БЕСПРОВОДНАЯ СВЯЗЬ

УПРАВЛЕНИЕ, СТРУКТУРНОИ ДИНАМИКОИ сетей мобильной связи

Е.Зайчик, к.т.н., эксперт ООО "Инфотел" / zaem@mail.ru

УДК 621.396, DOI: 10.22184/2070-8963.2018.76.7.24.31

В статье представлены алгоритмы управления структурной динамикой сетей мобильной связи с использованием геоинформационных технологий, что позволяет сократить сроки принятия решений при сохранении гарантированной точности прогнозирования показателей качества функционирования сетей мобильной связи.

Стремительное развитие прогресса во всех сферах человеческой деятельности сопровождается развитием все более сложных инфокоммуникационных систем. Насыщение мирового рынка всеми видами продукции высокого качества, доступность передовых технологий выдвигают на первый план конкурентной борьбы фактор времени. Очевидно, что в этой борьбе выигрывает тот, кто синхронизует в реальном масштабе времени (РМВ) бизнес-процессы и производство (системы ERP, MES, VIM, АСУ ТП), быстрее разрабатывает и предлагает на рынке новый продукт (системы CAD/ CAM/PDM), имеет гибкое эффективное высокоавтоматизированное производство (системы MES, СОТС ТП), сокращает циклы производства (системы MES), поставок и продаж (системы SCM), сокращает время обработки заказов (CRM), анализа и принятия решений (OLAP, моделирование RT, аналитические системы RT), в реальном времени контролирует расход ресурсов и осуществляет оперативное управление производством, управляет производственной кооперацией в РМВ (e-manufacturing, co-manufacturing). Перечисленные требования и информационные системы объединяет концепция предприятия реального времени - гибкого, адаптивного к быстроменяющемуся конкурентному рынку, не знающему расстояний и границ, моментально реагирующему на все внутренние производственные и внешние рыночные факторы в РМВ [1]. Важную роль в практической реализации сформулированной концепции играют производственные исполнительские системы, известные под названием MES (Manufacturing Execution Systems), и мобильные (беспроводные) информационные технологии и системы. Одним из ярких примеров последних являются современные сети мобильной связи (СМС), которые в значительной мере способствуют реализации непрерывных бизнес-процессов и повышению эффективности использования такого нематериального ресурса, как время.

Развитие СМС от поколения к поколению идет по пути увеличения пропускной способности предоставляемого пользователю информационного канала и конвергенции широкого перечня информационных услуг. Данные характеристики являются основными при отнесении СМС к определенному поколению. По результатам тестирования величина пропускной способности сетей 5G практически не уступает абонентским проводным сетям, а по набору услуг превосходит их. СМС представляют собой сложные технические системы, которые имеют неоднородную сетевую пространственно-распределенную структуру.

В процессе функционирования СМС постоянно испытывают воздействие многих факторов, которые в общем случае можно разделить на объективные, субъективные, внутренние, внешние. Между факторами существуют сложные причинноследственные зависимости. Под воздействием данных факторов осуществляется постоянное изменение во времени состояния и структуры как отдельных составляющих, так и СМС в целом. Иными словами, имеет место структурная динамика СМС. Как сложная техническая система, СМС включает следующий набор структур: топологическую, техническую, технологическую, функциональную, структуру программного обеспечения (ПО) (рис.1). Совокупность вариантов структур сложных технических систем в определенный момент времени представляет собой макросостояние [2, 3].

Построение СМС на основе концепции интеллектуальной программно-определяемой сети (SDN) позволяет программным образом формировать необходимый набор услуг и предоставлять их пользователю единым пакетом по единому информационному каналу. В связи с высокой подвижностью пользователей и большим разнообразием предоставляемых им услуг возможны два варианта решения проблемы построения СМС.

Первый – создавать СМС с большим запасом ресурсов с целью обеспечения всего необходимого набора услуг для всех пользователей в любой точке или совокупности точек (области) пространства. Второй – обеспечить управление структурной динамикой и оперативное перераспределение ресурсов СМС в соответствии с потребностями пользователей и их реальным местоположением. Очевидно, с экономической точки зрения более предпочтительным является второй вариант, но он также является и более сложным в реализации. Чтобы определить возможные пути управления структурной динамикой СМС, проведем краткое сравнение методов управления структурной динамикой и функционированием сетей мобильной связи различных поколений.

