

АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МОДУЛЯ mmWave И ОБЗОР АЛГОРИТМОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ

*А.Ю. Ларионов, Национальный исследовательский университет ИТМО,
alex.lar99@mail.ru;*

*Е.Е. Каранова, ООО «Специальный технологический центр»,
karanova-zhenya1609@mail.ru.*

УДК 621.39

Аннотация. Статья посвящена обзору модуля *mmWave* в *NS-3*, который предназначен для сквозного моделирования сотовых сетей типа *3GPP*. Рассмотрены мультиномерология и структура фрейма *5G NR*, процедуры автоматического распределения ресурсов в *5G NR*, а также элемент, отвечающий за распределение радиоресурсов – планировщик (*Scheduling*). Рассмотрены планировщики, которые применяются при проведении модельных экспериментов для оценки производительности в симуляторе *NS-3* с использованием модуля *mmWave*.

Ключевые слова: мультиномерология; алгоритм; модель; структура фрейма; планировщик; оценка производительности; распределения ресурсов; *NS-3*; *5G NR*; модуль *mmWave*.

ANALYSIS OF THE PRINCIPLES OF OPERATION OF THE mmWave MODULE AND REVIEW OF PLANNING ALGORITHMS FOR OPTIMIZING RESOURCE ALLOCATION

A.Y. Larionov, ITMO National Research University;

E.E. Karanova, LLC «Center for Special Technologies».

Annotation. The article is devoted to an overview of the *mmWave* module in *NS-3*, which is designed for end-to-end modeling of *3GPP* type cellular networks. The article considers the multi-numerology and structure of the *5G NR* frame, the procedures for automatic resource allocation in *5G NR*, as well as the element responsible for the distribution of radio resources – *Scheduling*. The planners that are used in conducting model experiments to evaluate performance in the *NS-3* simulator using the *mmWave* module are considered.

Keywords: multi-numerology; algorithm; model; frame structure; scheduler; performance evaluation; resource allocation; *NS-3*; *5G NR*; *mmWave* module.

Введение

Одной из наиболее важных особенностей технологии *5G* является использование частот миллиметрового диапазона (*mmWave*). Технология *mmWave* предлагает беспрецедентную скорость передачи данных и пропускную способность сети, что делает ее важнейшим компонентом сетей *5G*.

Большинство современных коммерческих беспроводных систем работают на частотах ниже 6 ГГц, где более низкие частоты обеспечивают распространение на большие расстояния и более низкие потери при проникновении (т.е. затухание стенами и другими препятствиями), что делает их применимыми для радиосвязи. В результате спектр ниже 6 ГГц стал сильно перегружен, и отдельные полосы, как правило, недоступны в виде смежных участков шириной более 200 МГц. Однако большие полосы спектра доступны на более высоких частотах миллиметрового

диапазона, что дает возможность очень широкой полосы пропускания, в некоторых случаях даже превышающей 1 ГГц. Технология миллиметровых волн – это технология беспроводной связи, работающая в диапазоне частот от 30 до 300 ГГц (т.е. выше 6 ГГц). Системы, работающие в этих диапазонах, привлекательны из-за большого количества доступного спектра в этих более высоких диапазонах частот и пространственных степенях свободы, обеспечиваемых антенными решетками больших размеров, которые возможны благодаря меньшему размеру антенных элементов на более высоких частотах [1]. Направленные интеллектуальные антенны являются основным технологическим средством, которое позволяет устройствам миллиметрового диапазона преодолеть эффекты трудного распространения и разблокировать этот высокочастотный спектр. Теоретические потери на пути распространения в свободном пространстве (согласно уравнению Фрииса) пропорциональны квадрату частоты, в результате чего величина принимаемой мощности для сигнала миллиметрового диапазона более чем на 30 дБ (в 1000 раз) меньше, чем в обычных сотовых системах на эквивалентных расстояниях между передатчиком и приемником [2]. Многоэлементные антенные решетки и методы формирования луча *MIMO* предлагают средства компенсации этого высокого затухания. При использовании миллиметровых волн размер антенны и расстояние между элементами антенны сокращаются до нескольких миллиметров, что позволяет размещать сотни элементов на базовой станции и десятки на портативных устройствах. Меньший размер антенны также позволяет интегрировать сразу несколько элементов в мобильные устройства для того, чтобы обеспечить разнесение и поддерживать связь в том случае, даже если сигнал от одного массива блокируется (например, рукой пользователя) [3].

Технология *mmWave* работает путем передачи данных по воздуху с помощью высокочастотных электромагнитных волн. Эти волны имеют гораздо более короткую длину волны, чем волны с более низкой частотой, что означает то, что они могут передавать больше данных на более короткое расстояние. Однако сигналы *mmWave* имеют ограниченный диапазон и могут быть легко заблокированы препятствиями, такими как здания и деревья. Чтобы преодолеть это ограничение, в сетях *5G* используется метод формирования луча, который фокусирует сигнал миллиметрового диапазона в определенном направлении, позволяя ему распространяться дальше и преодолевать препятствия. Формирование луча работает с использованием массива антенн для фокусировки сигнала миллиметрового диапазона в определенном направлении. Антенны могут регулировать фазу и амплитуду сигнала, чтобы создать «луч», указывающий в направлении предполагаемого приемника. Это позволяет сигналу миллиметрового диапазона распространяться дальше и преодолевать препятствия, что позволяет обеспечить высокоскоростное соединение в тех областях, где традиционные беспроводные технологии будут иметь проблемы.

