

# Планирование расположения базовых станций UMTS: модели оптимизации с управлением мощности и алгоритмы

## Введение

С экстраординарным развитием услуг мобильной связи, провайдеры услуг инвестируют огромные средства в сетевую инфраструктуру. Из-за высокой стоимости и дефицита радио ресурсов точное и эффективное планирование мобильной сети становится очень важным. С быстрым ростом масштабов сети и числа пользователей, необходимыми стали эффективные количественные методы определения положения базовых станций (БС). С появлением сетей третьего поколения, таких как Универсальная Система Мобильной Связи (universal mobile telecommunication system, UMTS) данная потребность еще более возросла из-за усложнения системы и увеличения числа параметров, которые должны быть рассмотрены [1]–[3].

Проблема планирования сотовых систем второго поколения, основанных на множественном доступе с временным уплотнением (TDMA), обычно упрощалась разделением на две проблемы: проблему планирования покрытия и проблему частотного планирования, которая управляется покрытием и, соответственно, критерием емкости [1], [3], [4]. В фазе планирования покрытия БС располагаются таким образом, чтобы мощность сигнала была достаточно высокой в зоне обслуживания [5]–[9]. Данный шаг только использует модели распространения, такие как, например, модель Хата, для прогнозирования уровней сигнала (см., например, [10]). В фазе частотного планирования для каждой БС должен быть назначен набор каналов, принимая во внимание требования по трафику и качество обслуживания, измеренное как отношение сигнал-шум (signal-to-interference ratio, SIR).

Для широкополосного кодового разделения каналов (WCDMA) в воздушном интерфейсе UMTS, описанный двухфазный подход главным образом не соответствует, потому что пропускная способность разделена между всеми активными соединениями и никакого фактического частотного назначения строго не требуется. Схема доступа позволяет более гибко использовать радио ресурсы, и емкость каждой ячейки (например, число соединений) заранее не ограничена фиксированным назначением каналов как в TDMA системах, но она зависит от фактических уровней помех, которые определяют достижимые значения SIR. Поскольку эти значения зависят и от распределения трафика и от расположения БС, позиционирование БС в сетях UMTS не может основываться только на зоне обслуживания, но и должно обосновываться емкостью сети. Действительно, уровни помех являются функциями излучаемой мощности, которая, из-за механизма управления мощностью (Power Control mechanism, PC), зависит от положения мобильных станций. Так как мощность, излучаемая передатчиком, ограничена, то мобильные станции, находящиеся слишком далеко от БС, могут не достичь минимального уровня SIR из-за слишком высокого уровня помех. Таким образом, площадь фактически покрываемая каждой БС тесно связана с распределением трафика и ее размер может изменяться с изменением уровня помех (это называется эффектом «дышащей» соты). Стоит подчеркнуть, что, так как уровни помех зависят как от соединений внутри данной соты, так и от подключений в соседних ячейках, значения SIR и емкость тесно связаны с распределением трафика во всей зоне обслуживания.

Стадия планирования сотовых сетей обычно требует вводные данные о зоне обслуживания: 1) список возможных мест, в которых могут быть установлены БС; 2) распределение трафика, оцененное эмпирическими прогностическими моделями; 3) описание распространения сигналов, основанное на аппроксимированных моделях радио каналов или методах трассировки лучей. Основной целью планирования является выбор мест для установки БС с учетом таких различных аспектов, как стоимость, качество сигнала и зона обслуживания.

Как мы покажем в разделе II, на данный момент проделана небольшая работа по оптимизации местоположений БС в сетях UMTS, и, как нам уже известно, ни одна из предложенных моделей адекватно не рассматривает воздействие распределения трафика, требования к качеству сигнала и механизм управления мощностью. В данной статье, мы предлагаем и исследуем дискретные модели оптимизации, направленные на поддержку решений о местах размещения новых БС в процессе планирования. Наши модели отличаются по тому, как близко они охватывают особенности ограничения качества сигнала и механизм управления мощностью в воздушном интерфейсе WCDMA сетей UMTS. Суть при этом заключается в восходящем направлении (от мобильной станции к БС),

который оказывается самым строгим с точки зрения пропускной способности для полнодуплексных сбалансированных соединений, таких как голосовой трафик (см., например, [13] и [14]). Модели для нисходящего направления представлены в [15] и [39].

В разделе II мы обсуждаем главные проблемы планирования радиосети, относящиеся к расположению БС UMTS и комментируем предыдущие работы. В разделе III мы предлагаем и анализируем математически программируемые формулировки этой общей проблемы для настройки WCDMA, рассматривая два общих способа моделирования механизма управления мощностью. В разделе IV мы описываем три метода, позволяющих решить задачу: случайный «жадный» и обратный «жадный» алгоритмы, а также алгоритм запрещенного поиска (tabu search, TS algorithm). Вычислительные результаты с реалистичными образцами сообщаются и обсуждаются в разделе V. Наконец, в разделе VI содержатся некоторые заключительные замечания. Предварительные версии части этой работы были представлены в [16] и [17].

