

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.143

Применение физического уровня 5G NR в космических коммуникациях, оценка эффективности

Рогожников Е. В., Дмитриев Э. М., Кондрашов Д. А., Крюков Я. В.,
Коновальчиков А. В., Мухамадиев С. М.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, <http://tusur.ru/>
Томск 634050, Российская Федерация

E-mail: evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru, edegor1993@mail.ru, danila.a.kondrashov@tusur.ru, iakov.v.kriukov@tusur.ru,
artem.konovalchikov@tusur.ru, mukhamadiev@mail.ru

Поступила 02.09.2023, рецензирована 09.09.2023, принята 16.09.2023, опубликована 15.03.2024.

Представлена действительным членом РАЕН А.С. Дмитриевым

Аннотация: Канал распространения существенно модифицируется в случае технологии радиодоступа нового радио 5-го поколения (5G NR) в системах космической связи. В частности, возникают большие задержки по отношению к наземному каналу распространения, а затухание сигнала увеличивается, что приводит к снижению отношения сигнал/шум (SNR). Доплеровский сдвиг несущей частоты также существенно увеличивается из-за высокой скорости космического корабля (КА) относительно пользовательского оборудования (АП). Цель работы – исследование возможностей декодирования физических каналов и сигналов системы 5G NR в случае ее применения в системах спутниковой связи (СКС), а также расчет производительности такой системы для оценки применимости 5G NR в СКС. Способность правильно декодировать сигналы и каналы в зависимости от SNR оценивается с помощью математического моделирования сигнала 5G NR и формирования канала совместно с моделью Quasi Deterministic Radio Channel Generator (QuaDRiGa). В рамках исследования сделаны выводы о применимости технологии радиодоступа 5G NR в среде космической связи.

Ключевые слова: 5G NR, системы спутниковой связи, оценка производительности, технология радиодоступа, QuaDRiGa, декодирование сигналов и каналов 5G NR

УДК 621.396.41

Для цитирования: Рогожников Е.В., Дмитриев Э.М., Кондрашов Д.А., Крюков Я.В., Коновальчиков А.В., Мухамадиев С.М. Применение физического уровня 5G NR в космических коммуникациях, оценка эффективности. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(1):143-156. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.143.

Application of the 5g Nr Physical Layer in Space Communications, Performance Evaluation

Evgeniy V. Rogozhnikov, Edgar M. Dmitriev, Danila A. Kondrashov, Yakov V. Kryukov,
Artem V. Konovalchikov, Semyon M. Mukhamadiev

Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, <http://tusur.ru/>
Tomsk 634050, Russian Federation

E-mail: evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru, edegor1993@mail.ru, danila.a.kondrashov@tusur.ru, iakov.v.kriukov@tusur.ru,
artem.konovalchikov@tusur.ru, mukhamadiev@mail.ru

Received September 02, 2023, peer-reviewed September 09, 2023, accepted September 16, 2023, published March 15, 2024.

Abstract: The propagation channel is significantly modified in the case of 5th Generation New Radio radio access technology (5G NR) in space communication systems. In particular, large delays occur with respect to the terrestrial propagation channel, and signal attenuation increases, resulting in a lower signal-to-noise ratio (SNR). The Doppler shift of the carrier frequency is also significantly

increased due to the high velocity of the spacecraft (SC) relative to the user equipment (UE). The aim of the work is to investigate the decoding capability of the physical channels and signals of the 5G NR system in case of its application in satellite communication systems (SCS), as well as to calculate the performance of such a system to assess the applicability of 5G NR in SCS. The ability to correctly decode signals and channels depending on SNR is evaluated using mathematical modelling of 5G NR signal and channel shaping in conjunction with the Quasi Deterministic Radio Channel Generator (QuaDRiGa) model. The research within the paper draws conclusions on the applicability of 5G NR radio access technology in a space communications environment.

