

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ BACKHAUL СЕТЕЙ 5G NR

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-12-11-16

Покаместов Дмитрий Алексеевич,

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники, г. Томск, Россия, dmaltomsk@mail.ru

Крюков Яков Владимирович,

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники, г. Томск, Россия,
kryukov.tusur@gmail.com

Рогожников Евгений Васильевич,

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники, г. Томск, Россия, udzhon@mail.ru

Новичков Серафим Алексеевич,

Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия,
S.Novichkov@skoltech.ru

Лаконцев Дмитрий Владимирович,

Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия,
d.lakontsev@skoltech.ru

Manuscript received 28 September 2021;

Accepted 22 November 2021

Ключевые слова: 5G, NR, транспортные сети,
backhaul, пропускная способность, Cloud RAN,
базовые станции, gNB, CU, DU, RU

В настоящее время во всем мире внедряются системы мобильной связи пятого поколения стандарта 5G NR. Одним из важнейших компонентов этих систем являются транспортные backhaul сети, соединяющие базовую станцию и ядро сети. Пропускная способность этих сетей должна быть достаточной для передачи большого объема трафика. В этой статье мы предлагаем математическую модель расчета пропускной способности backhaul сетей, которая может быть использована при проектировании инфраструктуры 5G. Также мы рассматриваем некоторые важные аспекты архитектуры 5G, принципиально отличающиеся от технологий сетей связи предыдущих поколений. Одним из таких аспектов является использование распределенных базовых станций, в которых блоки обработки радиосигналов, блоки низкоуровневой и высокоуровневой обработки протоколов разделены не только логически, но и физически, а также могут быть пространственно разнесены. Таким образом, системы 5G вписываются в концепцию облачных сетей, за счет чего можно существенно сэкономить ресурсы на развертывание инфраструктуры. Однако, такое решение повышает требования к транспортным сетям. Рассмотрены возможные подходы к физической реализации транспортных сетей, включая принципиально новое решение, интегрирующее радиодоступ и backhaul сети. Наконец, с учетом этих и других факторов описана созданная нами математическая модель оценки требуемой пропускной способности backhaul сетей. Модель основана на расчете максимальной сетевой нагрузки в соте базовой станции с учетом таких параметров как количество пространственных лучей, агрегированное число поднесущих, индекс модуляции, скорость кодирования и др. Также в модели учитывается распределенная структура базовой станции. Показаны три характерных сценария работы базовой станции 5G и для них приведена оценка требуемой пропускной способности backhaul сетей.

Информация об авторах:

Покаместов Дмитрий Алексеевич, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, к.т.н., доцент, г. Томск, Россия

Крюков Яков Владимирович, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, к.т.н., доцент, Москва, Россия

Рогожников Евгений Васильевич, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, к.т.н., заведующий кафедрой телекоммуникаций и основ радиотехники, доцент, г. Томск, Россия

Новичков Серафим Алексеевич, Сколковский институт науки и технологий главный конструктор лидирующего исследовательского центра "Сеть радиодоступа 5G с открытой архитектурой", Москва, Россия

Лаконцев Дмитрий Владимирович, Сколковский институт науки и технологий, руководитель центра компетенций национальной технической инициативы "Технологии беспроводной связи и интернета вещей" к.т.н., доцент, Москва, Россия

Для цитирования:

Покаместов Д.А., Крюков Я.В., Рогожников Е.В., Новичков С.А., Лаконцев Д.В. Модель оценки пропускной способности транспортных backhaul сетей 5G NR // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №12. С. 11-16.

For citation:

Pokamestov D.A., Kryukov Ya.V., Rogozhnikov E.V., Novichkov S.A., Lakontsev D.A. (2021) Model for estimating the throughput of 5G NR backhaul networks. T-Comm, vol. 15, no.12, pp. 11-16. (in Russian)

Введение

Сети мобильной связи пятого поколения 5G NR обеспечивают колоссальную абонентскую скорость передачи до нескольких гигабит в секунду. Это достигается благодаря использованию прорывных (по сравнению с сетями четвертого поколения LTE) решений. Стоит отметить такие технологии как многоантенные системы с цифровым диаграммообразованием MU-Massive MIMO (Multi User Massive Multiple Input Multiple Output), повышение индекса модуляции до QAM-256, использование эффективных LDPC (Low Density Parity Check) и полярных кодов, расширение используемой полосы частот (до 1 ГГц), освоение новых частотных диапазонов (диапазон FR1 от 0.4 до 6 ГГц, диапазон FR2 от 24.25 до 52.6 ГГц). Сети 5G обладают гибкой архитектурой базовой станции (gNB).

