можно использовать показатели качества, учитывающие: длину радиорелейного пролета; общую длину сети; количество звеньев в цепи; стоимостные характеристики: стоимость строительных работ, стоимость аренды существующих линий, стоимость оборудования и др.; используемую и резервную пропускную способность; надежность пролета; скорость передачи; полосу частот; вероятность ошибочного приема бита (BER) и др.

При этом необходимо отметить, что с учетом двух или более показателей качества появляются определенные трудности, так как многие показатели зависят не только друг от друга, но и от полученной в итоге (конкретной) топологии сети. Например, требуемая скорость передачи зависит от того, напрямую BTS соединена с BSC или через другие базовые станции.

*Формирование исходного допустимого множества вариантов структуры транспортной сети.* Полагается, что каждый пролет и транспортная сеть в целом характеризуется некоторой совокупностью показателей качества

$$\bar{k}(\phi) = (k_1(\phi), k_2(\phi), \dots, k_m(\phi)). \quad (14)$$

При формировании исходного допустимого множества вариантов структуры сети вначале может быть использована сокращенная совокупность показателей качества

$$\vec{k}(\phi) = (k_1(\phi), k_2(\phi), \dots, k_n(\phi)) \quad (n \leq m). \quad (14a)$$

В частности, при этом могут быть выбраны такие показатели качества каждого пролета, как длина и стоимость пролета  $\vec{k} = (k_1(l), k_2(s))$ .

Далее предлагается ввести обобщенный показатель качества каждого пролета в виде взвешенной суммы выбранных показателей качества

$$k_{\text{обобщ}} = \sum_{i=1}^n c_i \cdot k_i, \quad (15)$$

где  $c_i$  – некоторые весовые коэффициенты, характеризующие важность каждого показателя.

Далее, предположив, что каждый пролет характеризуется теперь скалярным показателем качества (15), с помощью одного из известных алгоритмов (Прима, Краскала) находят кратчайшее дерево для транспортной сети. Выбирая различные допустимые комбинации весовых коэффициентов, можно найти некоторое множество других допустимых вариантов деревьев сети  $\Phi_0$ , которые определяют различные топологии транспортной сети.

*Нахождение подмножества Парето-оптимальных вариантов сетей.* Для каждого допустимого варианта топологии (структуры) транспортной сети в целом оцениваются значения полной совокупности показателей качества транспортной сети (14). Каждый вариант структуры транспортной сети представляется в критериальном пространстве оценок показателей качества (14). Здесь с использованием одного из описанных выше методов выделяется подмножество Парето-оптимальных вариантов построения транспортной сети. Оптимумом по безусловному критерию предпочтения (критерию Парето) является множество Парето-оптимальных оценок, которые соответствуют недоминируемым вариантам сети согласно (3).

Следует отметить, что при нахождении подмножества Парето-оптимальных вариантов топологии транспортной сети оцениваются и учитываются показатели качества сети, которые зависят от конкретной топологии сети. Это могут быть такие показатели качества, как скорость передачи, вероятность ошибки, пропускная способность и др.

В частности, если  $\vec{k} = (k_1(P_{\text{ош}}), k_2(C), k_3(R_{\text{неп}}))$ , показатели качества транспортной сети в целом через показатели качества каждого пролета сети можно рассчитываться исходя из приведенных ниже соотношений:

– вероятность ошибки

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m \left( 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{\text{ош},i}) \right); \quad (17)$$

– пропускная способность

$$C = \frac{1}{T_x} \cdot \left[ \log_2 M + P_{\text{ош}} \log_2 \left( \frac{P_{\text{ош}}}{M-1} \right) + (1 - P_{\text{ош}}) \cdot \log_2 (1 - P_{\text{ош}}) \right]; \quad (18)$$

– скорость передачи

$$R_{\text{неп}} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^n R_i \right). \quad (19)$$

*Выбор единственного проектного варианта топологии сети.* Для выбора единственного варианта из подмножества Парето-оптимальных можно применить один из описанных выше методов сужения подмножества Парето, в частности, с использованием скалярной функции ценности в виде (7).

## Выводы

В работе рассмотрены теоретические и практические особенности применения методов многокритериальной оптимизации для разных этапов планирования ССС – предварительного планирования и планирования сотовой транспортной сети (трансмиссии) с учетом совокупности противоречивых показателей качества.

В дальнейшем планируется более подробно рассмотреть особенности оптимизации планирования сотовой транспортной сети и решить другие задачи планирования сотовых сетей связи, где возможно применение методов многокритериальной оптимизации, например, выбор оборудования базовых станций с учетом совокупности показателей качества для организации работы сетей.

1. Тихвинский В.О., Терентьев С.В. *Управление и качество услуг в сетях GPRS/UMTS*. – М.: Эко-Трендз, 2007. – 400с. 2. *Radio network planning and optimization for UMTS. Second edition / edited by Jaana Laiho, Ashim Wacker, Tomas Novosad*. – John Wiley & sons, 2006. 3. Шмалько А.В. *Цифровые сети связи: основы планирования и построения*. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 282 с. 4. Емельянов В.В. *Системы сотовой подвижной радиосвязи*. – Харьков: Торсинг, 2007. 5. Вишневский В.М. *Теоретические основы проектирования компьютерных сетей*. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с. 6. *Многокритериальная оптимизация. Математические аспекты* // Б.А. Березовский, В.К. Борзенко, Л.М. Кемпнер. – М.: Наука, 1989. – 128 с. 7. Вязгин В.А., Федоров В.В. *Математические методы автоматизированного проектирования*. – М.: Высш. шк., 1989. – 149 с. 8. Безрук В.М. *Векторна оптимізація та статистичне моделювання в автоматизованому проектуванні систем зв'язку*. – Харків: ХНУРЕ, 2002. 9. Зайченко Ю.П., Гонта Ю.В. *Структурная оптимизация сетей ЭВМ*. – К.: Техника, 1986. – 168 с. 10. Безрук В.М., Чеботарёва Д.В. *Современные технологии автоматизации планирования сетей радиосвязи. Часть 1. Методы выбора проектных решений, оптимальных по совокупности показателей* // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 6/3 (30), 2007. 11. Безрук В.М., Чеботарёва Д.В., Анищенко А.В. *Современные технологии автоматизации планирования сетей радиосвязи. Часть 2. Программные средства многокритериальной оптимизации сетей радиосвязи* // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 1/2 (31), 2008. 12. Bezruk V.M., Rybalko D.V. *Automation of communication systems design* // *IEEE "East-West Design & Test" (Symposium EWDTs'07)*. – Yerevan, 2007. – P.581–584. 13. Безрук В.М., Рыбалко Д.В. *Многокритериальная оптимизация в планировании телекоммуникационных сетей* // *17-я Международная крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2007): Материалы конференции*. – Севастополь: Вебер, 2007. – С.338–340. 14. Чеботарёва Д.В. *Оптимизация топологии сетей мобильной связи с учетом совокупности показателей качества* // *4-я Международная молодежная научно-техническая конференция "Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций" (РТ-2008)*. Севастополь, 21–25 апреля 2008 г.: *Материалы конференции* — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008. – С.43.