

Анализ эффективности доступа с разделением времени в опорных сетях 5G миллиметрового диапазона

Р. Е. Иванов*, М. С. Дудин†

* *Институт Проблем Управления РАН им. Трапезникова,
ул. Профсоюзная, д.65, Москва, Россия, 117997*

† *Московский Физико-Технический институт (Государственный
Университет),*

*Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9,
141701*

Аннотация. В статье рассматриваются варианты построения опорной сети 5G на базе mesh-сети миллиметрового E-диапазона радиоволн. Описывается возможность использования технологии MIMO, обеспечивающей формирование сразу нескольких разнонаправленных лучей, а также возможность частотного дуплексирования, позволяющего каждой станции mesh-сети одновременно осуществлять и приём, и передачу. Рассматривается структура суперкадра и схема TDMA доступа к среде для разрабатываемой mesh-сети. Описывается решение задачи распределения частотно-временных ресурсов в опорных сетях миллиметрового E-диапазона с использованием графового подхода и приводится эвристический алгоритм повышения эффективности этого распределения.

Ключевые слова: 5G, опорная сеть, mesh-сеть, мм-диапазон радиоволн, FDD, TDMA, теория графов.

1. Введение

Широкополосные беспроводные сети нового, пятого поколения (5G), внедрение которых ожидается к 2020 г., стали в настоящее время одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. Основным отличием сетей этого класса от беспроводных сетей предыдущих поколений является многократное повышение пропускной способности в связи с лавинообразным ростом передаваемой информации, возможность одновременного обслуживания большого количества соединений, связанное с появлением таких новых технологий, как Интернет вещей (IoT) и интеллектуальные транспортные системы (VANET), повышение качества и предоставление целого ряда новых услуг, среди которых виртуальная и дополненная реальность (Virtual/Augmented Reality).

В рамках создания сетей 5G особое внимание уделяется возможности использования миллиметрового диапазона радиоволн, в частности, E-диапазона (71–76 ГГц, 81–86 ГГц). В отличие от дефицитного

сантиметрового диапазона, в котором функционируют существующие широкополосные беспроводные сети, с жестким ограничением на ширину частотной полосы, миллиметровый диапазон обеспечивает возможность выделения широких полос частот (до 10 ГГц) и, соответственно, сверхвысокую скорость беспроводной передачи информации (до 50 Гбит/с).

Другими преимуществами систем передачи информации в этом диапазоне являются:

- создания многоэлементных антенных систем;
- свойственное данному диапазону быстрое затухание радиоволн и узкая направленность антенных систем позволяет увеличить спектральную эффективность за счёт пространственного переиспользования частот (значительно упрощает решение задачи частотного планирования);
- возможность создания систем связи, обеспечивающих скрытность связи (необнаруживаемость) и целостность (стойкость к прицельным помехам и несанкционированным подключениям).

В связи с описанными преимуществами в последние годы появилось значительное количество работ, посвященных исследованию вариантов построения сетей 5G в миллиметровом диапазоне радиоволн [1–3]. В настоящей статье, являющейся развитием работ авторов [4], рассматриваются варианты построения опорной сети 5G на базе mesh-сети миллиметрового E-диапазона радиоволн. Описывается возможность использования технологии MIMO, а также возможность частотного дуплексирования, позволяющего каждой станции mesh-сети одновременно осуществлять и прием и передачу. Рассматривается структура суперкадра и схема TDMA доступа к среде для разрабатываемой mesh-сети. Поставлена и решена задача распределения частотно-временных ресурсов в опорных сетях E-диапазона радиоволн, сформированная в терминах теории графов. Приводится эвристический алгоритм решения этой задачи, обеспечивающий повышение эффективности распределения ресурсов сети.