## II. Проблемы радио планирования для UMTS

UMTS [18] является системой третьего поколения мобильной связи, стандартизированная ETSI, Европейским Институтом Телекоммуникационных Стандартов, и также рассматривается ITU (Международным Союзом Телекоммуникаций) среди стандартов для Международного стандарта мобильной телефонии семейства IMT-2000.

Одна из двух схем доступа, которая используется в выделенном спектре, основана на WCDMA и частотном разделении при организации двусторонней связи. Главная характеристика CDMA - ее гибкость при использовании радио-ресурсов. В частности, нет априорного ограничения на число одновременных соединений в ячейке (жесткая емкость), как в системах TDMA, и ресурсы динамически выделяются согласно уровням интерференции и распределению трафика (мягкая емкость)[13]. Однако, это подразумевает увеличение сложности процесса сетевого планирования и использования большего количества процедур контроля доступа. Поэтому, специализированное планирование и стратегии оптимизации для технологии CDMA фактически требует эксплуатировать эту дополнительную гибкость [3].

Расширяющие коды, используемые для сигналов, передаваемых в downlink одной БС, являются взаимно ортогональными, тогда как коды используемые для сигналов, излучаемых различными станциями (базовой или мобильной), могут рассматриваться как псевдослучайные из-за скремблирования [19]. В идеальном пространстве процесс сжатия на приемной стороне может полностью избежать интерференции ортогональных сигналов и снизить ее воздействие для неортогональных так называемым коэффициентом расширения, (SF), который является отношением между скоростью распространения сигнала и скоростью пользователя. В беспроводной среде, из-за многолучевого распространения, интерференцию ортогональных сигналов невозможно избежать полностью и коэффициент сигнал-шум (signal-to-interference ratio, SIR) рассчитывается как

$$SIR = SF \frac{P_{received}}{\alpha I_{in} + I_{out} + \eta}$$

где  $P_{received}$  – мощность, принятого сигнала,  $I_{in}$  – суммарная мощность сигналов, переданных одной БС,  $I_{out}$  – суммарная мощность сигналов от соседних БС,  $\alpha$  – коэффициент потери ортогональности ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ),  $\eta$  – мощность теплового шума. В случае рассмотрения uplink канала, ни о какой ортогональности речи не идет и  $\alpha=1$ .

С тех пор, как качество принятого сигнала, обычно выраженное в степени частоты появления ошибочного бита (bit error rate), обычно главным образом зависит от SIR, часто рассматривают ограничения качества, требующие, чтобы SIR превысил минимальное значение, которое, возможно, будет различным в зависимости от рассматриваемой услуги (голос, видео, пакетные данные и т.п.). В дальнейшем, для простоты рассуждений, будем считать минимальный SIR перед сжатием как

$$SIR_{min} = \frac{\tau}{SF}$$

В обычно принимаемых упрощенных моделях полагают, что влияние соседних ячеек  $I_{out}$  может быть представлено в виде доли  $f$  влияния дополнительных передатчиков в рассматриваемой соте, поэтому SIR можно представить в виде

$$SIR = \frac{P_{received}}{I_{in}(1 + f)}$$

где исключен тепловой шум, так как считается, что его мощность много меньше мощности взаимных помех сигналов внутри соты. Такое упрощение допустимо и точно, когда распределение трафика между ячейками является однородным, и недопустимо во всех остальных случаях, когда уровень помех от соседних БС является различным в каждой соте. Как правило, значение  $f$  рассматривается в диапазоне 0,3-0,5.

## **А. Управление мощностью и ограничение емкости**

Как отмечалось выше, SIR зависит от мощности принятого сигнала и от взаимного влияния сигналов, которое в свою очередь зависит от мощности передатчика и от ослабления в радиоканале. В соответствии с условиями распространения, мощность передаваемого сигнала может корректироваться механизмом управления мощностью, чтобы снизить взаимное интерференцию и гарантировать качество. Обычно рассматриваются два механизма управления мощностью: первый основан на мощности принятого сигнала, а второй – на оценке SIR. В первом случае, передаваемая мощность выбирается таким образом, чтобы мощность, принятая в каждом канале, равнялась заданному значению  $P_{target}$ . Аналогично, во втором случае, значение передаваемой мощности устанавливается так, чтобы SIR был равен определенному  $SIR_{target}$ . Последний механизм, принятый для выделенных каналов в UMTS, является более сложным, потому как мощность излучения каждой станции зависит от мощности излучения всех остальных, но и более эффективным, поскольку позволяет использовать меньшие мощности. Таким образом, от планирования перспективного механизма управления мощностью, подразумевающего первый вариант управления, вместо второго, основанного на SIR, можно достичь заниженных размеров соты, что может позволить выделить больше радио ресурсов, чем необходимо.