Keywords: 5G NR, satellite communication systems, performance evaluation, radio access technology, QuaDRiGa, decoding of 5G NR signals and channels

UDC 621.396.41

For citation: Evgeniy V. Rogozhnikov, Edgar M. Dmitriev, Danila A. Kondrashov, Yakov V. Kryukov, Artem V. Konovalchikov, Semyon M. Mukhamadiev. Application of the 5G NR Physical Layer in Space Communications, Performance Evaluation. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(1):143-156e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.143.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (144)
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ (145)
 - 2.1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФИЗИЧЕСКИХ КАНАЛОВ И СИГНАЛОВ (145)
 - 2.2. СПУТНИКОВЫЙ КАНАЛ ПЕРЕДАЧИ (149)
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ (150)
 - 3.1. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМЫ (150)
 - 3.2. ОЦЕНКА СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ (154)
 - 3.3 ВЛИЯНИЕ ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ НА ОБРАБОТКУ СИГНАЛА (156)
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (156)

ЛИТЕРАТУРА (156)

1. ВВЕДЕНИЕ

Интеграция спутниковой связи и беспроводных наземных сетей активно обсуждается в контексте систем с применением 5G NR. Фактически, преимущества включения космических аппаратов в такие сети 5G заключаются в неоспоримой эффективности спутников для обеспечения повсеместного покрытия, а совместимость между различными интерфейсами радиодоступа изучаются в 3GPP с момента выхода стандарта 3GPP TS 38.300 16 версии.

Рассмотрен ряд работ [1-5], посвященных обзору последних разработок в области процедур случайного доступа и физического уровня для поддержки спутниковой связи в сетях 5G, а также испытаниям некоторых решений.

Основными источниками проблем для 5G NR в космическом канале связи являются большая задержка распространения сигнала,

большее ослабление сигнала и большое доплеровское смещение в спутниковых каналах, относительно Земных. Расстояния между абонентским устройством и базовой станцией, расположенной на КА в ССС может составлять от 500 км для спутников на низкой околоземной орбите (Low Earth Orbit, LEO) до 36 000 км на геостационарной орбите (Geostationary Earth Orbit, GEO) [6], что превышает максимальное расстояние в 5G NR, равное 300 км. Это приводит к тому, что время круговой задержки (round-trip time, RTT) – время распространения сигнала от UE до КА и обратно, составляет от 4 мс, для спутников на LEO, до нескольких сотен мс для спутников на GEO [7]. Спутники движутся со скоростью 7200 км/с, что приводит к смещению несущей частоты более чем на 720 кГц на частоте 30 ГГц [8].

В связи с этим 3GPP представила концепцию неназемных сетей (non-terrestrial network, NTN), в которой планируется использовать для передачи данных воздушные или космические аппараты, и исследовала особенности реализации и возможные варианты архитектуры сети [8]. До сих пор наземные и спутниковые системы разрабатывались независимо друг от друга, а их взаимодействие было возможно только через шлюзовые решения, например, спутниковые системы уже поддерживаются в системах 4G, но с ограниченной совместимостью. Однако с 2018 года началась интеграция этих систем, которая должна осуществляться на всех уровнях. В настоящее время ключевые

технологии, представленные в 5G NR, все еще находятся в процессе интеграции. Одной из целей интеграции является возможность использования 5G NR в спутниковых системах.

В данной статье рассмотрены следующие каналы и сигналы нисходящей линии передачи 5G NR: нисходящий физический широкополосный канал (Physical Downlink Shared Channel, PDSCH) – предназначен для передачи пользовательских данных от dNB к UE; нисходящий физический канал управления (Physical Downlink Control Channel, PDCCH) – предназначен для передачи управляющей и служебной информации, включая информацию управления нисходящим каналом (Downlink Control Information, DCI); блок сигнала синхронизации (Synchronization Signal Block, SSB) – включает в себя сигналы первичной синхронизации (Primary Synchronization Signal, PSS), вторичной синхронизации (Secondary Synchronization Signal, SSS) и канал физический широкополосный канал (Physical Broadcast Channel, PBCH); CSI-RS. Сигналы и канала восходящей линии передачи: восходящий физический широкополосный канал (Physical Uplink Shared Channel, PUSCH), восходящий физический канал управления (Physical Uplink Control Channel, PUCCH) и PRACH. Оценка пропускной способности и спектральной эффективности системы необходима для определения возможностей 5G NR в условиях спутникового канала передачи.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для оценки применимости 5G NR необходимо реализовать имитационные модели нисходящего и восходящего каналов связи для спутниковых сетей, используя протокол физического уровня 5G NR. Спутниковая линия связи должна быть реализована с помощью модели QuaDRiGa, в которой учитываются: задержка распространения сигнала, затухание, доплеровское смещение частоты, многолучевое распространение сигнала, модели формирования и обработки описанных выше каналов и сигналов 5G NR.