2. Принципы построения опорных сетей в E-диапазоне радиоволн

Любая технология связи, используемая в качестве опорной сети в сотовых сетях пятого поколения, обязана предоставлять сотовой сети сервис передачи данных, совместимый с требованиями, предъявляемые к сотовой сети в целом. На данный момент организация ITU IMT-2020 (5G) Promotion Group выделила ряд требований к сетям 5G [5], среди которых:

- спектральная эффективность: 45 bps/Hz
- плотность трафика: 100 Tbps на квадратный километр
- число подключений: 1 миллион устройств на километр
- минимальная скорость на абонента: 100 Mbps

— задержка: меньше 1 мс

Схожие требования предлагает также один из основных разработчиков сотовых сетей 5G - Samsung Electronics Co. [6]

Помимо обслуживания традиционных полнофункциональных базовых станций сотовой сети (в терминологии LTE называемых evolved Node B или eNB), формирующих распределенную сеть радиодоступа (Distributed Radio Access Network, D-RAN) и подключаемых к ядру операторской сети по соединениям, называемым backhaul, опорная сеть должна обеспечивать создание централизованных сетей радиодоступа (Centralized Radio Access Network, C-RAN) [1]. В таких сетях часть функций обработки сигналов переносится на устройства BBU (Base Band Unit), к каждому из которых подключается несколько более дешевых устройств RRU (Remote Radio Unit), которые используются для непосредственного подключения абонентов. Соединения между RRU и BBU называются fronthaul (см. рис. 1). Эти соединения, с одной стороны, в среднем короче, чем backhaul, однако имеют более жесткие требования к задержке и ее вариации (джиттеру).

Из приведенных требований следует, что опорная сеть обязана предоставлять пропускную способность не менее 1 Gbps каждой станции сотовой сети, обслуживающей не более 10 абонентов, и пропускную способность свыше 5-10 Gbps для традиционных базовых станций, поддерживающих подключение большего числа абонентов. Также необходимо учитывать высокое число малых базовых станций сотовой сети, без которых будет невозможно обеспечить высокую плотность трафика и подключений, которые будет необходимо подключить с помощью опорной сети к ядру сотовой сети. Эти требования и особенности делают миллиметровый E-диапазон наиболее целесообразным решением для создания опорной широкополосной беспроводной сети, обеспечивающей подключение базовых станций сотовой сети 5G.

Жесткие требования к задержкам передачи данных, в особенности обслуживании fronthaul-соединений, затрудняют использование стандартных схем доступа к среде на основе CSMA/CA, широко используемых в сетях сантиметрового диапазона. Для обеспечения низких задержек целесообразно использовать схемы доступа, основанные на планировании доступа к радиосреде, в которых значительно снижается вероятность коллизий и, как следствие, потери пропускной способности и увеличения задержек и их вариаций из-за повторных передач кадров. В качестве схемы доступа можно использовать комбинацию Spatial TDMA (STDMA) для разделения времени между передачами соседним станциям, и схему частотного дуплексирования FDD для создания симметричных каналов связи. Помимо минимизации числа коллизий, STDMA позволяет организовать передачи данных по многоточечным соединениям, поочередно формируя луч для связи с соседними станциями опорной сети.

В настоящей работе предлагается использовать в качестве опорной сети для подключения базовых станций сотовой сети пятого поколения самоорганизующуюся MESH-сеть миллиметрового E-диапазона радиоволн [4]. Такая сеть формируется из равноправных станций, которые самостоятельно подключаются к сети, сканируют эфир, создают и поддерживают соединения с другими станциями сети. Соединения в mesh-сети бывают как одношаговые, так и многошаговые, построение и управление которыми осуществляется с помощью протоколов маршрутизации и распределения нагрузки. Mesh-сети обладают высокой надежностью за счет резервирования соединений, имеют низкую стоимость и высокую скорость развертывания. В качестве схемы доступа в предлагаемой сети используется Spatial TDMA и частотное дуплексирование, а передача данных станциями осуществляется согласно расписаниям. Следует отметить, что базовые станции сотовой сети могут подключаться к станциям mesh-сети как с использованием проводных/беспроводных интерфейсов, так и быть реализованными с ними в одном корпусе.