Такая архитектура подразумевает функциональное разделение на блок, отвечающий за формирование и обработку радиосигналов RU (Radio Unit), распределенный блок промежуточной обработки DU (Distributed Unit), который в режиме реального времени реализует остальные функции физического уровня, а также MAC и RLC и централизованный блок CU (Central Unit), выполняющий функции более высоких уровней (такие как PDCP, SDAP, RLC и др.). Благодаря такому решению могут строиться распределенные базовые станции, в которых один CU работает с несколькими DU, к каждому из которых подключено несколько RU. При этом DU и CU могут быть виртуальными и реализовываться на удаленных серверах, что вписывается в концепцию облачных сетей Cloud RAN (Radio Access Network) [1].

Для реализации сетей 5G в рамках описанной выше концепции необходимы высокоскоростные транспортные сети, соединяющие блоки gNB и ядро сети. Транспортную сеть можно разделить на так называемые fronthaul (между RU и DU), midhaul (между DU и CU) и backhaul (между CU и ядром сети – 5GC). В этой статье мы проводим анализ ключевых особенностей архитектуры 5G, влияющих на требования к сети backhaul и предлагаем математическую модель расчета пропускной способности этой сети.

Разработанная нами математическая модель основывается на анализе усредненной максимальной сетевой нагрузки соты и экстраполяции результата на структуру распределенной сети. В модели мы учитываем такие характеристики как полоса частот, особенности MIMO, скорость кодирования, индекс модуляции, накладные расходы и др. Также мы приводим оценку пропускной способности при некоторых типовых сценариях функционирования сетей 5G.

1. Особенности архитектуры сетей 5G

Как было сказано выше, базовая станция gNB 5G делится на функциональные блоки CU, DU, RU (для RU также встречается название RRH (Remote Radio Head)), рисунок 1, UE (User Equipment) – мобильное абонентское оборудование.

Стандартом 3GPP TR 38.801 V14.0.0 предусмотрено 8 основных вариантов (опций) разделения процедур между функциональными блоками [2], [3]. Блок RF включает в себя радиочастотную часть, а также цифро-аналоговое и аналого-цифровое преобразование. В блоке операций физического уровня выполняются прямое и обратное преобразования Фурье (БПФ и ОБПФ), цифровое диаграммообразование,

модуляция и демодуляция, эквалайзирование, прекодирование, маппинг, скремблирование, выравнивание скоростей и помехоустойчивое кодирование. В зависимости от разделения этих операций между Low-PHY и High-PHY выделяют дополнительно 4 подопции (7.1, 7.2, 7.2a, 7.3). Блок MAC также делится на две части: Low-MAC, в котором реализованы функции протокола запроса на повторную передачу HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) и High-MAC выполняет функции управления радиоресурсами RRM (Radio Resource Management). Блок управления радиоканалом RLC (Radio Link Control) разделен на блок Low-RLC, в котором операции выполняются в режиме реального времени и High RLC, операции в котором не привязаны к реальному времени. Следующим блоком является протокол PDCP (Packet Data Convergence Protocol), выполняющий большое количество различных сетевых функций. Последний блок, который обязательно входит в состав CU это протокол управления радиоресурсами RRC (Radio Resource Control). Блоки RF и PHY относятся к первому уровню сетевой иерархии L1. Блоки MAC и RLC относятся к L2, а PDCP и RRC к L3.