Оценка производительности радиointерфейса для нисходящей (downlink)

и восходящей (uplink) линий передачи данных должна учитывать различные значения параметров радиointерфейса: ширина полосы канала, несущая частота сигнала, нумерология, мощность передачи, индекс сигнально-кодовой конструкции (индекс QAM модуляции и скорость помехоустойчивого кодирования) и др.

В результате имитационного моделирования должны быть получены характеристики помехоустойчивости сигналов, сформированных по стандарту радиосвязи 5G NR в части физического уровня и используемых в спутниковых сетях широкополосного многопользовательского доступа Ku и Ka диапазонов. Разработанную модель необходимо разделить на 3 функциональные части: модель передачи данных в нисходящем канале, модель передачи данных в восходящем канале и модель спутниковой линии связи. Для всех моделей общая структура выполнения должна соответствовать последовательности выполнения следующих шагов:

1. Ввод входных параметров пользователем.
2. Формирование сигнала и распределение в частотно-временном ресурсе (ЧВР).
3. Расчет параметров спутниковой линии связи согласно траектории движения спутника на орбите в модели QuaDRiGa.
4. Выполнение заданного количества итераций.
 - 4.1. Моделирование прохождения сигнала через канал:
 - 4.1.1. Формирование вектора с шумом.
 - 4.1.2. Свертка передаваемого сигнала с импульсной характеристикой (ИХ) канала.
 - 4.1.3. Доплеровское смещение частоты передаваемого сигнала.
 - 4.1.4. Наложение АБГШ на сигнал в канале передачи.
 - 4.2. Расчет ОСШ на входе приемника.
 - 4.3. Прием и декодирование сигнала. Оценка требуемых параметров.
 - 4.4. Расчет BLER.
 - 4.5. Возвращение к п. 4.

2.1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФИЗИЧЕСКИХ КАНАЛОВ И СИГНАЛОВ

Блок синхронизации SSB. Структурная схема функционального блока модели имитации передачи сигналов синхронизации

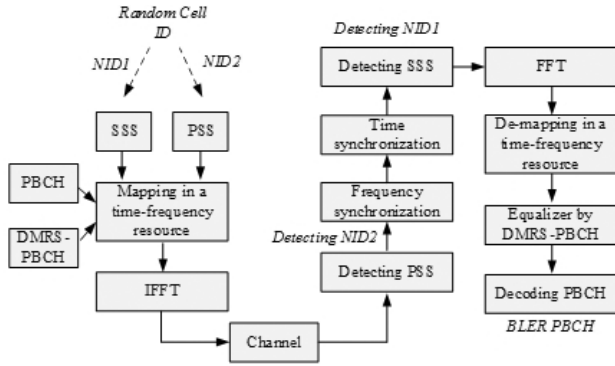


Рис. 1. Структурная схема модели передачи и обработки SBB.

представлена на Рис. 1. Задача модели – оценка вероятности верного декодирования физического идентификатора соты Cell ID, который содержится в сигнале PSS и SSS, а также оценка BLER в канале PBCH. Для формирования и обработки сигналов использованы скрипты из библиотеки MATLAB, внутренние параметры которых предварительно настроены для используемой конфигурации системы. В модели предусмотрена временная и частотная синхронизация по сигналам PSS и SSS вместе с оценкой ошибки синхронизации.

Входные и выходные параметры модели передачи и обработки SBB приведены в Таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Входные параметры модели передачи и обработки SBB

Входные параметры	Описание
F_c	Несущая частота, Гц
H	Высота орбиты, км
G	Коэффициент усиления приемной антенны, дБ
T_{sat}	Индекс точки на траектории спутника
ItN	Количество итераций моделирования
SSC	Расстояние между поднесущими, Гц
T_n	Шумовая температура, К

Таблица 2

Выходные параметры модели передачи и обработки SBB

Выходные параметры	Описание
freqOffset	оценка смещения частоты, Гц
FreqEstimateError	погрешность оценки смещения частоты, Гц
pbchErrorProb	вероятность ошибки декодирования PBCH
CellIDDecodeProb	вероятность верного обнаружения PSS и SSS
SNR	отношение сигнал-шум, дБ