Использование технологии *mmWave* в сетях *5G* дает ряд преимуществ:

- Технология *mmWave* обеспечивает скорость передачи данных, в несколько раз превышающую скорость *4G LTE*.
- Технология *mmWave* имеет гораздо большую пропускную способность, чем низкочастотные беспроводные технологии.

Технология *mmWave* имеет меньшую задержку, чем *4G LTE*, что означает более быструю передачу данных между устройствами.

Тем не менее прежде, чем технология *mmWave* сможет быть эффективно реализована в сетях *5G*, необходимо решить множество проблем:

- *Адаптивное формирование луча и отслеживание луча.* Требование направленности создает новые проблемы для поддержки мобильности в сетях миллиметрового диапазона. Передатчик и приемник должны постоянно отслеживать канал по мере перемещения мобильного пользователя, чтобы выровнять свои антенные решетки для достижения максимального направленного усиления. Также известно, что сигналы *mmWave* особенно восприимчивы к затенению и могут быть полностью заблокированы многими материалами, такими как кирпич, тонированное стекло и даже человеческое тело [4, 5]. К счастью, недавние полевые измерения показали, что отраженной мощности может быть достаточно для связи вне прямой видимости (*NLOS*). Таким образом, заблокированный канал может восстановиться путем направления луча с основного пути прямой видимости (*LOS*) на альтернативный путь *NLOS*. Пользовательское оборудование (*UE*) и базовая станция должны затем совместно инициировать процедуру поиска и выбора другого пути для восстановления связи.
- *Направленная синхронизация и широкополосные каналы.* Направленность также усложняет разработку многих каналов и процедур управления. Процедуры обнаружения соты и начального доступа, когда *UE* должно искать близлежащие базовые станции, к которым оно может подключиться, потребуют инновационного подхода для эффективной обработки. Традиционные соты периодически транслируют сигналы синхронизации (известные как первичный сигнал синхронизации (*PSS*) в системах *LTE*) во всех направлениях, которые принимаются всеми устройствами в зоне покрытия соты и используются для первоначального подключения к соте. Если бы усовершенствованная узловая база *5G mmWave* (*eNB*) должна была транслировать *PSS* со всенаправленной диаграммой направленности антенны, сигнал не выиграл бы от направленного усиления и мог бы не иметь достаточной дальности для обнаружения многими *UE*. Следовательно, *eNB* и *UE* должны выполнять угловой поиск, чтобы пользователи могли обнаружить *PSS* и отточить оптимальные углы формирования диаграммы направленности передатчика (*TX*)/приемника (*RX*) [6]. Аналогичная проблема также возникает для других управляющих сигналов, таких как назначения управляющей информации нисходящей линии связи (*DCI*), которые указывают ресурсы, назначенные каждому пользователю для передачи по нисходящей линии связи (*DL*)/восходящей линии связи (*UL*) в субкадре или слоте.
- *Проблемы для MAC, сетевого и транспортного уровней.* Быстрая динамика каналов и уязвимость каналов *mmWave* для затенения потребуют частых, почти мгновенных переключений между соседними ячейками *5G* или *4G*. Таким образом, двойное подключение, когда мобильные устройства постоянно подключены как к сети *5G*, так и к устаревшей сети *4G*, может иметь важное значение для восстановления после внезапного сбоя основного канала *5G* [7-8]. Кроме того, на транспортном уровне механизмы контроля и предотвращения перегрузки, предоставляемые *TCP*, должны быть способны быстро адаптироваться к внезапным колебаниям пропускной способности, чтобы максимально использовать пропускную способность канала, избегая при этом перегрузки сети отправкой слишком большого количества пакетов, что приводит к перегрузке и влияет на другие процессы. Текущие версии *TCP* могут быть не оптимизированы для динамики канала

mmWave, поэтому могут потребоваться новые алгоритмы для обеспечения высокой скорости сеансов *E2E* [9].

Целью данной работы является обзор преимуществ и недостатков технологии *mmWave* при применении в реальных условиях, а также обзор модуля *mmWave NS-3*. Также будут рассмотрены процедуры автоматизированного распределения ресурсов в сетях *5G NR*.

Обзор модуля *mmWave NS-3*

Модуль *NS-3 mmWave* предназначен для сквозного моделирования сотовых сетей стандартов *3GPP*. Как показано на рис. 1, архитектура основана на модуле *NS-3 LTE (LENA)* [10]. Он использует детализированную реализацию протоколов *LTE/EPC* и реализует настраиваемые уровни *PHY* и *MAC*. На рис. 1 показан высокоуровневый состав классов *MmWaveEnbNetDevice* и *MmWaveUeNetDevice*, которые представляют радиостеки *mmWave eNB* и *UE* соответственно, а также сквозная структура симулятора.