Использование частотного дуплексирования FDD позволяет увеличить пропускную способность за счет формирования симметричных каналов связи между соседними станциями. При этом каждая станция mesh-сети выбирает, в какой полосе частот ей вести передачу, а в какой - принимать. В зависимости от сделанного выбора станция попадает в одну из двух групп. Станции из одной группы, использующие одни и те же полосы для передачи (соответственно, и для приема), не могут формировать соединения. Первоначальный выбор частот производится станцией при подключении к сети, однако в дальнейшем он может быть изменен. При переназначении частоты хотя бы одной станции, топология сети изменяется. Это свойство будет использовано в дальнейшем для оптимизации распределения частотно-временных ресурсов сети.

В качестве схемы множественного доступа к среде выбрана STDMA, так как она обеспечивает минимизацию числа коллизий и, в то же время, соответствует принципу работы антенных систем: радиосигнал в E-диапазоне является узконаправленным и для подключения к соседней станции антенне необходимо отклонять сформированный луч в нужном направлении. При этом вся полусфера вокруг станции делится на сектора, ширина и высота которых равны ширине и высоте луча соответственно. Антенные массивы, состоящие из небольшого числа элементов, способны излучать сигнал только в один сектор одновременно и если станции находятся в разных секторах, то связаться с ними можно только в различные интервалы времени.

Следует отметить, что при использовании более дорогих антенн технологии massive MIMO, станция приобретает возможность формировать сразу несколько разнонаправленных лучей, позволяя частично или полностью преодолеть описанное выше ограничение. Узконаправленность сигнала и быстрое затухание позволяют в полной мере реализовать пространственное переиспользование полосы частот, позволяя

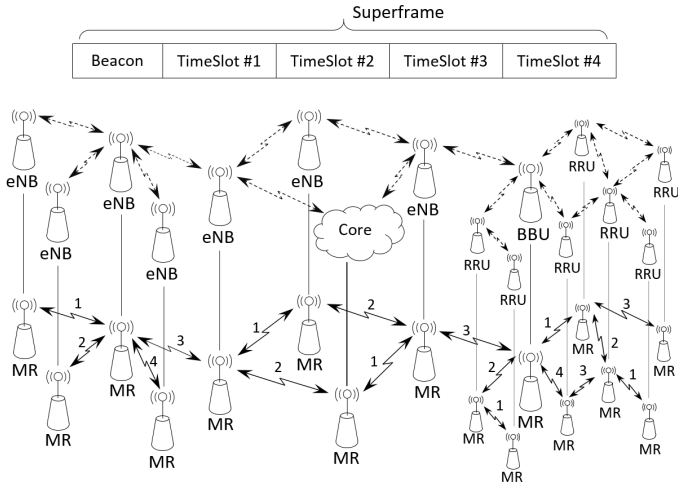


Рис. 1. График зависимости среднего числа станций, которые необходимо перекрасить, от числа станций в сети

разным станциям передавать сообщение на одной частоте и в одно время.

Согласно схеме **STDMA**, все время работы сети разбивается на суперкадры (см. рис. 1). Каждый суперкадр начинается со специального **beacon**-интервала, предназначенного для сканирования эфира и формирования соединений, за которым идет последовательность слотов. Каждой станции для связи с соседями назначаются номера слотов. В каждом слоте любая станция ведет передачу не более, чем одному соседу. Назначение номеров слотов соединениям называется расписанием. Если топология сети не изменяется, расписание повторяется в последовательных суперкадрах.

Использование расписаний для разделения передачи данных по разным соединениям позволяет значительно снизить риск коллизий, сократить вариацию задержки, а также гарантировать выделение заданной пропускной способности соединениям. В то же время, в этой схеме возможен простой станций в том случае, если число соединений от станции к станции сети сильно различается: если каждому соединению выделяется по одному слоту в расписании, то число слотов определяется станциями, имеющими наибольшее число соединений. При этом станции, у которых соседей меньше, будут вести передачу в меньшем числе слотов, а в неиспользованных слотах эти станции будут простаивать, из-за чего будет происходить потеря общей пропускной способности. Существует несколько подходов к решению этой проблемы:

1. распределение свободных слотов между имеющимися соединениями
2. изменение топологии сети для сокращения вариации числа соединений

Первый подход может быть просто реализован, однако может вести к образованию “бутылочного горла”, если не использовать его совместно с механизмами балансировки нагрузки. В настоящей статье предлагается использовать второй подход – метод изменения топологии сети с помощью смены частот на отдельных станциях для минимизации числа “пустующих” слотов. Для формальной постановки задачи, описания и анализа алгоритма требуется ввести формальную математическую модель сети. В следующем разделе задача будет сформулирована с использованием графового подхода.