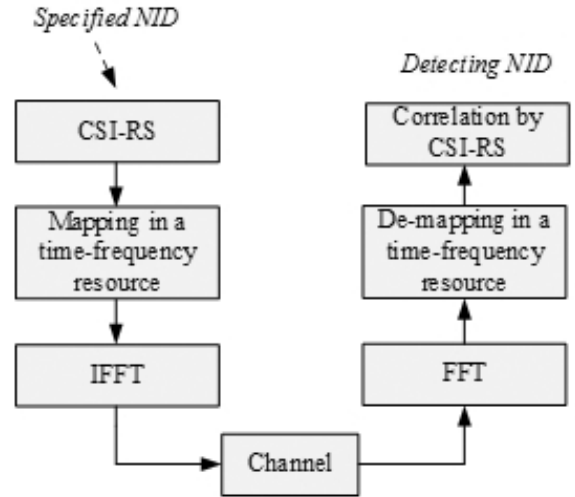


Рис. 2. Структурная схема модели передачи и обработки CSI-RS.

Опорный сигнал CSI-RS. Структурная схема функционального блока модели имитации передачи и обработки опорного сигнала CSI-RS представлена на Рис. 2. Задача модели – оценка вероятности верного детектирования идентификатора NID, который передается в опорном сигнале CSI-RS.

Для формирования и обработки сигналов использованы скрипты из библиотеки MATLAB, внутренние параметры которых предварительно настроены для используемой конфигурации системы.

Входные и выходные параметры модели передачи и обработки CSI-RS приведены в Таблицах 3 и 4.

Таблица 3

Входные параметры модели передачи и обработки CSI-RS

Входные параметры	Описание
F_c	Несущая частота, Гц
H	Высота орбиты, км
G	Коэффициент усиления приемной антенны, дБ
T_{sat}	Индекс точки на траектории спутника
ItN	Количество итераций моделирования
N_{rb}	Количество ресурсных блоков
T_n	Шумовая температура, К

Таблица 4

Выходные параметры модели передачи и обработки CSI-RS

Выходные параметры	Описание
DetectProb	Вероятность верного детектирования параметров CSI-RS
SNR	Отношение сигнал-шум, дБ

Канал управления PDCCH. Физический канал управления нисходящим каналом в 5G NR несет информацию управления нисходящей линией. В канале PDCCH для каждого абонентского устройства передаются DCI сообщения, из которых пользователь узнает информацию, необходимую для декодирования широкополосного канала и маппинга полезной информации в восходящем канале PUSCH. PDCCH обладает двумя ключевыми особенностями при формировании: 1) используется ресурсный диапазон для передачи DCI (набор ресурсов управления CORESET); 2) слепое декодирование PDCCH на стороне абонента.

Абонент должен обнаружить DCI, отслеживая CORESET в назначенное время для мониторинга (Monitoring Occasion). Этот процесс реализуется путем выполнения слепого декодирования (Blind Decoding).

Структурная схема модели передачи и обработки PDCCH представлена на Рис. 3. Входные и выходные параметры модели передачи и обработки PDCCH приведены в Таблицах 5 и 6.

Широкополосный канал PDSCH. Структурная схема модели передачи и обработки PDSCH представлена на Рис. 4.

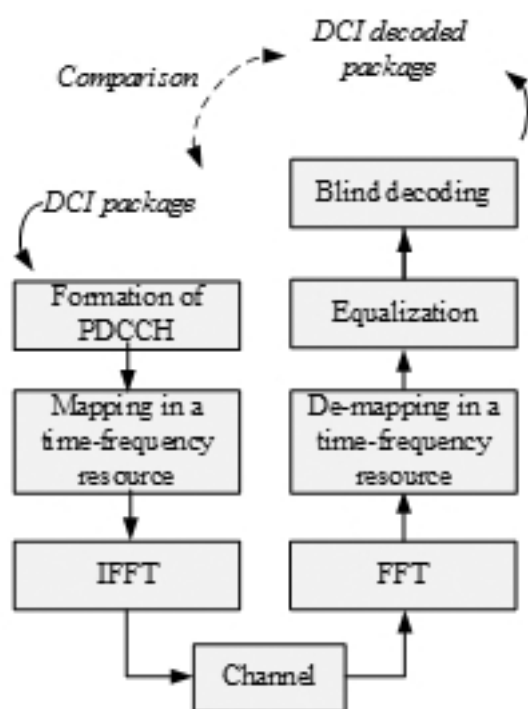


Рис. 3. Структурная схема передачи и обработки PDCCH.