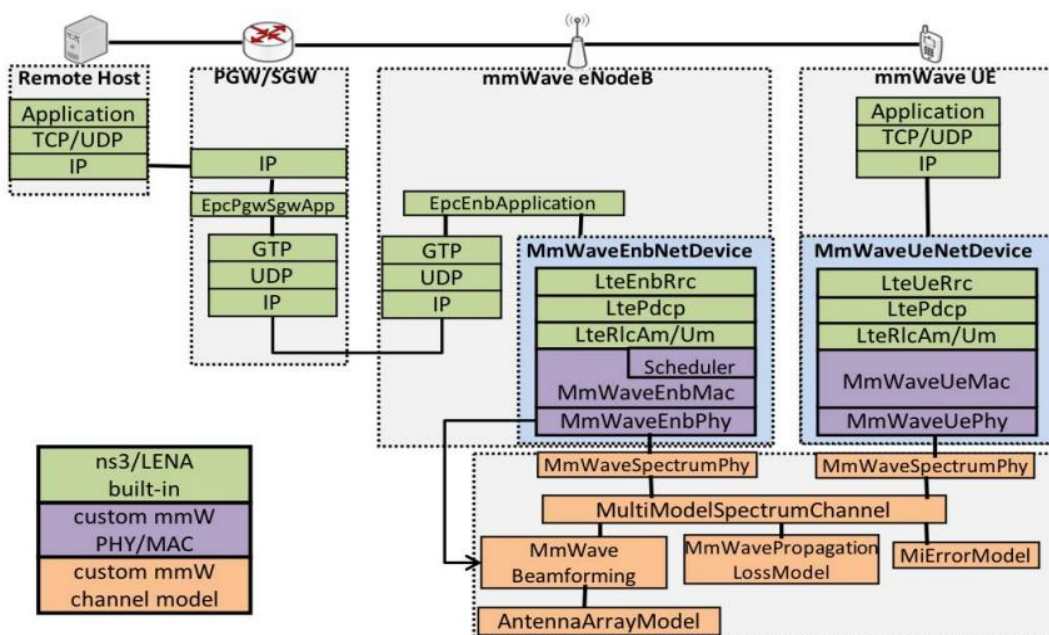


Рисунок 1

Модуль *NS-3 mmWave* также включает в себя *McUeNetDevice*, представляющий собой *NetDevice* с двойным стеком (*LTE* и *mmWave*), т.е. устройство, способное подключаться к обеим технологиям.

Классы уровня *MAC* *MmWaveEnbMac* и *MmWaveUeMac* реализуют точки доступа к услуге (*SAP*) модуля *LTE* и пользовательские интерфейсы, которые обеспечивают взаимодействие с уровнем *LTE RLC*. Поддержка прозрачного режима *RLC (TM)*, режима насыщения (*SM*), режима без подтверждения (*UM*), режима с подтверждением (*AM*) встроена в классы *MAC* и планировщика (т.е. *MmWaveMacScheduler* и производные классы). Планировщик *MAC* также реализует *SAP* для конфигурации на уровне *LTE Radio Resource Control (RRC) (LteEnbRrc)*. Таким образом, доступны все компоненты, необходимые для установления соединения *Evolved Packet Core (EPC)* [11].

Классы *MmWavePhy* обрабатывают направленную передачу и прием данных *DL* и *UL* и каналов управления на основе управляющих сообщений от уровня *MAC*. Подобно модулю *LTE*, каждый экземпляр *PHY* обменивается данными по каналу (т.е. *SpectrumChannel*) через экземпляр класса *MmWaveSpectrumPhy*, который является общим как для *DL*, так и для *UL*. *MmWaveSpectrumPhy* инкапсулируют все модели физического уровня: вычисление помех (*MmWaveInterference*), вычисление отношения сигнала к помехе, расчет коэффициента шума (*MmWaveSinrChunkProcessor*), модель ошибок на основе взаимной информации (*MmWaveMiErrorModel*), которая вычисляет вероятность ошибки пакета, а также объект физического уровня *Hybrid Automatic Repeat reQuest (HARQ)* (*MmWaveHarqPhy*) для выполнения мягкого комбинирования.

Мультиномерология и структура кадра 5G NR

Технология *5G NR* использует масштабируемую нумерологию для обработки различных диапазонов *5G*, различных полос пропускания, режимов развертывания и различных услуг. Нумерология (установленная по времени и частоте) представляет физические параметры передачи в *5G NR*, такие как интервал между поднесущими (*SCS*), длительность *OFDM*-символов, а также размер циклического префикса (*CP*). Для каждого значения интервала между поднесущими могут быть вставлены несколько длин *CP* для адаптации к различным уровням межсимвольной интерференции (*ISI*) на разных несущих частотах.