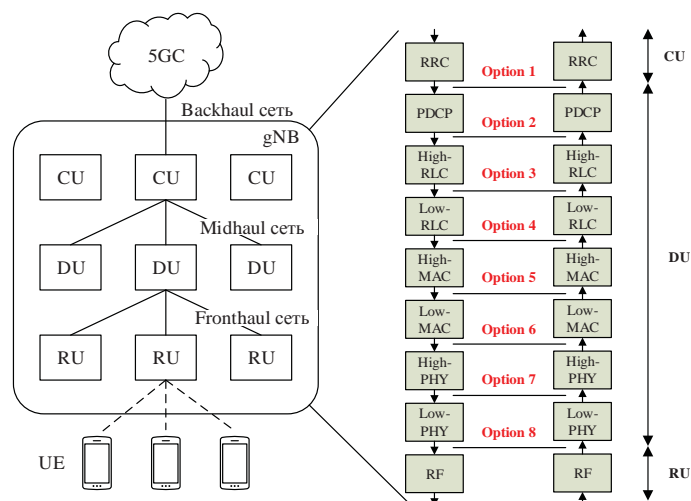


Рис. 1. Архитектура базовой станции 5G

Таким образом, предусмотренная стандартом 5G NR архитектура базовой станции позволяет создавать гибкие решения, адаптированные под нужды и интересы оператора и сценарии развертывания сети. Эта архитектура вписывается в концепцию Cloud RAN, которая подразумевает развертывание блоков CU и DU (как вместе, так и по отдельности) в удаленном дата центре. Такой подход обладает рядом преимуществ по сравнению с классическим развертыванием сетей [1]. Объем обрабатываемого трафика в течении дня мигрирует между спальными и деловыми районами. В концепции Cloud RAN весь этот трафик обрабатывает единый вычислитель (удаленный сервер), вместо распределенного по территории пула базовых станций, простаивающих во время низкой загрузки. За счет этого существенно снижается энергопотребление и себестоимость развертывания сети. С другой стороны, повышаются требования к пропускной способности всех участков транспортной сети.

2. Варианты реализации backhaul сетей

Для реализации backhaul сети необходимо использовать специальные решения, позволяющие обеспечить постоян-

ную высокую пропускную способность [4]. Рассмотрим основные варианты таких решений.

1. Проводная оптическая сеть. Классическое решение при развертывании всех типов транспортных сетей. Благодаря стабильности и огромной пропускной способности это решение является основным и для сетей 5G. В качестве конкретных технологий следует упомянуть гибридные оптико-коаксиальные сети HFC (Hybrid Fiber Coaxial) и пассивные оптические сети PON (passive optical network). Кроме того, развитие технологии Ethernet позволяет строить транспортные сети и на ее основе. Так, новые версии стандарта IEEE P802.3bs поддерживают скорость до 400 Гбит/с [5]. Отметим, что Ethernet целесообразно использовать на относительно малые расстояния, в то время как оптические сети меньше зависят от расстояния [4].

2. Беспроводные каналы связи. Это также традиционное решение, применяемое там, где развертывание инфраструктуры проводных (прежде всего, оптических) сетей по каким-либо причинам затруднено. В качестве физической реализации могут применяться радиорелейные линии, в том числе с диаграммообразованием.

3. Интегрированный доступ и транспортная backhaul сеть IAB (Integrated Access and Backhaul) [6], как частный случай беспроводного канала. Это инновационное решение, предложенное в Release 16 специально для реализации 5G. Технология IAB подразумевает развертывание транспортной backhaul сети на основе радиointерфейса 5G.

Таким образом, backhaul трафик передается напрямую между базовыми станциями одновременно с абонентским трафиком. Это позволяет снизить накладные расходы на развертывание транспортной сети и в целом повышает гибкость и рентабельность системы для оператора. Очевидно, при этом снижается пропускная способность системы за счет использования части радиоресурсов под передачу backhaul трафика. Для разделения трафика может быть использовано временное, частотное и пространственное мультиплексирование (с использованием massive MIMO). Для повышения пропускной способности может быть применена технология полнодуплексной связи [7]. Таким образом, развертывание и планирование IAB является предметом тщательного планирования для операторов [4]. По причине новизны этой тематики в настоящее время появляется большое количество исследований IAB, посвященных анализу потенциала и ограничений этой технологии [8], [9], [10] и др.

Различные решения построения транспортных сетей имеют свои преимущества и недостатки. Проводные сети обеспечивают стабильный канал связи с высокой пропускной способностью, что важно для сот нормального размера. Кроме того, оптические сети широко используются и возможно подключение к существующей инфраструктуре. С другой стороны, IAB может быть эффективно использован для малых (пико, фемто) сот и в случае отсутствия инфраструктуры оптических сетей.