Таблица 5

Входные параметры модели передачи и обработки RDCCN

Входные параметры	Описание
F_c	Несущая частота, Гц
H	Высота орбиты, км
G	Кoeffициент усиления приемной антенны, дБ
T_{sat}	Индекс точки на траектории спутника
ItN	Количество итераций моделирования
N_{rb}	Количество ресурсных блоков
T_n	Шумовая температура, К
CodeRate	Скорость помехоустойчивого кодирования
dModulation	Тип модуляции

Таблица 6

Выходные параметры модели передачи и обработки PDCCH

Выходные параметры	Описание
DetectProbt	Вероятность верного детектирования параметров CSI-RS
SNR	Отношение сигнал-шум, дБ

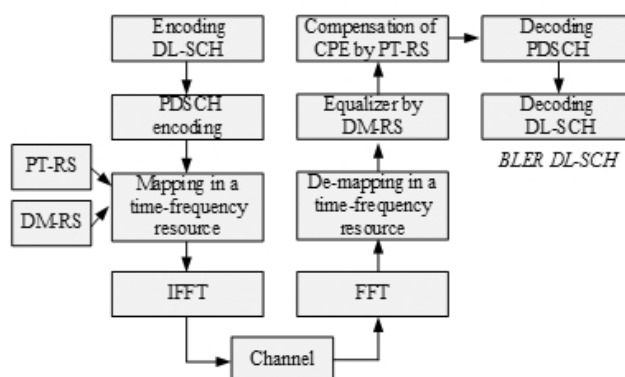


Рис. 4. Структурная схема модели передачи и обработки PDSCH

Данная модель необходима для оценки BLER широкополосного канала PDSCH.

Входные параметры и измеряемые величины модели передачи и обработки PDSCH такие же, как в канале PDCCH и приведены в Таблицах 5 и 6.

Каналы и сигналы в восходящей линии

Канал случайного доступа PRACH. Структурная схема модели передачи и обработки канала случайного доступа PRACH представлена на Рис. 5. При формировании канала PRACH на передающей стороне необходимо выбрать индекс псевдослучайной последовательности (ПСП) из доступного банка ПСП. На приемной стороне задача состоит в обнаружении канала PRACH и определении индекса переданной ПСП с помощью корреляционной обработки.

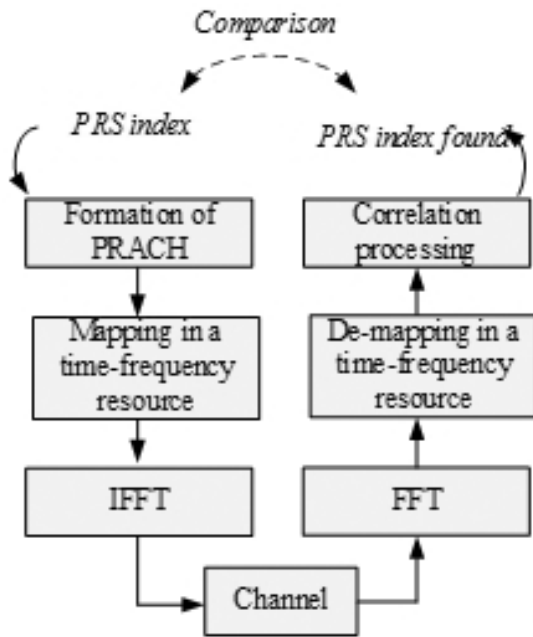


Рис. 5. Структурная схема модели передачи и обработки PRACH.

Входные параметры и измеряемые величины модели передачи и обработки PRACH такие же, как в модели CSI-RS, которые приведены в Таблицах 3 и 4.

Канал управления PUCCH. PUCCH – физический канал восходящей линии связи, который переносит информацию управления пользователя (User Control Information, UCI). Так же как DCI передается в PDCCH, UCI передается в PUCCH. Отличие DCI и UCI заключается в том, что UCI может передаваться не только в PUCCH, но и в PUSCH в зависимости от ситуации, тогда как DCI может передаваться только в PDCCH.

Существует 5 различных форматов PUCCH, представленных в Таблице 7, и их выбор обосновывается количеством битов передаваемой информации и длиной символа.

