

Научная статья

УДК 621.396

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-5-16-24



Анализ энергоэффективности схемы прерывистого приема в системах связи 5G NR

Григорий Александрович Ермолаев ✉, gregory.a.ermolaev@gmail.com

Олеся Викторовна Болховская, obol@rf.unn.ru

Александр Александрович Мальцев, maltsev@rf.unn.ru

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 603950, Российская Федерация

Аннотация: Целью данной работы является анализ схем энергосбережения пользовательского оборудования в первых релизах (Release 15) систем сотовой мобильной связи пятого поколения 5G NR, а также определение возможных направлений повышения энергоэффективности этих систем. В работе описаны выявленные недостатки существующей схемы прерывистого приема, используемой для энергосбережения пользовательского оборудования в 5G NR. Путем имитационного моделирования системы проведен детальный анализ эффективности снижения потребления энергии пользовательским оборудованием при использовании схемы прерывистого приема для различных моделей трафика и ключевого сценария развертывания систем беспроводной сотовой мобильной связи 5G. Анализ результатов моделирования показал, что использование схемы прерывистого приема не позволяет достичь верхней границы возможного энергосбережения для всех исследованных моделей трафика по ряду причин, описанных в данной работе.

Ключевые слова: системы радиосвязи, энергосбережение, схема прерывистого приема, DRX, приемо-передающее оборудование, алгоритмы цифровой обработки сигналов, 5G NR

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90197.

Ссылка для цитирования: Ермолаев Г.А., Болховская О.В., Мальцев А.А. Анализ энергоэффективности схемы прерывистого приема в системах связи 5G NR // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 5. С. 16–24. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-5-16-24

Energy Efficiency Analysis of the Discontinuous Reception Scheme in 5G NR Communication Systems

Gregory Ermolaev ✉, gregory.a.ermolaev@gmail.com

Olesya Bolkhovskaya, obol@rf.unn.ru

Alexander Maltsev, maltsev@rf.unn.ru

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation

Abstract: The purpose of this work is to analyze the energy saving schemes of user equipment in the first releases (Release 15) of the fifth generation (5G NR) cellular mobile communication systems, as well as to identify possible ways to improve the energy efficiency of these systems. The paper describes the identified drawbacks of the existing discontinuous reception scheme (DRX-scheme) used for user equipment energy saving in 5G NR. The effectiveness of discontinuous reception scheme in reducing user equipment energy consumption was analyzed in detail by simulation study for various traffic models and a key scenario for the deployment of 5G wireless cellular mobile communication

systems. Analysis of the simulation results shows that the discontinuous reception scheme does not reach the upper limit of possible energy saving for all the traffic models studied for a number of reasons described in this paper.

Keywords: radio communication systems, energy saving, discontinuous reception scheme, DRX, receiving and transmitting equipment, digital signal processing algorithms, 5G NR

Funding: This research was funded by RFBR according to the research project No. 20-32-90197.

For citation: Ermolaev G., Bolkhovskaya O., Maltsev A. Energy Efficiency Analysis of the Discontinuous Reception Scheme in 5G NR Communication Systems. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2023;9(5):16–24. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-16-24

Введение

Беспроводная мобильная связь является одной из наиболее быстро развивающихся областей современных радиоэлектронных и телекоммуникационных систем. Однако проведенный анализ показывает, что стандарт LTE (аббр. от англ. Long Term Evolution) систем мобильной связи четвертого поколения (4G) не способен выполнить требования, предъявляемые потребителями к пропускной способности, времени задержки передачи данных и стабильности подключения к сети [1]. По сравнению со стандартом 4G LTE, стандарт 5G NR призван обеспечить в 20 раз более высокую пиковую скорость передачи данных и в 10 раз меньшую временную задержку [2]. В результате в системах связи пятого поколения при более высокой плотности пользователей будет реализована надежная передача данных за счет использования высокочастотных диапазонов и передовых сетевых технологий.

Для обеспечения высокоскоростной передачи в сетях 5G, несмотря на увеличение спектральной эффективности по сравнению с сетями 4G [3, 4], требуется расширение используемых частотных диапазонов, что, однако, приводит к увеличению потребления энергии как для абонентского терминала пользователя (АТ), так и для базовых станций (БС). Таким образом, помимо новых алгоритмов физического уровня для поддержания высокоскоростной стабильной работы системы связи [5–7], необходимо провести анализ и наметить пути для дальнейшего улучшения используемых в 5G NR Release 15 схем энергосбережения, особенно критичных для АТ [8–10].

Сектор радиосвязи Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Р) определяет энергоэффективность как одно из технических требований к производительности систем стандарта мобильной сотовой связи IMT-2020 (Международная мобильная связь 2020). Согласно отчету МСЭ-Р [2], энергоэффективность устройства может быть оценена, исходя из двух критериев:

- эффективности (качества) передачи данных в случае высокой загруженности системы связи;
- низкого энергопотребления при отсутствии передаваемых данных.