В *NR* передатчики и приемники могут пользоваться более широкой полосой пропускания в высокочастотных диапазонах. В этом случае разнос поднесущих может быть увеличен (более 15 кГц, как принято в *LTE/LTE-A*, и потенциально до 960 кГц). Кроме того, высокие несущие частоты также подвержены эффекту Доплера, а большой разнос поднесущих может облегчить ослабление межнесущих помех (*ICI*). С другой стороны, *NR* также должен поддерживать небольшое расстояние между поднесущими, например 3,75 кГц, поддерживаемое узкополосным интернетом вещей (*NB-IoT*) [12], чтобы обеспечить лучшую энергоэффективность в низкочастотных диапазонах. Следовательно, интервалы между поднесущими в *NR* масштабируются как подмножество или надмножество 15 кГц. *SCS* больше не устанавливается на 15 кГц, а количество слотов увеличивается с v , что делает нумерологию гибкой в *5G*:

$$SCS(\Delta f) = 15 \text{ кГц} \cdot 2^v, \text{ где } v = 0, 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

Как и в *LTE*, кадр *NR* длительностью 10 мс содержит 10 субкадров (каждый длительностью 1 мс). Субкадр состоит из 2^v слотов в зависимости от размера слота. Слот *NR* состоит из 14 символов *OFDM* (обычный *CP*) или 12 символов (расширенный *CP*). Длина слота является переменной в зависимости от *SCS*, используемой для указанного спектра. Оно варьируется от 1 мс для *SCS* 15 кГц (используется в *LTE*) до 31,25 мкс для *SCS* 480 кГц. На рис. 2 представлена нумерология *5G NR* для диапазона *mmWave* и более низких диапазонов.

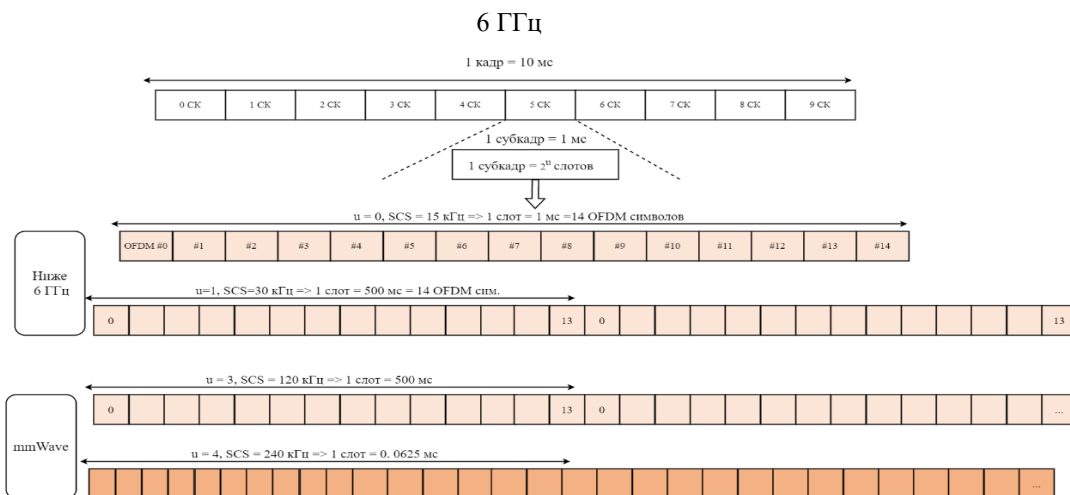


Рисунок 2

Временной интервал передачи (TTI) является переменной величиной и рассчитывается следующим образом:

$$TTI = \text{количество символов} \times \text{длина символа} \quad (2)$$

Количество последовательных символов $OFDM$ в субкадре:

$$N_{symb}^{subframe,v} = N_{symb}^{slot} \times N_{slot}^{subframe,v}, \quad (3)$$

где: N_{symb}^{slot} – количество символов на слот, $N_{slot}^{subframe,v}$ – количество слотов на субкадр (максимальное число равно 32, $v = 5$). Следовательно, максимальное количество слотов на кадр равно 320 ($v = 5$).

В NR мы определяем ресурсную сетку с размерами N_{SC}^{RB} , как количество поднесущих на ресурсные блоки и $N_{symb}^{RBsubframe,v}$, как количество символов в субкадре. Ресурсные блоки в NR определяются как 12 последовательных поднесущих в частотной области. Мы определяем элемент ресурса (RE), как наименьшую единицу ресурсной сетки, которую можно назначить другому пользователю. Несколько ресурсных сеток определены в NR в соответствии с нумерологией, представленной в табл. 1, в которой приведены характеристики кадра NR в соответствии с интервалом между поднесущими (SCS).

Таблица 1.

v	SCS (Δf)	Длительность слота	Количество слотов на субкадр	Количество слотов на кадр	Количество символов на субкадр
0	15 кГц	1 мс	1	10	14
1	30 кГц	500 мс	2	20	28
2	60 кГц	250 мс	4	40	56
3	120 кГц	125 мс	8	80	112
4	240 кГц	62,5 мс	16	160	224
5	480 кГц	31,25 мс	32	320	448

Процедуры автоматического распределения ресурсов в 5G NR

Множество новых услуг, представленных через интернет, в дополнение к увеличению числа приложений интернета вещей (*IoT*) привели к резкому увеличению объема трафика, требуемого пользователями, особенно в нисходящем направлении. Сеть 5G RAN должна поддерживать в 10-100 раз больше устройств, подключенных к сети *LTE-Advanced (LTE-A)*.