3. Расчет пропускной способности транспортной backhaul сети 5G

Для планирования и развертывания backhaul сетей необходим расчет их пропускной способности. Мы предлагаем метод такого расчета, основанный на оценке усредненной максимальной сетевой нагрузки на соту и экстраполяции

результатов с учетом структуры распределенной базовой станции и сети. Трафик backhaul сети состоит из [11]:

1. User Plane (UP) трафик – основной трафик, передаваемый пользователями [12], [1].
2. Трафик, передаваемый по интерфейсу Xn между базовыми станциями, который физически проходит через backhaul сегмент. Составляет около 4% UP трафика.
3. Control Plane CP трафик – служебная информация (объем пренебрежимо мал относительно UP трафика [11]).
4. Заголовки транспортного уровня. Т.к. стек протоколов транспортного интерфейса S1 в сети LTE [13] совпадает со стек протокола транспортного интерфейса NG в 5G NR [14], считаем возможным воспользоваться результатами из [11], где объем накладных расходов оценивается в 10%.
5. IPsec (14 % согласно [11]).

Следует уточнить, что ряд заголовков и служебной информации уровней L1, L2 и L3 добавляемые при передаче в RAN сети отбрасываются в базовой станции и не учитываются при расчете трафика backhaul сети.

Скорость передачи данных абонента в соответствии с [12] может быть рассчитана как (1). В случае передачи всех ресурсов одному абоненту формулой (1) может быть описан UP трафик за единицу времени.

$$C = 10^{-6} \sum_{j=1}^J (n_{beams}^{(j)} \cdot v_{Layers}^{(j)} \cdot Q_m^{(j)} \cdot f^{(j)} \cdot R_{max} \cdot \frac{N_{PRB}^{BW(j), \mu} \cdot 12}{T_s^{\mu}} (1 - OH^{(j)})) \quad (1)$$

где

J – количество агрегированных поднесущих в заданном диапазоне, или комбинации диапазонов (максимум 16);

R – скорость помехоустойчивого кодирования (максимальная 948/1024)[12];

$n_{beams}^{(j)}$ – количество пространственных лучей, формируемых с использованием Massive Multi User MIMO;

$v_{Layers}^{(j)}$ – количество мультиплексируемых слоев MIMO.

Для Single User SU-MIMO – 8 (максимум на одного пользователя) в DL, 4 в UL, для Multi User MU-MIMO – 16 (максимум 4 на одного пользователя, до суммарно 16 на 4 пользователей).

$Q_m^{(j)}$ – максимальный индекс модуляции. Стандартом для передачи в каналах PUSCH и PDSCH (основные каналы передачи пользовательского трафика в uplink и downlink) определены модуляции $\pi/2$ BPSK ... 256 QAM, соответственно, индекс модуляции $Q_m^{(j)}$ равен 1 ... 8 [15].

$f^{(j)}$ – масштабирующий фактор. Может принимать значения 1, 0.8, 0.75 и 0.4. Зависит от используемой пользователем полосы частот, индекса модуляции и количества слоев MIMO [16]. При передаче нескольким пользователям одной gNB, общий $f^{(j)}$ можно принять равным 1.

μ – нумерология. Это один из основных параметров физического уровня, влияющий на расстояние между поднесущими и длину циклического префикса. Документом [15] определены значения нумерологий $\mu = 0 \dots 4$, расстояние между поднесущими $\Delta f = 2^{\mu} 15$ [кГц].

T_s^{μ} – длительность OFDM символа в субфрейме с нумерологией μ , $T_s^{\mu} = \frac{10^{-3}}{14 \cdot 2^{\mu}}$

$N_{PRB}^{BW(j),\mu}$ – максимальное количество ресурсных блоков RB в полосе $BW^{(j)}$ с нумерологией μ , определяется [17, 18].

$OH^{(j)}$ – накладные расходы на заголовки протоколов.

$OH^{(j)}$ принимает значения: 0.14 для частотного диапазона FR1 для DL, 0.18 для FR2 для DL, 0.08 для FR1 для UL, 0.1 для FR2 для UL [12].

Мы рассматриваем базовую станцию, которая состоит из одного CU, к которому подключено N^{DU} , каждый из которых обслуживает N^{RU} . В этом случае объем передаваемого UP трафика в единицу времени может быть рассчитан как:

$$R = \sum_{n^{DU}=1}^{N^{DU}} \sum_{n^{RU}=1}^{N^{RU}} C^{n^{RU},DU}, \quad (2)$$

где $C^{n^{RU},DU}$ – скорость передачи, обеспечиваемая RU с индексом n^{RU} , подключенным к DU с индексом n^{DU} , рассчитанная как (1).