3. Графовая модель опорной mesh-сети

Пусть заданы местоположения всех станций mesh-сети, и для каждой пары станций известно, будет ли между ними существовать соединение, если этим станциям назначить соответствующие частоты приема/передачи. Построим граф $G = (V, E)$, который будет использоваться для получения реальных топологий mesh-сети. Для этого поставим во взаимнооднозначное соответствие совокупности станций множество вершин V , а множество ребер E образуем из тех и только тех пар вершин (u, v) , между прообразами которых (то есть станциями mesh-сети) будет существовать соединение при соответствующем назначении станциям частот, и это соединение будет отвечать заданным при настройке сети параметрам, таким как пропускная способность, надежность, задержка. Любую допустимую топологию mesh-сети на заданных станциях можно описать в виде остова графа $G = (V, E)$.

В предлагаемой архитектуре сети используется частотное дуплексирование с двумя полосами частот: в зависимости от того, какая полоса используется для приёма, а какая – для передачи, станцию можно отнести к одной из двух групп, при этом соединения могут существовать только между станциями разных типов. Так как в графе такой сети ребра будут соединять вершины из разных групп, такой граф по определению является двудольным. Таким образом, произвольная топология mesh-сети на заданных станциях описывается как остовный двудольный подграф $B = (V, E')$, $E' \subset E$ графа G .

Поскольку конкретная топология mesh-сети определяется назначением частот станциям, она будет зависеть от метрик, используемых при выборе частот станцией, подключаемой к сети. Например, новая станция может выбрать ту пару частот, которая позволит ей организовать наибольшее число подключений к соседям (жадный метод повышения связанности), выбирать частоты исходя из качества соединений или каким-то иным способом. Поскольку описание как самого

процесса подключения станции, так и используемых в нем метрик выходят за рамки настоящей статьи, будем считать, что подключаемая станция определяет частоты случайным равновероятным образом. Это позволяет считать все остовные двудольные подграфы B графа G равновероятными.

Построим расписание сети, то есть назначим каждому соединению интервал времени, в который она может передать сообщение. Для этого поделим период работы сети – суперкадр – на T временных слотов (структура отображена на рис. 1). Для построения расписания необходимо назначить каждому соединению свой номер слота, в котором станция сможет передать данные соседу. Данную задачу можно сформулировать как задачу рёберной раскраски графа. Для этого определим в качестве цвета ребра номер временного слота. Хотя в общем случае задача реберной раскраски графа NP-полна, для двудольного графа она оказывается полиномиальной: согласно теореме Визинга, $T = D = D(B) = \max_{v \in V} deg(v)$. Для построения раскраски существует ряд полиномиальных алгоритмов, например – алгоритм Гэбоу [7, 8].

Во время работы сети состав станций и связи между ними могут меняться. При этом если возникает необходимость выбора частотного режима, станция старается максимизировать число связей с соседями. К сожалению, такая схема приводит к необходимости оптимизировать все расписание. В следующей главе поставлена и решена задача максимизации пропускной способности.