Качество передачи данных в случае высокой загрузки системы связи определяется средней спектральной эффективностью. Низкое энергопотребление при отсутствии данных можно оценить по доле времени, в котором пользователь находится в спящем режиме.

Заметная часть потребляемой АТ энергии в 5G NR, как и в 4G LTE, приходится на режим доступа к сети (режим RRC_CONNECTED [1], аббр. от англ. Radio Resource Control connected), что обуславливается обработкой всей агрегированной полосы частот, активными электрическими радиочастотными цепями приема/передачи, мониторингом контрольной информации, а также динамическими переходами в энергосберегающий режим и выходами из него. Для обеспечения контроля над энергопотреблением АТ в первом релизе (Release 15) стандарта 5G NR используется внедренная еще в 4G LTE схема прерывистого приема (схема DRX, аббр. от англ. Discontinuous Reception) [1]. Выявленные в настоящей работе недостатки существующей схемы энергосбережения позволяют определить основные направления дальнейших исследований для повышения энергоэффективности АТ в последующих релизах стандарта 5G NR.

1. Методы энергосбережения пользовательского оборудования в системах мобильной связи 4G LTE

Трафик пакетов данных часто бывает очень интенсивным, с периодическими интервалами передачи, за которыми следуют более длительные периоды «молчания». С точки зрения задержки передачи данных, полезно отслеживать управляющую сигнализацию нисходящей линии связи (Downlink) от БС к пользователю в каждом временном слоте, чтобы получать гранты (разрешения) для передачи по восходящей линии связи (Uplink) или передачи данных в Downlink и мгновенно реагировать на изменения в поведении трафика. В то же время, такой график мониторинга сопряжен с большими затратами с точки зрения энергопотребления устройства, так как энергозатраты электрической схемы приемника в мобильном устройстве составляют большую часть от его общего энергопотребления.

Алгоритм прерывистого приема

Для снижения энергопотребления мобильного устройства, стандарт 5G NR включает в себя механизм прерывистого приема, следующий той же схеме применения, что и в 4G LTE [1], но с доработками, учитывающими новые нумерологии, поддерживаемые стандартом связи 5G NR.

Основным элементом DRX-схемы является настраиваемый DRX-цикл. В соответствии с DRX-схемой, АТ переходит в активное состояние, включая при этом таймер On duration, с определенной периодичностью, равной длительности DRX-цикла. При сконфигурированном DRX-цикле АТ мобильного устройства отслеживает контрольную информацию, передаваемую в Downlink, только в активном состоянии, переходя в спящий режим, т. е., выключая электрическую схему приемника в оставшееся время (см. рисунок 1), если до истечения длительности работы таймера On duration АТ не получило контрольную информацию от БС.

Это позволяет значительно снизить энергопотребление: чем дольше цикл, тем больший процент времени АТ находится в спящем режиме, т. е. тем ниже среднее энергопотребление в единицу времени. Однако это подразумевает введение ограничений для планировщика передачи данных на БС, поскольку передача для мобильного устройства может быть запланирована и доведена до него только тогда, когда оно активно (включен его приемник) в соответствии с DRX-циклом.

Во многих ситуациях, если передача на мобильное устройство была запланирована и устройство активно принимает или передает данные, весьма вероятно, что в ближайшем будущем будет запланирована следующая передача. Одной из причин может быть то, что было невозможно передать все данные из буфера передачи при использовании одной передачи в Downlink, и, следовательно, необходимы дополнительные передачи.

Ожидание следующего активного периода, т. е. начала следующего цикла, в соответствии с DRX-схемой приведет к дополнительным задержкам. Следовательно, чтобы уменьшить задержки, мобильное устройство пользователя остается в активном состоянии, т. е. с включенным приемником, в течение определенного настраиваемого времени после последней передачи от БС. АТ реализует это, запуская таймер бездействия (*от англ. Inactivity timer*) каждый раз после приема данных, и оставаясь до окончания работы таймера в режиме включенного приемника для мониторинга следующего планирования передачи данных от БС. В связи с тем, что стандартом связи 5G NR поддерживается несколько нумерологий, длительности таймеров DRX-схемы ниже указаны в миллисекундах для отвязки их от определенной нумерологии.