Управление функциональной структурой сетей 2G в соответствии с изменяющимися требованиями к сети в реальном масштабе времени весьма ограничено, так как применяемые в процессе управления программно-аппаратные решения имеют длительный срок реализации и окупаемости. Например, с целью повышения качества обслуживания абонентов имеется возможность управления функциональной структурой сети путем измения частот на базовых станциях (БС). Однако такие изменения частот (частотно-территориальных планов сети) осуществляются редко, что связано с отсутствием эффективных

Макросостояния	ј-уровень сложной технической системы			
Варианты структур	S ₀ ^(j)	S ₁ ^(j)		S _K ^(j)
Топологическая структура S _{top}		**		0 0
Техническая структура S^{0}_{t}		04000 04000		\$\$ \$\$
Технологическая структура S ^(j)	0-0-0			9999
Функциональная структура ИО $S^{(j)}_{fun}$				0-0-0 0 0-0-0 0
Структура ПО S _{sf}	BBS	o→		% ∞∞ °

Рис.1. Варианты структур сложных технических систем

методов оперативного изменения частотных планов в короткие сроки. Это приводит к снижению эффективности использования частотного ресурса и возникновению локальных областей с отказами в предоставлении пользователям каналов доступа, в то время как на других участках имеется большой избыток неиспользуемых каналов. Изменение технической структуры сети может быть осуществлено путем изменения энергетических характеристик БС, диаграмм направленности антенн, перераспределения потоков транспортной сети. В настоящее время программное управление мощностью излучения и диаграммами направленности антенн базовых станций используется весьма редко, опять же по причине отсутствия эффективных методов реализации данного управления. Поэтому изменения топологической, технической и функциональной структур сети зачастую связаны с физическим перемещением и перенастройкой оборудования и антенн БС, а это процесс длительный и затратный. Наряду с физическим перемещением элементов сети необходимо шире использовать программные методы управления структурной динамикой сетей мобильной связи, которые обеспечивают в реальном времени изменение частотных планов, мощности передатчиков БС, диаграмм направленности антенн, перераспределение потоков транспортной сети.

Внедрение программных методов создает широкие возможности по управлению структурной динамикой сетей с целью их оптимизации и повышения качества их функционирования за счет адаптации характеристик сетей к реально складывающимся условиям их функционирования, таким как реальное местоположение пользователей и набор запрашиваемых ими услуг [3, 4].

Для сетей связи 2G в ходе управления структурной динамикой с целью повышения качества предоставляемых услуг связи необходимо решать

БЕСПРОВОДНАЯ СВЯЗЬ

задачи, направленные на оптимизацию топологической, технической и функциональной структур. Во-первых, это оптимизация частотно-территориального плана (ЧТП) сети:

- уточнение исходных данных и постановка задачи оптимизации ЧТП;
- анализ пространственной топологии и технической конфигурации сети и выработка рекомендаций по их оптимизации;
- формирование ЧТП, обеспечивающего требуемые показатели качества при наличии заданных ресурсов.
 - Во-вторых оптимизация параметров сети:
- анализ ключевых показателей качества предоставляемых услуг и параметров функционирования сетей;
- анализ топологии сети, выявление проблемных участков и выработка рекомендаций;
- проведение контрольных осмотров сайтов на предмет соответствия проектным решениям;
- подготовка заданий и проведение драйв-тестов сети:
- анализ результатов драйв-тестов;
- выявление межсотовых переходов (Handover) с низкими показателями качества, определение их причин и принятие решений по их устранению;
- выявление секторов с высоким уровнем разорванных соединений (Dropped Calls), определение их причин и принятие решений по их устранению;
- выявление фрагментов сети с высоким уровнем перегрузок (Congestion), определение их причин и принятие решений по их устранению;
- оптимизация распределения трафика в многодиапазонной и многоуровневой (макро-, микро-, пико-БС) сети;
- проведение мероприятий по устранению выявленных проблем и применению новых параметров сети;
- применение нового ЧТП;
- оценка эффекта оптимизации сети.