4. Задача максимизации пропускной способности mesh-сети

Как было показано в конце раздела 2, из-за различного числа соседей некоторые станции не смогут использовать все время работы для передачи данных: станции, у которых меньше соединений, будут использовать лишь те слоты, которые им назначены, а в остальное время (когда станции с большим числом соседей будут продолжать вести передачу) будут простаивать. Эта потеря пропускной способности происходит на тех станциях, число соединений которых меньше числа слотов. В терминах двудольного графа сети B , потеря происходит на вершине $v \in V$, для которой $d = deg(v) < D$, и составляет $D - deg(v)$. Таким образом, суммарное число потерянных слотов – функция от графа B , которую можно определить как

$$M(B) = \sum_{v \in V} D(B) - deg(v) = N(D(B) - d_{mean}),$$

где N - число станций в сети, в d_{mean} - средняя степень вершины. Таким образом, потеря пропускной способности будет наименьшей на том подграфе B , для которого $\mu(B) = D(B) - d_{mean} \rightarrow \min$, наиболее близкому к регулярному графу.

Пусть \mathfrak{B}_G - множество всех связных остовных двудольных подграфов графа G . Задача поиска оптимального с точки зрения максимизации пропускной способности распределения частотных ресурсов в mesh-сети может быть сформулирована как задача поиска двудольного остовного подграфа B^* , для которого:

$$B^* = \arg \min_{B \in \mathfrak{B}_G} \mu(B)$$

Очевидно, что оптимальным с точки зрения приведенного критерия будет двудольный связный k -регулярный подграф, если он существует. К сожалению, уже ответ на вопрос о существовании такого подграфа является NP-полной проблемой [9]. Поэтому для поиска оптимальной топологии приходится использовать приближенные методы.

Вместо поиска оптимального графа B^* , поставим задачу улучшить пропускную способность существующей сети, описываемой графом B_0 . Для этого будем изменять частоты на некотором подмножестве станций. Предположим, что в сети изменяются назначения частот k станций. Измененной сети соответствует граф B_0^k , отличающийся от B_0 тем, что k вершин в нем находятся в другой доле. В случае, если $\mu(B_0) < \mu(B_0^k)$, сделанное изменение частот ведет к увеличению пропускной способности сети. Пусть $x(B) \in \{0, 1\}^N$ - вектор, поставленный в соответствие двудольному подграфу B : $x_i(B) = x_j(B)$ тогда и только тогда, когда вершины i, j находятся в одной доле. Пусть $\rho(x(B_1), x(B_2))$ - расстояние Хемминга между векторами, кодирующими графы B_1, B_2 . Используя введенные обозначения, можно утверждать, что $\rho(x(B_0), x(B_0^k)) = k$, то есть вектор, кодирующий граф сети, полученной изменением частот на k станциях, находится на расстоянии Хемминга от исходного графа, равном k .

Поскольку, как было отмечено в разделе 3, все двудольные связные графы $B \in \mathfrak{B}_G$ считаются равновероятными, расстояния Хемминга до ближайшего оптимального графа B^* (оптимум может достигаться на нескольких подграфах) будет различным для различных подграфов. Вместе с тем, можно говорить о среднем по всему множеству \mathfrak{B}_G расстоянии до оптимального подграфа, которое, очевидно, должно зависеть от числа станций сети N . Если K - это среднее расстояние, то разумно ограничиться изменением частот на не более, чем K станциях сети - в среднем, это приведет к оптимизации пропускной способности.

Поскольку $|\{B' \in \mathfrak{B}_G : \rho(B', B_0) \leq K\}| \sim O(N^K)$, целесообразно сократить количество станций, на которых изменяются частоты. Для этого помимо поиска среднего расстояния K до оптимальных графов, будем искать расстояния $K_\delta = 1/N \sum_{B \in \mathfrak{B}_G} \rho(B, B_\delta^*)$ до графов B_δ^* , для которых $\mu(B_\delta^*) - \mu(B^*) \leq \delta(\mu(B_0) - \mu(B^*))$, то есть среднее число станций, частоты на которых нужно сменить для того, чтобы уменьшить отличие от оптимума в δ^{-1} раз.