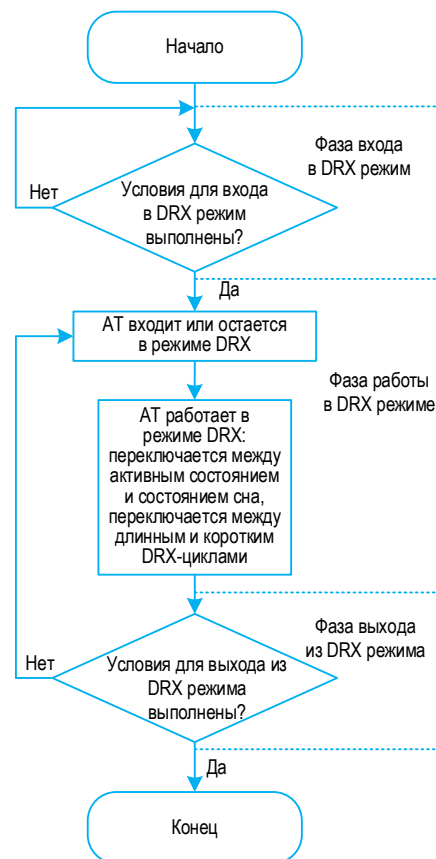


Рис. 1. Блок-схема алгоритма работы схемы прерывистого приема

Fig. 1. Block Diagram of the Operation Algorithm of the Discontinuous Reception Scheme

Проблемные места алгоритма прерывистого приема

На рисунке 2 приведены диаграммы распределения расхода энергии во времени при использовании DRX-схемы (в соответствии со стандартом 5G NR Release 15) и распределения размера буфера данных для передачи на БС. На рисунке 2 показаны основные состояния и работа таймеров DRX-схемы:

1) глубокий сон – неактивное состояние с наименьшим расходом энергии в единицу времени (на рисунке 2 показано желтым цветом); АТ переходит в данное состояние, если временной интервал до следующего перехода в активное состояние больше или равен 20 мс;

2) легкий сон – неактивное состояние с большим расходом энергии в единицу времени, чем в состоянии глубокого сна (на рисунке 2 показано зеленым цветом); АТ переходит в данное состояние, если временной интервал до следующего перехода в активное состояние больше или равен 6 мс и меньше 20 мс;

3) активное состояние – режим, в котором АТ производит мониторинг контрольной информации и/или прием данных; АТ находится в данном режиме во время включенных таймеров On duration (начало каждого DRX-цикла) и Inactivity timer (после каждого приема данных); на рисунке 2

промежутки времени, когда АТ находится в активном состоянии, показаны синим (On duration) и фиолетовым цветом (Inactivity timer).

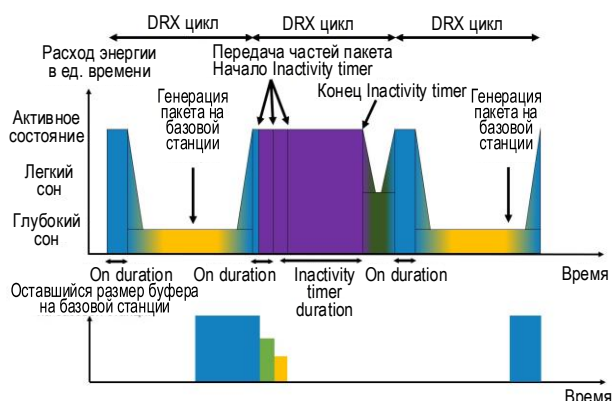


Рис. 2. Распределение расхода энергии во времени при использовании

Fig. 2. Energy Consumption Distribution over Time when Using the Discontinuous Reception Scheme

Как можно увидеть из рисунка 2, за счет периодического перехода в состояние сна, т. е. отключения электрической схемы приемника, значительно сокращается среднее количество потраченной пользователем энергии за единицу времени. Однако из приведенных диаграмм также видно, что в течение каждого DRX-цикла существуют отрезки времени, в течение которых АТ было в активном состоянии, в то время, когда на БС не было ни одного пакета данных для этого пользователя.

Таким образом, из проведенного анализа можно выделить два основных проблемных места DRX-схемы из стандарта 4G LTE:

1) продолжительность работы таймера On duration в случае, когда на БС нет пакета для пользователя перед началом DRX-цикла (первый и третий DRX-циклы);

3) большая продолжительность работы таймера Inactivity после передачи последней части пакета (DRX-цикл 2). В данном случае, если в течение работы таймера Inactivity на БС не появился новый пакет, то за время всей работы таймера пользователь также находится в активном состоянии, в то время как на БС нет пакета для пользователя.

Первый из недостатков DRX-схемы приема, описанных выше, обуславливается тем, что в 5G NR Release 15 АТ пробуждается, т. е. включает электрическую схему приемника в начале каждого DRX-цикла. Таким образом, когда пакеты на БС отсутствуют для определенного АТ, будет тратиться энергия на мониторинг контрольной информации в течение работы таймера On duration. Такие случаи часто встречаются в случае разреженного трафика.

Второй недостаток схемы прерывистого приема из описанных выше оказывает большее негативное воздействие на энергоэффективность АТ по

причине относительно большей длительности работы Inactivity timer по сравнению с таймером On duration. Например, для стандартных параметров модели трафика FTP 3 (аббр. от англ. File Transfer Protocol 3) оптимальная (с точки зрения сохранения задержки передачи пакета) конфигурация DRX-цикла включает в себя длительности таймеров On duration и Inactivity равные 8 мс и 100 мс, соответственно. Поэтому в течение работы таймера Inactivity АТ будет терять много энергии.