Управление радиоресурсами (*RRM*) и управление помехами (*IM*) для каналов доступа пользователей имеют решающее значение для рациональной оптимизации использования сетевых ресурсов. Назначение блоков ресурсов (*RB*) основано на измерениях пространства, частоты и времени. *RRM* можно рассматривать как важный ключевой фактор для удовлетворения требований среды 5G с точки зрения эффективного управления доступным спектром и помехами в дополнение к требованиям качества обслуживания (*QoS*).

Уровень *MAC* на уровне *gNB/ng-eNB* отвечает за планирование, которое обеспечивает быструю связь между базовой станцией и пользователями, а также оперативное принятие решений базовыми станциями. Элемент, отвечающий за распределение радиоресурсов (*Scheduling*), называется «*Scheduler*». Это ключевой элемент для быстрого и эффективного назначения *RB*. Многопользовательское планирование пакетов нисходящей линии связи (*MU-DLPS*) является одним из важных технических инструментов, целью которого является динамическое управление доступными радиоресурсами. *MU-DLPS* основан на текущих условиях канала и требованиях *QoS* активных пользователей.

Планировщик *NR* (для *DL* и *UL*) должен удовлетворять нескольким ограничениям: вести мониторинг состояния пользовательского оборудования (*UE*), удовлетворение запрошенного *QoS*, мониторинг потоков данных в соответствии с типом приложений, а именно в режиме реального времени (*RT*) и в нереальном времени (*NRT*), мониторинг качества канала для каждого *UE*, а также контроль доступных ресурсов в каждом интервале времени передачи (*TTI*) для планирования.

На рис. 3 представлено взаимодействие между планировщиком пакетов нисходящего канала и другими объектами для планирования входящих потоков. На основе отчетов индикатора качества канала (*CQI*), доставленных пользователями на базовые станции, планировщик принимает решение о назначении *RB* каждому *UE* в соответствии с алгоритмом планирования, используемым *gNB*. Тип планировщика влияет на используемую схему адаптивной модуляции и кодирования (*AMC*).

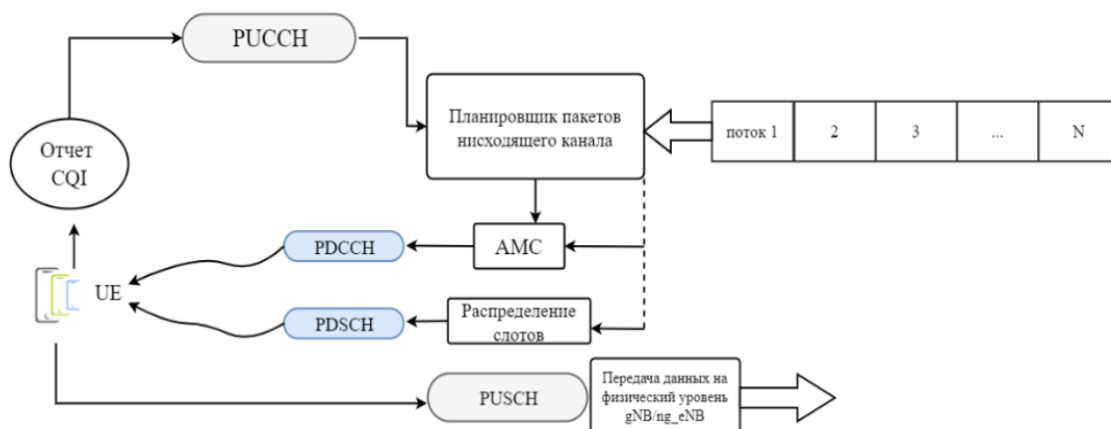


Рисунок 3

Схемы распределения ресурсов нисходящей линии связи

На уровне планировщика 5G рассматриваются различные правила планирования, каждое из которых, в основном, направлено на обеспечение определенных значений *QoS*. Кроме того, выбор правил планирования в сети 5G следует оптимизировать вместе с распределением радиоресурсов, поскольку распределение ресурсов и планирование зависят друг от друга. Стратегии планирования предназначены для выделения радиоресурсов для различных активных пользователей в сети 5G, намеревающихся получать пакеты (*DL*), принимая во внимание условия канала, эксплуатируемые каждым *UE*. Различные алгоритмы планирования классифицируются по разным категориям в соответствии с процессом, за которым следует процесс выделения *RB* конкретному *UE*. Этот процесс основан на вычислении метрики для каждого потока, который будет запланирован для пользователя, с применением различных последовательностей планирования. Предположим, что метрика, назначенная *i*-му потоку на *j*-м подканале, определяется W_{ij} . Эта метрика представляет приоритет *UE* для передачи или приема в конкретном *RB*. В расчете этой метрики участвуют различные параметры, такие как сообщаемые значения *CQI*, история распределения ресурсов, предыдущая средняя скорость передачи данных, требования *QoS* и состояние буфера [13].