В сетях мобильной связи 3G и последующих поколений 4G и 5G имеется прямая зависимость качества предоставляемых услуг от загрузки сети. Чем более загружена сеть, тем хуже качество услуг. Поэтому эффективное перераспределение нагрузки от пользователей между базовыми станциями является важной целью управления структурной динамикой сети. Это особенно важно в сетях 5G, в которых предусмотрено соединение пользователя с несколькими БС, что значительно повышает гибкость сети и расширяет

возможности по оптимальному распределению ресурсов сети.

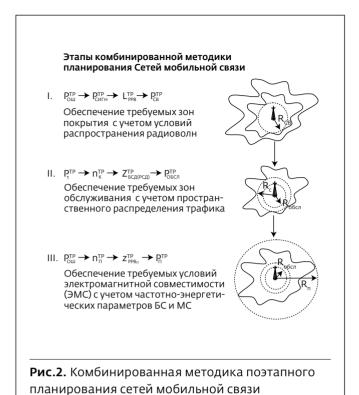
Поэтому управление топологической, технической и функциональной структурами программными методами должно быть реализовано достаточно широко. С целью реализации эффективного управления структурной динамикой сетей мобильной связи целесообразно использовать комбинированные методы управления, которые реализуют взаимосвязанное управление топологической, технической и функциональной структурами сетей. Одним из первых и основополагающих этапов управления является этап планирования.

Рассмотрим основы комбинированной методики поэтапного планирования сетей мобильной связи в процессе управления структурной динамикой, которая предназначена для повышения оперативности и обоснованности решений, принимаемых при планировании развития и эксплуатации сетей мобильной связи. Комбинированная методика поэтапного планирования сетей мобильной связи включает три этапа, показанные на рис.2.

Этап 1. Обеспечение радиопокрытия заданной территории, ограниченной величиной $R_{\rm CB}^{\rm TP}$, которая рассчитана с учетом неоднородных условий распространения радиоволн (РРВ). $P_{\rm OIII}^{\rm TP}$ – требуемая величина вероятности ошибки в канале передачи; $P_{\rm Curh}^{\rm TP}$ – требуемая величина уровня радиосигнала на входе приемника для обеспечения величины $P_{\rm OIII}^{\rm TP}$; $L_{\rm PPB}^{\rm TP}$ – допустимая величина ослабления радиосигнала, при которой обеспечивается величина $P_{\rm Curh}^{\rm TP}$; $P_{\rm CB}^{\rm TP}$ – расстояние от базовой станции до мобильной станции, при котором обеспечивается величина $P_{\rm CIII}^{\rm TP}$.

Этап 2. Обеспечение емкости сети/обслуживания с заданным качеством на заданной территории с учетом неоднородного пространственного распределения трафика. P_t^{Tp} – распределение трафика от пользователей; n_{κ}^{Tp} – требуемое количество каналов связи для обслуживания трафика P_t^{Tp} ; $Z_{\text{БСД(РСД)}}^{Tp}$ – допустимое количество каналов связи на одной БС для обслуживания трафика; $R_{\text{обсл}}^{Tp}$ – расстояние от базовой станции до пользователя, при котором у БС имеется свободный ресурс для обслуживания трафика P_t^{Tp} .

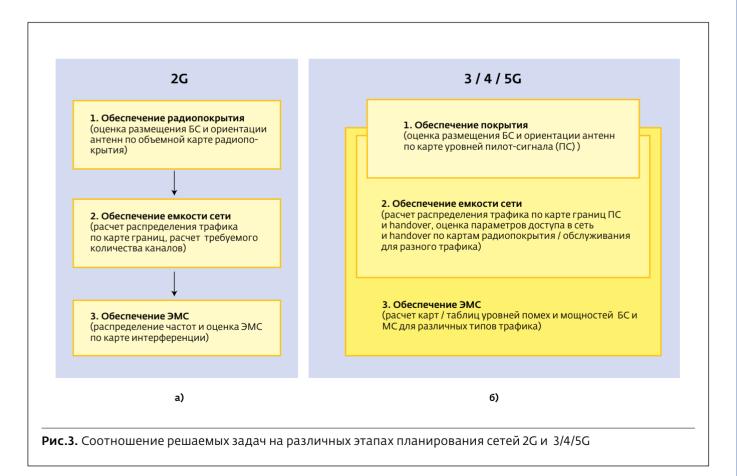
Этап 3. Обеспечение электромагнитной совместимости всех БС и мобильных станций (МС) пользователей сети, а также внешних РЭС других систем с учетом их размещения, характеристик направленности антенн, а также частотноэнергетических параметров сигналов и помех. $P_{\text{ош}}^{\text{тр}}$ – требуемая величина вероятности ошибки