2. Описание системной модели сети связи

Моделирование системы связи 5G для изучения схем энергосбережения АТ проводилось с использованием симулятора системного уровня, основанного на стандарте 5G NR Release 15 [11–14], в котором можно выделить следующие основные блоки:

- 1) развертывание сети – расположение БС согласно типовой структуре сети мобильной сотовой связи, генерация координат пользователей согласно равномерному распределению;
- 2) генерация канала связи для процедур ассоциации пользователей к БС, вычисления пользователем информации о состоянии канала (CSI, аббр. от англ. Channel State Information) для передачи на БС и для процедуры приема сигнала пользователем в течение всего времени симуляции системы связи;
- 3) ассоциация мобильных устройств к БС и инициализация связи с БС для каждого АТ;
- 4) генерация обратной связи о состоянии канала (от англ. CSI feedback) от пользователя к БС;
- 5) блок обработки состояния пользователя согласно алгоритму работы DRX-схемы;
- 6) планировщик передач на БС, выбирающий пользователя (или группу пользователей) для MU-MIMO (от англ. Multi User Multiple-Input and Multiple-Output) схемы передачи данных, оптимальный ранг диаграммы направленности (количество пространственных каналов передачи) и оптимальную конфигурацию диаграммы направленности (весовые коэффициенты для антенной решетки), используя алгоритм пропорционального справедливого (от англ. Proportional Fair Algorithm) распределения частотно-временных ресурсов;
- 7) блок учета интерференции между БС;
- 8) MMSE (аббр. от англ. Minimum Mean Square Error) приемник;
- 9) абстракция оценки канала связи для имитации ошибки при его оценивании;
- 10) абстракция канального кодирования/декодирования на физическом уровне (от англ. Physical Layer Abstraction) для имитации схемы помехоустойчивого кодирования с использованием кодов с малой плотностью проверки на четность (от англ. LDPC codes, Low-Density Parity-Check codes) из стандарта связи NR.

Сценарии моделирования беспроводных мобильных систем связи

При разработке новых релизов стандарта 5G NR используются три ключевых сценария, принятых консорциумом 3GPP (аббр. от англ. 3rd Generation Partnership Project) для моделирования системы связи 5G на системном уровне [15]:

1) UMi (аббр. от англ. Urban Micro) – сценарий моделирования открытой городской местности размера порядка 200 м;

2) UMa (аббр. от англ. Urban Macro) – сценарий моделирования города с БС, смонтированными над уровнями крыш окружающих зданий;

3) Indoor – сценарий моделирования работы системы связи, предназначенный для описания различных типичных сценариев развертывания сети связи внутри помещений, включая офисные помещения и торговые центры.

При анализе DRX-схемы в данной работе моделирование проводилось для UMa-сценария, так как он описывает наиболее часто встречающийся в реальности сценарий развертывания систем беспроводной мобильной связи в больших городах.

Модели трафика мобильных систем связи

Перед началом разработки систем связи 4G LTE модели трафика были представлены группой TSG-RAN WG1 (аббр. от англ. Technical Specification Group Radio Access Network Working Group 1) консорциума 3GPP в документе [16], который содержит конкретные примеры и соответствующие параметры для каждой модели. Этот документ включает описание комплексных моделей трафика для наиболее важных сервисов, таких как FTP, Web-browsing (просмотр веб-страниц), Video streaming (потокное видео), Gaming (игровой трафик) и модель передачи голосового трафика VoIP (аббр. от англ. Voice over Internet Protocol).

Рассмотрение каждой модели трафика одинаково важно при анализе энергоэффективности АТ, так как каждый тип трафика составляет заметную часть в общем объеме. В таблице 1 показано примерное процентное распределение пакетов пользователей (по разным типам трафика) в реальных системах беспроводной мобильной связи, полученное на основе анализа реальных данных [16].

ТАБЛИЦА 1. Распределение пакетов пользователей по типам трафика

TABLE 1. Percentage Distribution of User Packets by Traffic Types

Модель	Категория трафика	Процент трафика
FTP	Сервис с негарантированной доставкой	10 %
VoIP	Трафик с передачей в реальном времени	30 %
Web Browsing	Интерактивный	20 %
Video Streaming	Потоковая передача данных	20 %
Gaming	Интерактивный трафик с передачей в реальном времени	20 %

При моделировании системы связи 5G на системном уровне использовались значения параметров моделей трафика из [16], за исключением модели трафика FTP 3, для которой в начале разработки стандарта NR консорциумом 3GPP был выбран фиксированный размер пакетов, равный 0.5 Мбайт, со средним временем между приходами пакетов – 0.2 с.