Метрика, вычисляемая каждым *gNB/ng-eNB* для выгоды каждого *UE*, определяет подход, используемый для выполнения операции выделения радиоресурсов.

Для получения метрики планировщикам пакетов обычно необходимо знать среднюю скорость передачи *i*-го потока R_i и доступную скорость *i*-го потока на *j*-м подканале для каждого *UE* r_{ij} . Принимая во внимание β как константу, характеризующую скорость передачи данных, R_i оценивается для каждого *TTI* и определяется уравнением:

$$R_i(k) = \beta R_i(k-1) + (1 - \beta)R_i(k), 0 < \beta < 1, \quad (4)$$

где: $R_i(k)$ – достигнутая скорость передачи данных, назначенная *i*-му потоку во время *k*-го *TTI*;

$R_i(k-1)$ – расчетная средняя скорость передачи данных во время предыдущего *TTI*.

Основные схемы распределения ресурсов нисходящей линии связи:

1) Пропорционально-справедливое планирование (*PF*).

Подход, применяемый этой схемой основан на поддержании баланса между двумя конкурирующими сторонами: попытке максимизировать общую пропускную способность сети, в то же время предоставляя всем пользователям по крайней мере минимальный уровень обслуживания. Это достигается путем присвоения каждому потоку данных скорости передачи данных или приоритета планирования (в зависимости от реализации), который обратно пропорционален ожидаемому потреблению ресурсов:

$$W_{i,jPF} = \frac{r_{ij}}{R_{i(k-1)}} \quad (5)$$

где: $r_{i,j}$ – мгновенная скорость потока, доступная для *i*-го потока в *j*-м подканале, а $R_{i(k-1)}$ – средняя скорость передачи данных прошлой передачи.

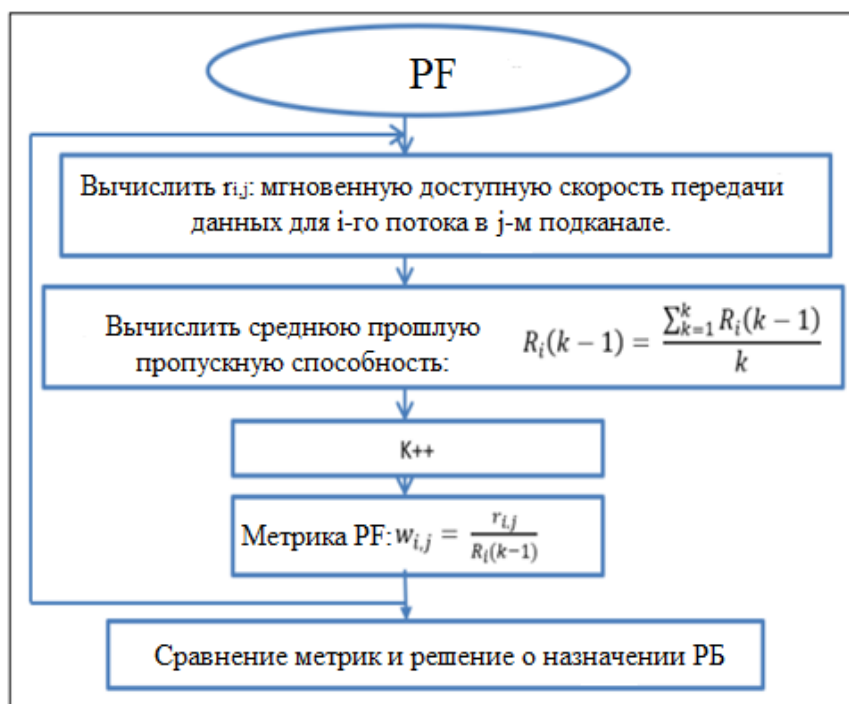


Рисунок 4

Используемые параметры могут влиять на ожидаемую пропускную способность. Следовательно, UE может обслуживать в определенное время пользователей в плохих условиях. На рис. 4 показана организационная схема этой стратегии.

2) Максимальный вес (*Max Weight*).

Решение, принятое по этой схеме, основано на критерии задержки пакетов с целью максимизации пропускной способности системы. Используется для чувствительных ко времени потоков. Математическое представление:

$$W_{i,j} = \alpha_i D_{HOL,i} \frac{r_{i,j}}{R_i}, \quad (6)$$

где: $r_{i,j}$ – мгновенная скорость; R_i – предыдущая скорость передачи; $D_{HOL,i}$ – задержка пакета *Head of Line (HOL)* и представляет собой время между поступлением конкретного пакета и его успешной передачей;

$$\alpha_i = \frac{-\log(\delta_i)}{\tau_i} \text{ – переменная, характеризующая каждый поток } i.$$

3) Экспоненциальный *PF (EXP/PF)*.