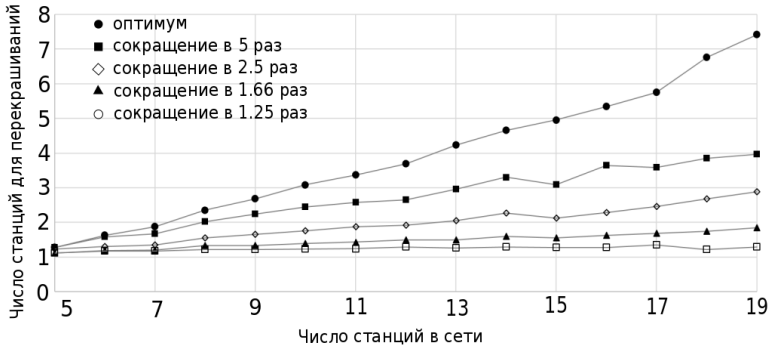


Рис. 2. Архитектура сети backhaul на основе mesh-сети мм-диапазона

5. Численное исследование

Для численного анализа предложенного метода была разработана программа на языке Python 3, которая позволяет генерировать произвольные mesh-сети с заданным числом вершин, вычислять значения метрики регулярности $\mu(B)$, находить оптимальный подграф B^* и находить число станций, на которых необходимо изменить частоты, для получения оптимального графа B^* , либо графа B_δ^* . Результаты численного исследования приведены на рис. 2: показана зависимость оптимального числа перекрашиваний K от числа базовых станций в сети, а также аналогичные зависимости K_δ для различных значений дельта, позволяющих добиться 5-, 2.5-, 1.66 и 1.25-кратного сокращения расстояния между данной и оптимальной топологиями. Как видно из рисунка, данные зависимости близки к линейным и при этом для того, чтобы прийти к оптимальной топологии, в среднем требуется в два раза больше перекрашиваний, чем для того, чтобы сократить расстояние до оптимума в 5 раз для сети, состоящей из 19 станций. Поиск оптимальной топологии может потребовать много времени, но можно добиться значительного увеличения производительности сети, ограничившись лишь 3 или 4 сменами частотного плана.

6. Заключение

В статье рассмотрены варианты построения опорной mesh-сети миллиметрового E-диапазона радиоволн. Построена графовая модель, позволяющая оптимизировать частотно-временные характеристики, а также топологию опорной сети. Предложен эвристический подход к отысканию квазиоптимальных решений. Приведены численные результаты исследования предложенного эвристического подхода.

Литература

1. M. Jaber, M.A. Imran, R. Tafazolli, A. Tukmanov, 5G Backhaul Challenges and Emerging Research Directions: a Survey. *IEEE Access*, 2016, Vol. 4, pp. 1743-1766.
2. Yong Niu, Yong Li, Depeng Jin, Li Su, Athanasios V. Vasikos, A Survey of Millimeter Wave (mmWave) Communication for 5G: Opportunities and Challenges. *Wireless Networks*, 2015, Vol. 21, Is 8, pp. 2657-2676.
3. Kan Zheng, Long Zhao, Jie Mei, Mischa Dohler, Wei Xiang, Yuexing Peng, 10 Gb/s HetSNETs with Millimeter-Wave Communications: Access and Networking – Challenges and Protocols. *IEEE Communication Magazine*, 2015, Vol. 53, Is. 1, pp. 222-231.
4. V. Vishnevsky A. Larionov, S. Frolov, Design and Scheduling in 5G Stationary and Mobile Communication System Based on Wireless Millimeter-Wave Mesh Networks. *Communications in Computer And Information Science*. 2014, Vol. 279, pp. 11-28.
5. 5G Vision of IMT-2020 (5G) Promotion Group. www.imt-2020.cn/en/
6. Samsung 5G Vision. www.samsung.com/global/business-images/insights/2015/Samsung-5G-Vision-2.pdf
7. H.N. Gabow, Using Eulerian partitions to edge color bipartite graphs. *Internat. J. Comput. Inform. Sci.*, 5 (1976), pp. 345–355.
8. H.N. Gabow, O. Kariv, Algorithms for edge coloring bipartite graphs and multigraphs. *SIAM J. Comput.*, 11 (1982), pp. 117–129.
9. F. Cheah, D.G. Corneil, The complexity of regular subgraph recognition. *Discrete Applied Mathematics*, May 1990. Vol. 27, Iss. 1–2, pp 59-68.

UDC 004.722.25