3. Результаты компьютерного моделирования. Анализ энергоэффективности схемы прерывистого приема

Эффективность использования DRX-схемы для сокращения энергии, потребляемой АТ в системах беспроводной связи стандарта 5G NR Release 15, была проанализирована путем компьютерного моделирования на системном уровне. Моделирование проводилось для передачи в Downlink в частотном диапазоне FR1 (аббр. от англ. Frequency Range 1 [17]). Были выбраны стандартные параметры для данного сценария, такие как: несущая частота 4 ГГц, ширина полосы частот 100 МГц, расстояние между поднесущими 30 кГц. Использовалось расстояние между БС, равное 200 м для моделирования плотного расположения БС в UMa-сценарии.

Параметры моделирования на системном уровне представлены в таблице 2 (в соответствии с принятыми моделями канала и обозначениями из [15]).

ТАБЛИЦА 2. Параметры моделирования

TABLE 2. Simulation Parameters

Параметр	Значение
Несущая частота	4 ГГц
Сценарий	Dense Urban Macro FR1 DL
Ширина полосы частот	100 МГц
Расстояние между поднесущими	30 кГц
Модель канала связи	IMT UMa A
Расстояние между БС	200 м
Антенная конфигурация БС ($M_g, N_g, M, N, P, M_p, N_p$)	(1, 1, 8, 8, 2; 2, 8) 32 приемного/передающего элемента
Расстояние между антеннами БС (d_V, d_H) $\times \lambda$	(0.8, 0.5)
Антенная конфигурация АТ ($M_g, N_g, M, N, P, M_p, N_p$)	(1, 1, 1, 2, 2; 1, 2) 4 приемных/передающих элементов
Расстояние между антеннами АТ (d_V, d_H) $\times \lambda$	(0.5, 0.5)
Конфигурация аналоговой диаграммы направленности БС	Одинарный луч в направлении 102 ° от вертикального направления

Параметр	Значение
Распределение АТ	80 % внутри помещения; 20 % вне помещения
Наивысшая модуляция	256 QAM
Схема канального кодирования	LPDC из стандарта 5G NR Release 15
Схема приема/передачи	Многопользовательская MIMO-схема: до 12 пространственных потоков на БС; до 4 пространственных потоков на АТ
Планировщик	Выбор пользователя, оптимального ранга (количества пространственных каналов передачи) и оптимальной конфигурации диаграммы направленности, используя многопользовательский алгоритм пропорционального справедливого распределения обслуживания
Схема обратной связи	Type II CSI

Для моделирования потребляемой пользователем энергии были определены типы временных слотов в зависимости от операции [18], которую пользователь производит в определенном слоте, или, другими словами, в зависимости от состояния, в котором пользователь находится в определенном слоте.

Модель потребляемой пользователем энергии для каждого состояния представлена в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3. Модель потребляемой энергии

TABLE 3. Energy Consumption Model

Состояние пользовательского оборудования	Потребляемая энергия за временной слот, усл. ед.
Активное состояние (мониторинг контрольной информации)	100
Активное состояние (прием пользователем данных)	300
Режим микросна	45
Режим легкого сна	20
Переход в легкий сон	100 (за всю длительность перехода)
Режим глубокого сна	1
Переход в глубокий сон	450 (за всю длительность перехода)

Значения потребляемой энергии за временной слот в данной модели представлены в условных единицах после нормировки на энергию, потребляемую в режиме глубокого сна. Таким образом, потребляемая энергия за временной слот в течение режима глубокого сна равна единице.

При моделировании для различных моделей трафика, описанных в [16], использовались определенные оптимизированные конфигурации [18] DRX-схемы, представленные в таблице 4, определяющие длительности разных состояний АТ согласно DRX-схеме.

ТАБЛИЦА 4. Конфигурации DRX-схемы

TABLE 4. Configurations of DRX-Scheme

Модель трафика	Длительность, мс		
	DRX цикл	Inactivity timer	On duration
FTP model 3	160	100	8
Instant Messaging	320	80	10
VoIP	40	10	4
Gaming	40	10	4
Web browsing	320	80	10
Video streaming	40	10	4

При моделировании на системном уровне, как и в реальном сценарии развертывания систем связи, пользователи могут находиться в разных условиях, определяемых:

1) загруженностью БС соседних сот; это определяет уровень межсотовой интерференции (*от англ. Inter-Cell Interference*) и, следовательно, отношение сигнал/помеха плюс шум (ОСПШ, *аббр. от англ. SINR, Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) на приемнике АТ;

2) расстоянием между АТ и обслуживающей БС по причине квадратичной зависимости в свободном пространстве потерь мощности сигнала от расстояния между источником и приемником; также более удаленные от обслуживающей БС пользователи оказываются ближе к БС соседних сот, что также увеличивает уровень межсотовой интерференции;

3) расположением АТ внутри или вне помещения; для АТ, расположенного внутри помещения, значительное ослабление ОСПШ принятого сигнала вызвано потерями при прохождении сигнала внутрь помещения.