Рассматривая $D_{HOL,i}$ как время первого пакета в очереди и, учитывая критичность потоков в реальном времени (*RT*) по сравнению с потоками не в реальном времени (*NRT*) в сети *mmWave 5G*, требуя не превышения порога задержки, был введен алгоритм *EXP/PF* для продвижения трафика *RT*, где их D_{HOL} очень близко к порогу задержки (τ_i). Пороговое значение задержки зависит от типа запрашиваемой услуги. В табл. 2 показаны значения τ_i для каждого приложения и его приоритета. Уравнение для расчета этого алгоритма разбивается на две части в зависимости от типа передаваемого трафика, как показано на рис. 5.

Таблица 2.

Тип данных	Приоритет	Порог задержки τ_i
Голос	2	0,1
Видео	7	0,1
Протоколы на основе TCP (HTTP и FTP)	8	0,3

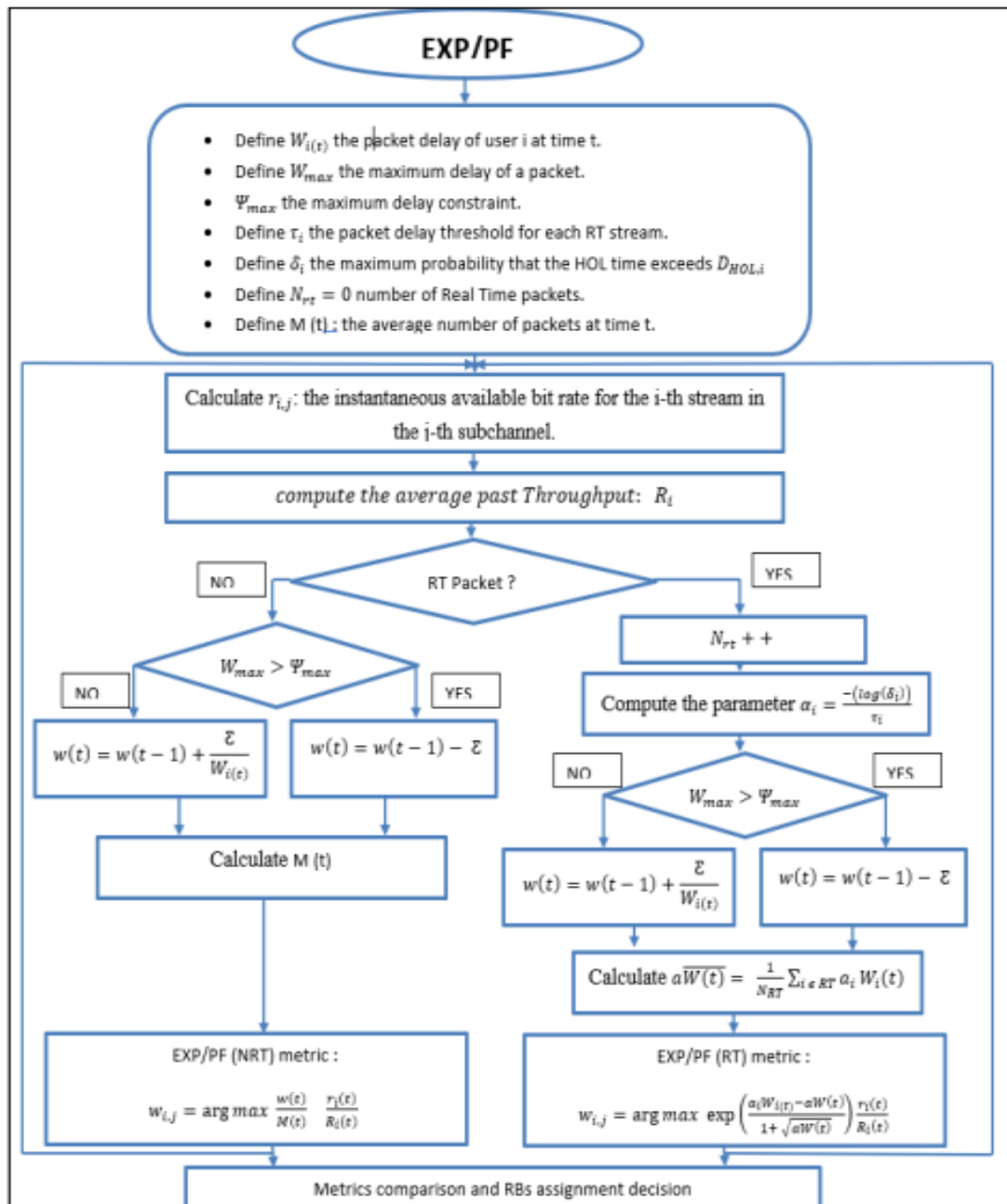


Рисунок 5

4) Экспоненциальное правило (*EXP rule*).