в канале передачи; P_{Π}^{TP} – допустимая величина сигнала помехи на входе приемника, при котором обеспечивается $P_{\text{ош}}^{TP}$; $L_{\text{РРВ}\Pi}^{TP}$ – допустимая величина ослабления радиосигнала помехи, при которой обеспечивается величина P_{Π}^{TP} ; R_{Π}^{TP} – расстояние от базовой станции до мобильной станции, при котором обеспечивается величина $L_{\text{РРВ}\Pi}^{TP}$.

Отмеченные на рис. 2 окружности являются граничными оценками конфигурации зон покрытия, обслуживания и ЭМС, обобщающими проявление неоднородных условий распространения радиоволн (из-за неровностей рельефа и наземных объектов) в разных направлениях от БС. Подобные оценки упрощают планирование сетей радиодоступа и мобильной связи как узкополосных (1G, 2G), так и широкополосных (3/4/5G) [4].

Необходимо отметить, что при планировании сетей мобильной связи поколения 2G на каждом этапе удается выделить и решить задачи планирования, не зависящие от результатов решения задач на предыдущих этапах. В свою очередь, результаты решения задач на каждом этапе являются исходными данными для задач на следующих этапах (рис.3а).





Отличительной особенностью планирования сотовых сетей связи поколений 3/4/5С является сложность выделения и решения задач на каждом этапе независимо от предыдущих этапов, поскольку не только результаты решения задач на предыдущих этапах являются исходными данными для задач на следующих этапах, но и наоборот – результаты решения задач на следующих этапах являются исходными данными для задач на предыдущих этапах (рис.3б). Кроме того, при планировании сетей 3/4/5С, в отличие от планирования сетей 2G, значительно усложнился учет параметров трафика и его распределения в пространстве (рис.4), а также параметров нестационарности условий распространения радиосигнала (рис.5). Указанные особенности планирования широкополосных сетей были впервые выделены и учитывались еще в период активного внедрения сетей 3G [5].

В связи с отмеченными выше отличительными особенностями планирования сетей мобильной связи поколений 3/4/5G и для упрощения учета большого количества взаимосвязанных параметров, в процессе планирования сетей 3/4/5G можно выделить этапы, показанные на рис.6, которые отличаются от этапов планирования сетей 2G (рис.3а).

Приведенные на рис.6 этапы расчетов составляют основу комбинированной методики планирования сетей 3/4/5G. Для ускорения расчетов в методике реализован адаптивный алгоритм управления точностью расчетов и временем получения результата с использованием геоинформационных технологий. В зависимости от имеющегося времени для расчетов может быть получен результат с соответствующей точностью в заданной области пространства [6, 7].

Анализ последовательности решаемых задач на каждом этапе комбинированной методики планирования сетей 3/4/5G позволил на основе методов оптимизации, впервые представленных в [8], разделить их на три (совместно влияющих на итоговое время расчетов) вложенных уровня, отличающихся классами используемых алгоритмов принятия решения (рис.7).

Верхний уровень включает решение следующих задач: определение состава и пределов управляемых (варьируемых) параметров (мест размещения и параметров режимов работы БС и мобильных станций пользователей), состава и пределов изменения внешних факторов (мешающих станций и условий распространения радиоволн), цели расчетов и критериев пригодности промежуточных решений.