По указанным причинам результаты моделирования энергоэффективности DRX-схемы далее представлены отдельно для трех групп пользователей, для которых ОСПШ соответствует 5 %, 50 % и 95 % уровням интегральной функции распределения ОСПШ, представленной на рисунке 3.

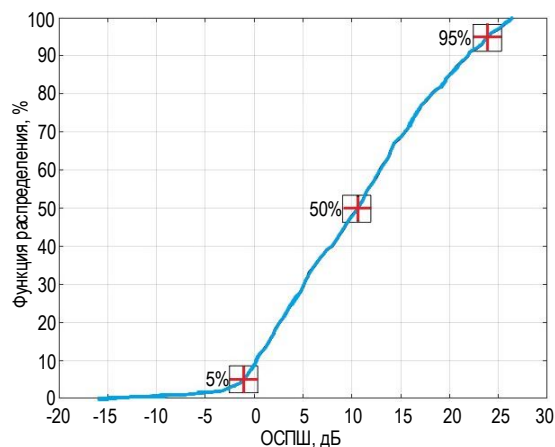


Рис. 3. Функция распределения ОСПШ

Fig. 3. SINR Distribution Function

На рисунке 3 показана полученная путем имитационного моделирования рассматриваемой системы связи интегральная функция распределения так называемого геометрического ОСПШ, при вычислении которого в мощности принятого сигнала не учитывается усиление диаграмм направленности антенных решеток БС и АТ.

В таблице 5 приведены результаты компьютерного моделирования системы связи 5G на системном уровне для всех представленных моделей трафика.

ТАБЛИЦА 5. Выигрыш в энергосбережении при использовании DRX-схемы, %

TABLE 5. Energy Saving Gain when Using the DRX Scheme

ОСПШ	Выигрыш в энергосбережении, %					
	FTP3	IM	VoIP	Gaming	Web browsing	Video streaming
5 %	51	92	71	65	95	57
50 %	55	92	71	65	95	57
95 %	56	92	71	65	95	58

Полученный путем имитирования работы системы связи выигрыш в энергосбережении АТ за счет использования DRX-схемы представлен для трех основных точек интегральной функции распределения ОСПШ (см. рисунок 3). Выигрыш рассчитывается в процентном отношении и равен уменьшению среднего значения потребляемой энергии в

единицу времени при использовании DRX-схемы по сравнению с конфигурацией работы АТ без использования DRX-схемы, т. е. по сравнению с АТ, находящимся постоянно в активном состоянии.

Для проведения более детального анализа энергоэффективности системы в дополнение к параметрам каждой модели трафика и конфигурации DRX-цикла целесообразно использовать информацию о загруженности частотно-временных ресурсов на БС при моделировании различных моделей трафика, что позволяет оценить верхнюю границу возможного сокращения потребляемой АТ энергии. Эта оценка может быть получена путем вычисления среднего процента неиспользованных частотно-временных ресурсов системы связи без применения DRX-схемы.

В таблице 6 представлены доли использованных (строка 1) и неиспользованных ресурсов (строка 2) на БС для всех анализируемых в данной работе моделей трафика. В третьей строке таблицы приведена оценка возможного дополнительного сокращения потребляемой АТ энергии, не достигаемое при использовании DRX-схемы. Значения оценки получены для АТ с медианным (50 %) уровнем ОСПШ путем вычитания из среднего процента неиспользованных частотно-временных ресурсов (строка 2 таблицы 6) достигаемого выигрыша в энергосбережении при использовании DRX-схемы (см. строку 2 таблицы 5).

ТАБЛИЦА 6. Доли использованных/неиспользованных частотно-временных ресурсов

TABLE 6. Percentage of Used/Unused Time-Frequency Resources

	FTP3	IM	VoIP	Gaming	Web browsing	Video streaming
Загруженность ресурсов на БС, %	28	1	3.5	11	< 1	28
Средняя доля неиспользованных частотно-временных ресурсов, %	72	99	96.5	89	>99	72
Сокращение потребляемой АТ энергии, недостижимое схемой DRX, %	~16	~7	~26	~24	~5	~14

Возможное сокращение потребляемой АТ энергии, не достигаемое при использовании DRX-схемы и приведенное в строке 3 таблицы 6, обусловлено неоптимальным распределением интервалов времени в DRX-цикле (см. рисунок 2), и связано, в основном, с интервалами времени, когда АТ находится в активном состоянии, и в то же время на БС отсутствуют пакеты для данного АТ.

Таким образом, для улучшения энергоэффективности АТ в последующих релизах систем связи 5G NR является разработка методов адаптации DRX-схемы за счет использования передачи от БС пользователю определенной контрольной информации, сигнализирующей о состоянии буфера данных на БС, для предотвращения перехода АТ в активное состояние или для перехода АТ в состояние сна, когда на БС отсутствуют пакеты для данного АТ.