EXP-rule, в основном, направлен на обеспечение компромисса требований *QoS*, а именно, между скоростью передачи данных в системе, справедливостью и оптимизацией задержки [14]. Этот алгоритм основан на экспоненциальной

функции. Правило пытается минимизировать задержку, чтобы сохранить баланс между скоростью передачи данных и средним временем ожидания:

$$W_{i,j} = \frac{r_{i,j}}{R_i} \exp\left(\frac{\alpha_i D_{HOL,i}}{1+\sqrt{Y}}\right) \quad (7)$$

где: переменная, характеризующая каждый поток i : $\alpha_i = \frac{-\log(\delta_i)}{\tau_i}$,

δ_i – вероятность потери пакетов, τ_i – порог задержки.

Поскольку N – это общее количество потоков в очереди, Y выражается уравнением:

$$Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_{HOL,i} \quad (8)$$

Заключение

В данной работе рассмотрена одна из наиболее важных особенностей технологии $5G$: использование частот миллиметрового диапазона. Был выполнен обзор преимуществ и недостатков данной технологии. В результате можно сделать вывод о том, что использование *mmWave* предлагает беспрецедентную скорость передачи данных и пропускную способность сети, что делает ее важнейшим компонентом сетей $5G$. Спектр миллиметровых волн обеспечивает широкую полосу пропускания, что позволяет увеличить пропускную способность сети и выполнить одновременное подключение множества устройств. Выделены следующие ключевые недостатки: ограниченный частотный диапазон, блокировка сигнала, большие потери при проникновении, необходимость сложных технологических решений.

Выполнен обзор модуля *mmWave* в *NS-3*, который предназначен для сквозного моделирования сотовых сетей типа *3GPP*.

Рассмотрены мультинумерология и структура фрейма $5G$ NR, процедуры автоматического распределения ресурсов в $5G$ NR, а также элемент, отвечающий за распределение радиоресурсов – планировщик.

Определено, что планировщик NR должен удовлетворять нескольким ограничениям: вести мониторинг состояния пользовательского оборудования (UE), удовлетворять запрошенному QoS, производить мониторинг потоков данных в соответствии с типом приложений, а именно в режиме реального времени (RT), а также в режиме нереального времени (NRT). В дополнение к этому вести мониторинг качества канала для каждого UE, а также контроль доступных ресурсов в каждом интервале времени передачи (TTI) для повышения производительности планирования распределения ресурсов.

Рассмотрены планировщики, которые будут применены в будущих работах при проведении модельных экспериментов для оценки производительности в симуляторе *NS-3* с использованием модуля *mmWave*: пропорционально-справедливое планирование (PF), «Max-Weight», экспоненциальное правило (*Exp-Rule*), экспоненциальный PF (*EXP/PF*).

Литература

1. Mezzavilla M. et al. End-to-end simulation of 5G mmWave networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018. – Т. 20. – № 3. – С. 2237-2263.
2. Rappaport T.S. Wireless Communications: Principles and Practice, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, 2002.

3. Azzino T. et al. X-TCP: A cross layer approach for TCP uplink flows in mmWave networks // 2017 16th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net). – IEEE, 2017. – С. 1-6.
4. Zhao H. et al, «28 GHz millimeter wave cellular communication measurements for reflection and penetration loss in and around buildings in New York city», in Proc. IEEE ICC, Budapest, Hungary, 2013. – pp. 5163-5167.
5. MacCartney G.R., Deng S., Sun S. and Rappaport T.S. «Millimeterwave human blockage at 73 GHz with a simple double knife-edge diffraction model and extension for directional antennas», in Proc. IEEE 81st Veh. Technol. Conf., Montreal, QC, Canada, Sep. 2016. – pp. 1-6.
6. Barati C.N. et al. «Directional cell discovery in millimeter wave cellular networks», IEEE Trans. Wireless Commun., 2015. – vol. 14. – №. 12. – pp. 6664-6678.
7. Polese M., Giordani M., Mezzavilla M., Rangan S. and Zorzi M. «Improved handover through dual connectivity in 5G mmWave mobile networks» IEEE J. Sel. Areas Commun., 2017. – vol. 35. – №. 9. – pp. 20692084.
8. Polese M., Mezzavilla M., Zorzi M. Performance comparison of dual connectivity and hard handover for LTE-5G tight integration // arXiv preprint arXiv:1607.05425. – 2016.
9. Zhang M., Mezzavilla M., Zhu J., Rangan S. and Panwar S. «TCP dynamics over mmwave links», in Proc. IEEE 18th Int. Workshop Signal Process. Adv. Wireless Commun. (SPAWC), Jul, 2017. – pp. 1-6.
10. Baldo N. et al. An open source product-oriented LTE network simulator based on ns-3 // Proceedings of the 14th ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems, 2011. – С. 293-298.
11. URL: <https://www.nsnam.org/> (дата обращения – январь 2024 г.).
12. Пижевский М.К. 5G технологии // Modern Science, 2020. – № 6-2. – С. 309-311.
13. Ахпашев Р.В., Дроздова В.Г. Разработка средства системного моделирования 5G для анализа эффективности планировщика, 2021.
14. Raftopoulou M., Litjens R. Optimisation of numerology and packet scheduling in 5G networks: To slice or not to slice? // 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring), IEEE, 2021. – С. 1-7.