2G 3/4/5G 1. Учет случайных колебаний 1. Учет случайных колебаний уровней сигналов и помех • задание требований к отношению сигнал / помеха (E/N) уровней сигналов и помех с различным запасом для различных типов трафика, задание требований к отношению сигнал / помеха с фиксированным скоростей передачи, скоростей движения МС запасом • введение поправок для учета разнесенного приема, автоматической регулировки мощности, мягкой эстафетной передачи (Soft handover) 2. Учет случайных колебаний количества активных 2. Учет случайных колебаний количества активных пользователей пользователей и скорости передачи • задание требований к количеству каналов, скорости и • задание требований к количеству мошности передачи с запасом каналов с фиксированным • расчет вероятности отказа из-за недостатка мощности запасом или превышения уровня помех a) б) **Рис.5.** Соотношение учитываемых параметров нестационарности условий РРВ и нагрузки в сетях 2G и 3/4/5G

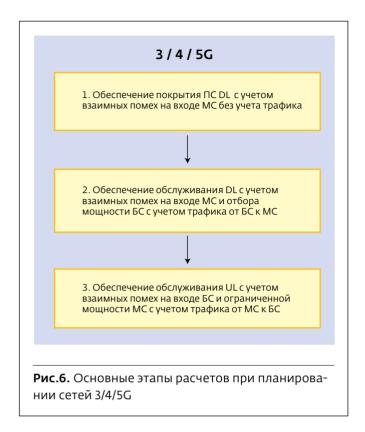
Средний уровень включает решение следующих задач: выбор и реализация правила (последовательности) перебора варьируемых параметров и учитываемых внешних факторов.

Нижний уровень включает решение следующих задач: вычисление частных показателей качества функционирования БС и МС при выборе очередных перебираемых параметров.

Следует отметить, что в общем случае при расчетах на нижнем уровне также можно выделить три вложенных уровня, подобных описанным выше, что указывает на методологическую общность приведенного разложения, характерного

для моделирования любых сложных иерархических систем.

Оптимизация алгоритмов выбора на верхнем уровне является наиболее сложной, поскольку затрагивает слабо формализуемые предпочтения выбора лиц, принимающих решения. Поэтому на данном уровне для повышения эффективности выбора используются геоинформационные технологии в виде объемных тематических карт, удобных диалоговых оболочек, позволяющих получать наглядную (преимущественно графическую) информацию о распределении множества значений исходных данных и результатов



по территории и в пространстве [6, 7]. На данном уровне в качестве исходных данных могут использоваться результаты предварительных расчетов выбранных показателей качества связи при отдельных значениях перебираемых параметров с ограниченным учетом внешних факторов. К исходным данным можно отнести: карты уровней электромагнитного поля, карты границ зон действия БС, карты распределения нагрузки, точки размещения источников помех, карты уровней электромагнитного поля помех и т.п., а также результаты выбора части варьируемых параметров на предшествующих циклах решения задачи.

На среднем уровне для оптимизации алгоритмов перебора варьируемых параметров в общем случае могут быть использованы известные методы математического программирования. При этом основная сложность выбора подходящего алгоритма заключается в необходимости учета многоэкстремальности зависимостей оцениваемых показателей качества сетей мобильной связи от перебираемых параметров и пространственного размещения БС. В худшем случае приходится использовать алгоритмы полного перебора. Но и в этом случае можно заметно повысить эффективность поиска за счет выбора локальных областей поиска, начальной точки,

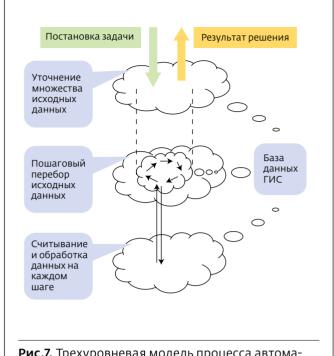


Рис.7. Трехуровневая модель процесса автоматизированного планирования сетей мобильной связи с использованием геоинформационных технологий (ГИС)

траектории перебора, условий остановки и перехода в другую область. На данном уровне принятия решения геоинформационные технологии позволяют создать удобный графический интерфейс для интерактивного управления перебором путем вмешательства человека в динамическое изменение условий остановки и продолжения поиска при реализации, например, метода ветвей и границ.

На нижнем уровне оптимизация алгоритмов вычисления очередного значения варьируемых параметров заключается в сокращении времени выборки и преобразования исходных данных в искомый результат. В простейшем случае расчет сводится к выборке из массива данных результата, адресом которого является совокупность исходных параметров. При этом оптимизация алгоритма вычисления заключается в оптимизации структуры базы данных геоинформационной системы и пользуемых процедур считывания. В более сложном случае, как уже упоминалось выше, расчет может разрастись в переборную задачу, включающую опять-таки три уровня: уточнения множества влияющих на результат факторов, перебора их значений и вычисления промежуточных характеристик.