Заключение

В статье проведен подробный анализ работы DRX-схемы, используемой для энергосбережения АТ в первом релизе систем сотовой мобильной связи 5G NR Release 15.

В ходе работы были реализованы сценарии моделирования систем беспроводной мобильной связи и модели трафика данных, принятые консорциумом 3GPP. Путем имитационного моделирования системы, работающей по стандарту 5G NR Release 15, проведен детальный анализ эффективности снижения потребления энергии АТ при использовании DRX-схемы для различных моделей трафика и наиболее важного UMa сценария (Dense Urban Macro) развертывания систем беспроводной сотовой мобильной связи 5G в городских условиях.

Анализ результатов моделирования показал, что использование DRX-схемы не позволяет достичь верхней границы возможного энергосбережения для исследованных моделей трафика по причине неоптимального распределения интервалов времени различных состояний пользователя в DRX-цикле, и это связано, в основном, с интервалами времени, когда АТ находится в активном состоянии, в то время

как на БС отсутствуют пакеты для данного пользователя.

Направлением повышения энергоэффективности АТ в системах связи 5G NR следующих релизов является введение дополнительной контрольной информации, передаваемой от БС пользователям, для оптимизации распределения временных интервалов различных состояний АТ в DRX-цикле.

Список источников

1. Dahlman E., Parkvall S., Skold J. *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*. Academic Press, 2018.
2. Rec. ITU-R M.2410-0 (2017). Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s).
3. Mondal B., Sergeev V., Sengupta A., Ermolaev G., Davydov A., Kwon E., et al. MU-MIMO and CSI Feedback Performance of NR/LTE // *Proceedings of the 53rd Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS, Baltimore, USA, 20–22 March 2019)*. IEEE, 2019. PP. 1–6. DOI:10.1109/CISS.2019.8692922
4. Бурков А.А., Тюрликов А.М. Верхняя оценка спектральной эффективности для систем с гибридной решающей обратной связью при ограничении на вид модуляции // *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. 2020. № 1. С. 74–83.
5. Ermolaev G.A., Bolkhovskaya O.V., Maltsev A.A. Advanced Approach for TX Impairments Compensation Based on Signal Statistical Analysis at the RX Side // *Proceedings of the International Scientific Conference on Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF, St. Petersburg, Russia, 31 May 2021 – 04 June 2021)*. IEEE, 2021. PP. 1–5. DOI:10.1109/WECONF51603.2021.9470687
6. Болховская О.В., Ермолаев Г.А., Трушков С.Н., Мальцев А.А. Прототип приемопередающего оборудования скоростной передачи данных в частотном диапазоне 57–64 ГГц // *Труды учебных заведений связи*. 2023. Т. 9(2). С. 23–39. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-2-23-39
7. Burkov A., Shneer S., Turlikov A. An Achievability Bound of Energy Per Bit for Stabilized Massive Random Access Gaussian Channel // *IEEE Communications Letters*. 2020. Т. 25. № 1. PP. 299–302. DOI:10.1109/LCOMM.2020.3023461
8. Herreria-Alonso S., Rodriguez-Perez M., Fernandez-Veiga M., Lopez-Garcia C. Adaptive DRX Scheme to Improve Energy Efficiency in LTE Networks with Bounded Delay // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2015. Vol. 33. Iss. 12. PP. 2963–2973. DOI:10.1109/JSAC.2015.2478996
9. Wang H.C., Tseng C.C., Chen G.Y., Kuo F.C., Ting K.C. Power saving by LTE DRX mechanism using a mixture of short and long cycles // *Proceedings of the International Conference of IEEE Region 10 (TENCON 2013, Xi'an, China, 22–25 October 2013)*. IEEE, 2013. PP. 1–6. DOI:10.1109/TENCON.2013.6719041
10. Arunagiri P., Nagarajan G. Optimization of power saving and Latency in LTE network using DRX mechanism // *Proceedings of the 10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO, Coimbatore, India, 07–08 January 2016)*. IEEE, 2016. PP. 1–4. DOI:10.1109/ISCO.2016.7727036
11. ETSI TS 138.211 (2020-07). NR; Physical channels and modulation (3GPP TS 38.211 version 16.2.0 Release 16).
12. ETSI TS 138.212 (2018-07). NR; Multiplexing and channel coding (3GPP TS 38.212 version 15.2.0 Release 15).
13. ETSI TS 138.213 (2018-07). NR; Physical layer procedures for control (3GPP TS 38.213 version 15.2.0 Release 15).
14. ETSI TS 138.214 (2018-10). NR; Physical layer procedures for data (3GPP TS 38.214 version 15.3.0 Release 15).
15. ETSI TS 138.901 (2020-11). Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 16.1.0 Release 16).
16. 3GPP R1-070674. LTE Physical Layer Framework for Performance Verification. 2007.
17. ETSI TS 138.101-1 (2018-10). 5G; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone (3GPP TS 38.101-1 version 15.3.0 Release 15).
18. ATIS.3GPP.38.840.V1600 (2019-06). Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Study on User Equipment (UE) power saving in NR (Release 16).