Максимальная пропускная способность, необходимая для передачи UP трафика, рассчитанная при допущении, что каждый RU обеспечивает максимально возможную скорость передачи R^{MAX} в соответствии с (1) может быть описана как:

$$R^{MAX} = N^{DU} N^{RU} C^{MAX}. \quad (3)$$

Суммарные накладные расходы на заголовки транспортного уровня и IPsec составляют согласно [11] 28%, таким образом максимальная суммарная требуемая пропускная способность может быть рассчитана как:

$$R^{\Sigma} = 1.25 R^{MAX}. \quad (4)$$

4. Результаты моделирования

В таблице 1 приведено три типовых сценариев работы распределенной базовой станции и рассчитанные значения требуемой пропускной способности транспортной сети. Расчет осуществлялся в соответствии с математической моделью, описанной выше. Для упрощения мы считаем, что во всех пространственных лучах и частотных компонентах используются одинаковые параметры.

Таблица 1

Номер сценария	1	2	3
Количество DU	1	5	1
Количество RU на DU	1	4	1
J	8	4	1
Количество лучей n_beams	24	24	1
$v_{Layers}^{(j)}$	1	1	4
$Q_m^{(j)}$	8	8	6
R_{max}	0.9258	0.9258	0.6016
Нумерология μ	1	2	0
Количество ресурсных блоков $N_{PRB}^{BW(j),\mu}$ в диапазоне	273	2	106
Ширина полосы частот в основном диапазоне, МГц	100	2	20
Длительность OFDM символа, мкс	35.714	17.857	71.429
Накладные расходы на заголовки OH	0.14	0.18	0.14
Диапазон	FR1	FR2	FR1
Требуемая пропускная способность backhaul сети (Гбит/с)	143.5	441.3	0.283

Первый сценарий соответствует максимальной сетевой нагрузке классической базовой станции с одним RU и одним DU, агрегирующей 8 частотных компонент. Базовая станция формирует 24 (максимальное значение) пространственных луча, в каждом из которых используется большое число ресурсных блоков с максимальным индексом модуляции и скоростью кодирования. Передача идет в классическом (FR1) диапазоне. Рассчитанная требуемая пропускная способность транспортной backhaul сети составила 143.5 Гбит/с.

Второй сценарий соответствует распределенной базовой станцией с 5 DU, каждый из которых обслуживает 4 RU. Передача ведется в частотном диапазоне FR2. Основные параметры, влияющие на пропускную способность такие же, как и в первом сценарии и близки к максимальным, что соответствует, с одной стороны, высокой сетевой нагрузке, и с другой, хорошим условиям распространения радиосигналов (абоненты находятся вблизи базовой станции). Рассчитанное значение пропускной способности составило 441.3 Гбит/с.

Третий сценарий соответствует менее производительной по сравнению с первыми двумя сценариями базовой станцией с одним DU и одним RU. В этом сценарии не поддерживается диаграммообразование (но формируется четыре слоя MIMO) и агрегирование поднесущих. Передача ведется в полосе 20 МГц, в частотном диапазоне FR1. Условия распространения радиоволн хуже, чем в предыдущих сценариях, поэтому индекс модуляции и скорость кодирования не максимальны. Рассчитанная пропускная способность составила 283 Мбит/с.

Рассмотренные сценарии позволяют сформировать представление о пропускной способности backhaul сети при различной характерной конфигурации базовых станций и условий распространения радиоволн.

Заключение

Сети мобильной связи пятого поколения обеспечивают принципиально новый уровень качества обслуживания абонентов. Ключевой частью инфраструктуры сетей 5G являются транспортные сети, один из сегментов которых – backhaul был рассмотрен в этой статье. Были рассмотрены особенности и возможности архитектуры сетей 5G, влияющие на транспортные сети. Описаны основные подходы к построению этих сетей и факторы, влияющие на их пропускную способность.

Предложен метод расчета требуемой пропускной способности, основанный на анализе абонентской скорости передачи и особенностей распределенной базовой станции. На пропускную способность влияет ряд факторов – от частотных диапазонов, типов антенных систем, условий распространения радиоволн до сложности и производительности базовых станций. Нами была разработана и описана в этой статье математическая модель расчета пропускной способности, позволяющая учесть все эти факторы.