В общем случае критерием пригодности функциональной и топологической структур СМС является прогнозируемая возможность совместного функционирования всех ее составных элементов в целом с заданными системными показателями качества и эффективности.

На верхнем уровне в результате декомпозиции обобщенных требований к СМС на отдельные требования к местам размещения БС можно выделить три группы требований к последним [8]: реализуемость размещения БС; осуществимость заданных связей БС; устранимость мешающих воздействий на БС. Первая группа требований определяет условия реализуемости физической доставки и установки БС в анализируемой точке в заданные сроки в заданных режимах работы. Вторая группа требований определяет условия пригодности требуемых интервалов связи в заданных режимах работы. При этом критерием пригодности является допустимость ослабления радиоволн, вызываемого рельефом местности, или допустимость надежности связи по замираниям. Третья группа требований определяет условия отсутствия мешающих (в основном электромагнитных) воздействий как новых БС на существующие, так и наоборот.

На среднем уровне сформулированные выше критерии могут использоваться для реализации интерактивного метода ветвей и границ, в соответствии с которым исключается проверка пригодности мест размещения БС по i+1-критерию при отсутствии пригодности по i-критерию. При этом на нижнем уровне вычисляются показатели, используемые для принятия решений о пригодности очередного участка по каждому из указанных выше критериев.

Для гарантированной оценки пригодности мест размещения БС целесообразно использовать энергетический критерий, основанный на граничных оценках величины ослабления радиоволн, а также на достоверно известных энергетических характеристиках БС и МС. Для сокращения времени расчета ослабления радиоволн рельефом местности можно использовать адаптивно-игровой подход, упорядочивающий граничные оценки на наихудший случай в зависимости от состава (объема) исходных данных, уточняемого в зависимости от выделяемого времени для расчетов. При этом при расчете ослабления на интервалах полезной связи используются нижние границы (минимальный уровень сигналов), а на интервалах мешающей связи - верхние (максимальный уровень помех).

В целом, проведенные исследования показали, что за счет использования предлагаемых

алгоритмов управления структурной динамикой сетей мобильной связи с использованием геоинформационных технологий возможно снижение сроков принятия решений в несколько раз при сохранении гарантированной точности прогнозирования показателей качества функционирования сетей мобильной связи.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. **Цвиркун А.Д.**, **Акинфиев В.И.** Структура многоуровневых и крупномасштабных систем (синтез и планирование развития). М.: Наука, 1993.
- 2. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006.
- 3. Зайчик Е.М., Охтилев М.Ю., Соколов Б.В. Комбинированные методы и модели управления развитием мобильных информационных технологий и систем // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2007). М.: ИПУ РАН, 2007. С. 229-236.
- 4. Одоевский С.М., Калюка В.И., Степаненко В.В. Оптимизация распределения частотно-энергетических ресурсов сети широкополосного радиодоступа с использованием граничных оценок // Сборник трудов XXII Международной научно-технической конференции "Радиолокация, навигация, связь" (Воронеж, 19-21 апреля 2016 г.). Т.2. Воронеж, 2016. С. 490-499.
- 5. Одоевский С.М., Василевич Е.В., Клюев А.Б. Особенности планирования сетей мобильной связи с кодовым разделением каналов при помощи программного комплекса ONEPLAN RPLS-CDMA // Сети мобильной связи: планирование, оптимизация, управление: сборник статей. СПб: СПБГУТ-ИА "Энергомашиностроение", 2007. С. 35-40.
- 6. Одоевский С.М., Степанец В.А. Программные средства планирования и оптимизации сетей подвижной и фиксированной связи // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2010. № 2. С. 28–31.
- 7. **Зайчик Е.М.** Применение объемной тематической карты для планирования сети IoT // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2017. № 8. С. 22–31.
- 8. Зайчик Е.М., Одоевский С.М. Оптимизация алгоритмов планирования сетей связи с использованием геоинформационных технологий // Модели и методы исследования информационных сетей: сборник статей. Вып. 1. СПб: Тема, 1999. С. 77-80.