References

1. Dahlman E., Parkvall S., Skold J. *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*. Academic Press; 2018.
2. Rec. ITU-R M.2410-0. *Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)*. 2017.
3. Mondal B., Sergeev V., Sengupta A., Ermolaev G., Davydov A., Kwon E., et al. MU-MIMO and CSI Feedback Performance of NR/LTE. *Proceedings of the 53rd Annual Conference on Information Sciences and Systems, CISS, 20–22 March 2019, Baltimore, USA*. IEEE; 2019. p.1–6. DOI:10.1109/CISS.2019.8692922
4. Burkov A.A., Turlikov A.M. An Upper Estimate of the Spectral Efficiency for Systems with Hybrid Automatic Repeat Request with a Restriction on the Type of Modulation. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*. 2020;1:74–83.
5. Ermolaev G.A., Bolkhovskaya O.V., Maltsev A.A. Advanced Approach for TX Impairments Compensation Based on Signal Statistical Analysis at the RX Side. *Proceedings of the International Scientific Conference on Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF, 31 May 2021 – 04 June 2021, St. Petersburg, Russia*. IEEE; 2021. p.1–5. DOI:10.1109/WECONF51603.2021.9470687
6. Bolkhovskaya O., Ermolaev G., Trushkov S., Maltsev A. Prototype of High-Speed Data Transmission Receiving and Transmitting Equipment in the 57–64 GHz Frequency Range. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2023;9(2):23–39. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-2-23-39

7. Burkov A., Shneer S., Turlikov A. An Achievability Bound of Energy Per Bit for Stabilized Massive Random Access Gaussian Channel. *IEEE Communications Letters*. 2020;25(1):299–302. DOI:10.1109/LCOMM.2020.
8. Herreria-Alonso S., Rodriguez-Perez M., Fernandez-Veiga M., Lopez-Garcia C. Adaptive DRX Scheme to Improve Energy Efficiency in LTE Networks with Bounded Delay. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2015;33(12):2963–2973. DOI:10.1109/JSAC.2015.2478996
9. Wang H.C., Tseng C.C., Chen G.Y., Kuo F.C., Ting K.C. Power saving by LTE DRX mechanism using a mixture of short and long cycles. *Proceedings of the International Conference of IEEE Region 10, TENCON 2013, 22–25 October 2013, Xi'an, China*. IEEE; 2013. p.1–6. DOI:10.1109/TENCON.2013.6719041
10. Arunagiri P., Nagarajan G. Optimization of power saving and Latency in LTE network using DRX mechanism. *Proceedings of the 10th International Conference on Intelligent Systems and Control, ISCO, 07–08 January 2016, Coimbatore, India*. IEEE; 2016. p.1–4. DOI:10.1109/ISCO.2016.7727036
11. ETSI TS 138.211. NR; Physical channels and modulation (3GPP TS 38.211 version 16.2.0 Release 16). July 2020.
12. ETSI TS 138.212. NR; Multiplexing and channel coding (3GPP TS 38.212 version 15.2.0 Release 15). July 2018.
13. ETSI TS 138.213. NR; Physical layer procedures for control (3GPP TS 38.213 version 15.2.0 Release 15). July 2018.
14. ETSI TS 138.214. NR; Physical layer procedures for data (3GPP TS 38.214 version 15.3.0 Release 15). October 2018.
15. ETSI TS 138.901. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 16.1.0 Release 16). November 2020.
16. 3GPP R1-070674. LTE physical layer framework for performance verification. 2007.
17. ETSI TS 138.101-1. 5G; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone (3GPP TS 38.101-1 version 15.3.0 Release 15). October 2018.
18. ATIS.3GPP.38.840.V1600. Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Study on User Equipment (UE) power saving in NR (Release 16). June 2019.

Статья поступила в редакцию 01.08.2023; одобрена после рецензирования 31.10.2023; принята к публикации 07.11.2023.

The article was submitted 01.08.2023; approved after reviewing 31.10.2023; accepted for publication 07.11.2023.

Информация об авторах:


ЕРМОЛАЕВ
Григорий Александрович

аспирант кафедры статистической радиофизики и мобильных систем связи Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

 <https://orcid.org/0000-0003-4213-953X>


БОЛХОВСКАЯ
Олеся Викторовна

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры статистической радиофизики и мобильных систем связи Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

 <https://orcid.org/0000-0002-6679-9295>

МАЛЬЦЕВ
Александр Александрович

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой статистической радиофизики и мобильных систем связи Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

 <https://orcid.org/0000-0001-8694-0033>