Показан пример расчета пропускной способности backhaul сети для трех сценариев работы базовой станции, в которых значение пропускной способности различается более чем в 100 раз. Математическая модель может применяться при создании, проектировании и оптимизации backhaul сетей.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минцифры России и АО «РВК», а также Сколковского института науки и технологий, идентификатор соглашения предоставления субсидии 0000000007119P190002, №005/20 от 26.03.2020 г.

Литература

1. Крюков Я.В. и др. Анализ вычислительной сложности и времени выполнения стека протоколов в сетях 5G New Radio // Доклады ТУСУР. 2020. Т. 23, № 3. С. 31-37.
2. 3GPP TR 38.801 «3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces (Release 14) v.14.0.0. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3056>, Published December 2020
3. 5G NR Logical Architecture and its Functional Splits. <https://www.parallelwireless.com/wp-content/uploads/5GFunctionalSplits.pdf>
4. Innovation in 5G Backhaul Technologies", A 5G Americas White Paper. <https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2020/06/Innovations-in-5G-Backhaul-Technologies-WP-PDF.pdf> Published June 2020.
5. IEEE standard for Ethernet. https://standards.ieee.org/standard/802_3-2018.html Published August 2018.
6. 3GPP TS 38.174 Integrated access and backhaul radio transmission and reception» (Release 16) V16.2.0. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3665> Published June 2021.
7. Rogozhnikov E.V. et al. Full duplex wireless communication system, analog and digital cancellation, experimental research // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). IEEE, 2017. P. 1-5.
8. Polese M. et al. Integrated access and backhaul in 5G mmWave networks: Potential and challenges // IEEE Communications Magazine. 2020. Vol. 58. No.. 3. P. 62-68.
9. Saha C., Afshang M., Dhillon H. S. Integrated mmwave access and backhaul in 5G: Bandwidth partitioning and downlink analysis // 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2018. P. 1-6.
10. Saha C., Dhillon H. S. Millimeter wave integrated access and backhaul in 5G: Performance analysis and design insights // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2019. Vol. 37. No. 12. P. 2669-2684.
11. Guidelines for LTE Backhaul Traffic Estimation. NGMN Alliance; 2011. https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN_Whitepaper_Guideline_for_LTE_Backhaul_Traffic_Estimation.pdf. Published July 2011.
12. 3GPP TS 38.306 V16.4.0 User Equipment (UE) radio access capabilities. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3193> Published March 2017.
13. 3GPP TS 38.414. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1-M data transport. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2447> Published July 2020.
14. 3GPP TS 38.414. NG-RAN; NG data transport. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3224> Published July 2020.
15. 3GPP TS 38.211 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Physical channels and modulation. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3213> Published April 2017.
16. 3GPP TSG RAN WG1 Meeting#92 R1-1801352 <https://www.3gpp.org/DynaReport/TDocExMtg--R1-92--18769.htm> Published March 2018
17. 3GPP TS 38.101-1: "NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception Part 1: Range 1 Standalone". <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3283> Published July 2021
18. 3GPP TS 38.101-2: "NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception Part 2: Range 2 Standalone". <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3284> Published July 2021.

MODEL FOR ESTIMATING THE THROUGHPUT OF 5G NR BACKHAUL NETWORKS

Dmitry A. Pokamestov, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia, dmaltomsk@mail.ru

Yakov V. Kryukov, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia, kryukov.tusur@gmail.com

Evgeny V. Rogozhnikov, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia, udzhon@mail.ru

Serafim A. Novichkov, Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia, S.Novichkov@skoltech.ru

Dmitry A. Lakontsev, Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia, d.lakontsev@skoltech.ru