С точки зрения планирования, эффектом от установления границ по мощности и ограничений SIR является предел емкости системы. В существующей схеме управления мощностью, основанной на контроле излучаемой мощности, при появлении новых пользователей в системе, значение SIR для всех остальных пользователей снижается до тех пор, пока не опустится ниже предельно допустимого значения  $SIR_{min}$ . После этого ни один новый пользователь не сможет быть обслужен. В существующем механизме, основанном на контроле SIR, качество сигнала гарантируется удержанием значения SIR на постоянном уровне,  $SIR_{target} \geq SIR_{min}$ . Когда добавляются новые пользователи, излучаемая мощность, требуемая для удержания SIR на заданном уровне, увеличивается до тех пор, пока не превысит допустимого предела, и, следовательно, SIR опустится ниже требуемого значения. В обоих случаях управления мощностью, емкость зависит от расположения пользователя и от условий распространения сигнала. Действительно, емкость зависит от взаимных помех, сгенерированных на линии «пользователь-БС», которые в свою очередь зависят от излучаемой мощности, которая тесно связана с относительным положением пользователя и условиями распространения в радио канале. Поскольку, каждый канал «пользователь-БС» оказывает влияние на другие сигналы не только внутри своей ячейки, но и в соседних, то это как будто каждый пользователь, участвующий в соединении, «поглощает» часть емкости всех БС.

## **Б. Обзор работ по данной тематике**

Классические модели оптимизации покрытия не рассматривают ограничения SIR, а только ограничения на уровень принимаемой мощности в зоне обслуживания. В [22] распределение трафика описывается средствами *узлов запроса*, которые представляют центр зоны, характеризующейся данным запросом трафика (обычно выраженного в Эрлангах). Используя характеристики узлов запроса, проблема покрытия тогда определяется рассмотрением уровня сигнала в каждом узле от всех БС и требованием, что хотя бы один из уровней будет выше заданного порогового значения. Общая цель процесса оптимизации заключается в определении наименьшего множества БС, покрывающих все узлы требования (см. [6] и [7]). В [23] и [24] ограничения величины трафика также добавляются для каждой БС. Различные модели покрытия приняты в [5], где положение передатчиков выбираются из непрерывного трехмерного пространства так, чтобы минимизировать сумму потерь на распространение соединений для всех передатчиков.

Несколько недавних работ посвящены вопросам сетевого планирования систем CDMA и частично UMTS. Однако, некоторые из них все еще полагаются на классические подходы в

рассмотрении покрытия. В [25] рассматривается простая модель, основанная на проблеме минимального доминирующего множества, в то время как в [26] пропускная способность также принимается во внимание и конечная классическая проблема, связывающая емкость и местоположения средства решается с помощью TS алгоритма. В [27] принимается другой подход. Максимальное независимое множество вершин определяется в графе, в котором вершины представляют возможные сайты, а грани соответствуют парам сайтам, чьи БС имели бы слишком большие зоны перекрытия.

В [28] предлагается упрощенная модель расположения БС в сетях UMTS, основанных на CDMA, которая частично принимает во внимание интерференцию и представляется полиномиальная схема аппроксимации времени. Однако, рассматривается только интерференция внутри ячейки, в то время как критический аспект интерференции между базовыми станциями упущен. Как мы увидим в разделе III-A, даже если межъячеечная интерференция предполагается равной ненулевой доле внутри-ячеечной интерференции, в случае рассмотрения восходящего канала, каждое количество ограничений интерференции налагает простую верхнюю границу на максимальное число активных соединений с передающей БС.

### **III. Модели расположения БС**

Поскольку, насколько нам известно, некоторые критические положения проблемы планирования UMTS сетей не были еще охвачены, мы предлагаем и исследуем различные модели математического программирования для вопроса расположения БС UMTS, которые учитывают межъячеечную интерференцию для ограничения SIR и для механизма контроля мощности. Как упоминалось предварительно, основная суть здесь заключается в восходящем направлении соединения как для механизма, основанного на принимаемой мощности, так и основанном на SIR.

В данной работе, мы делаем два упрощающих предположения. Во-первых, мы считаем, что каждое подключение присваивается одиночной БС. Поэтому, мы явно не объясняем мягкий хэндовер, который позволяет мобильному терминалу быть одновременно подключенным к нескольким БС. Стоит отметить, однако, что наше предположение придерживается консервативной точки зрения в планировании, так как мягкий хэндовер имеет тенденцию увеличивать SIR. Простой способ объяснить данную особенность – ввести дополнительную границу для ограничения SIR (например, выбрать ниже  $SIR_{min}$ ). Во-вторых, мы предполагаем, что число расширяющих кодов выше числа соединений, присвоенных любой БС. Это предположение четко выполняется в восходящем направлении, так как там очень большое число неортогональных кодов. (В нисходящем направлении где используется наибольшее число ортогональных кодов, стандартное количество элементов ограничения может быть легко добавлено в модель).