Abstract

Currently, the fifth generation of mobile communication systems of the 5G NR standard are being introduced all over the world. One of the most important components of these systems are backhaul transport networks connecting the base station and the core of the network. The bandwidth of these networks must be sufficient to carry a large amount of traffic. In this article, we propose a mathematical model for calculating the throughput of backhaul networks, which can be used in the design of 5G infrastructure. We also consider some important aspects of the 5G architecture, which make fundamental differences from communication networks of previous generations. One of these aspects is the use of distributed base stations, in which radio signal processing units, low-level and high-level protocol processing units are separated not only logically, but also physically, and can also be spatially separated. Thus, 5G systems fit into the concept of cloud networks, due to which it is possible to significantly save resources for infrastructure deployment. However, such a solution increases the requirements for transport networks. Possible approaches to the physical implementation of transport networks are considered, including a fundamentally new solution that integrates radio access and backhaul networks. Finally, taking into account these and other factors, a mathematical model created by us for estimating the required bandwidth of backhaul networks is described. The model is based on calculating the maximum network load in a base station cell, taking into account such parameters as the number of spatial beams, the aggregated number of subcarriers, modulation index, coding rate, etc. The distributed structure of the base station is also taken into account in the model. Three scenarios of 5G base station operation are shown and an estimate of the required throughput of backhaul networks is given for them.

Keywords: 5G, NR, backhaul, bandwidth, Cloud RAN, base stations, gNB, CU, DU, RU.

References

1. Ya.V. Kryukov et al. (2020). Analysis of Computational Complexity and Execution Time of the Protocol Stack in 5G Networks. New Radio TUSUR reports. Vol. 23, no. 3, pp. 31-37. (in Russian)
2. 3GPP TR 38.801 "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces (Release 14) v.14.0.0. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3056>, Published December 2020.
3. 5G NR Logical Architecture and its Functional Splits. <https://www.parallelwireless.com/wp-content/uploads/5GFunctionalSplits.pdf>
4. Innovations in 5G Backhaul Technologies", A 5G Americas White Paper. <https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2020/06/Innovations-in-5G-Backhaul-Technologies-WP-PDF.pdf> Published June 2020.
5. IEEE Standard for Ethernet. https://standards.ieee.org/standard/802_3-2018.html Published August 2018.
6. 3GPP TS 38.174 "Integrated access and backhaul radio transmission and reception" (Release 16) V16.2.0. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3665> Published June 2021.
7. E.V. Rogozhnikov et al. (2017). Full duplex wireless communication system, analog and digital cancellation, experimental research. *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. IEEE. P. 1-5.
8. M. Polese et al. (2020). Integrated access and backhaul in 5G mmWave networks: Potential and challenges. *IEEE Communications Magazine*. Vol. 58. No.. 3. P. 62-68.
9. C. Saha, M. Afshang, H.S. (2018). Dhillon Integrated mmwave access and backhaul in 5G: Bandwidth partitioning and downlink analysis. *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE. P. 1-6.
10. C. Saha, H.S. Dhillon (2019). Millimeter wave integrated access and backhaul in 5G: Performance analysis and design insights. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. Vol. 37. No. 12. P. 2669-2684.
11. Guidelines for LTE Backhaul Traffic Estimation. NGMN Alliance; 2011. https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN_Whitepaper_Guideline_for_LTE_Backhaul_Traffic_Estimation.pdf Published July 2011.
12. 3GPP TS 38.306 V16.4.0 User Equipment (UE) radio access capabilities. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3193> Published March 2017.
13. 3GPP TS 36.414. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); SI data transport. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2447> Published July 2020.
14. 3GPP TS 38.414. NG-RAN; NG data transport. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3224> Published July 2020.
15. 3GPP TS 38.211 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Physical channels and modulation. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3213> Published April 2017.
16. 3GPP TSG RAN WGI Meeting#92 RI-1801352 <https://www.3gpp.org/DynaReport/TDocExMtg--RI-92--18769.htm> Published March 2018
17. 3GPP TS 38.101-1: "NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception Part 1: Range 1 Standalone". <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3283> Published July 2021
18. 3GPP TS 38.101-2: "NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception Part 2: Range 2 Standalone". <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3284> Published July 2021

Information about authors:

Dmitry A. Pokamestov, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Tomsk, Russia

Yakov V. Kryukov, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Tomsk, Russia

Evgeny V. Rogozhnikov, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Telecommunications and Fundamentals of Radio Engineering, Tomsk, Russia

Serafim A. Novichkov, Skolkovo Institute of Science and Technology, Lead Engineer of LRC "5G Radio Access Network with Open Architecture", Moscow, Russia

Dmitry A. Lakontsev, Skolkovo Institute of Science and Technology, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Head of the Competence Center of the National Technical Initiative "Technologies of Wireless Communication and the Internet of Things", Moscow, Russia