Первым критерием для выбора формата является количество битов UCI. Как видно из Таблицы 7, есть две группы, которые можно выбрать для этого критерия. Если биты UCI

Таблица 7

Форматы PUCCH

Формат	Длина символов	Количество бит	Описание (ts 38.300-5.3.3)
Формат 0	1~2	≤ 2	Короткий PUCCH
Формат 1	4~14	≤ 2	Длинный PUCCH.DMRS
Формат 2	1~2	> 2	Короткий PUCCH
Формат 3	4~14	> 2	Длинный PUCCH.DMRS
Формат 4	4~14	> 2	Длинный PUCCH.DMRS

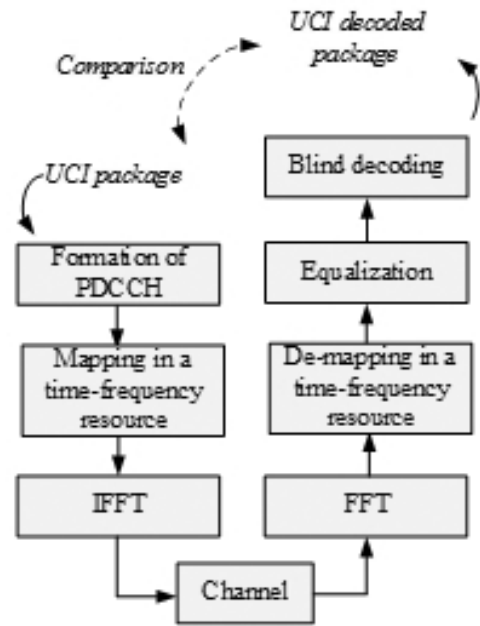


Рис. 6. Структурная схема модели передачи и обработки PUCCH.

равны или меньше 2, можно использовать форматы 0 или 1. Если битов больше 2, можно использовать форматы 2,3,4.

Следующим критерием выбора является возможность мультиплексирования пользователя в тот же PRB. Форматы 0,1,4 допускают мультиплексирование, а форматы 2,3 – не допускают.

Структурная схема модели передачи и обработки канала случайного доступа PUCCH представлена на Рис. 6. Входные параметры и измеряемые величины модели передачи и обработки PUCCH такие же, как в канале PDCCH и приведены в таблицах 5 и 6.

Широковещательный канал PUSCH. На Рис. 7 показана структурная схема модели передачи и обработки канала PUSCH. На выходе модели рассчитывается вероятность блоковой

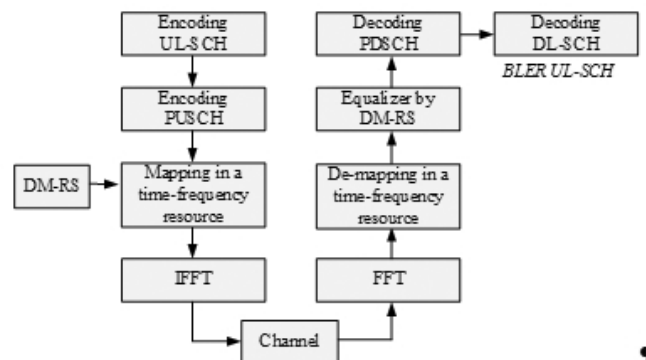


Рис. 7. Структурная схема модели передачи и обработки PUSCH

ошибки данного канала. Входные параметры и измеряемые величины модели передачи и обработки PUSCH такие же, как в канале PDCCH и приведены в Таблицах 5 и 6.

2.2. СПУТНИКОВЫЙ КАНАЛ ПЕРЕДАЧИ

Расчет характеристик канала выполнялся в универсальном генераторе канальных матриц модели QuaDRiGa, в которой реализована поддержка сценариев Земля-КА. QuaDRiGa – это модель, позволяющая моделировать радиоканалы при различных условиях распространения радиосигнала и их конфигурациях. В рамках исследования модель используется для получения канальных матриц, приближенных к реальности и расчета ослабления сигнала в спутниковом канале распространения КА-UE, в случае, когда UE расположен на поверхности Земли. QuaDRiGa основывается на таких моделях, как WINNER и SCM, с расширением функционала, который позволяет моделировать динамические сценарии. Все возможности модели QuaDRiGa описаны в [9].

Подход QuaDRiGa можно рассматривать как статистическую модель пространственного распределения лучей. В отличие от классического подхода модель не использует геометрическое представление окружающей среды, а распределяет положения рассеивающих кластеров случайным образом.

Описание реализуемого сценария. QuaDRiGa реализован в MATLAB с использованием объектно-ориентированного программирования. Пользовательский интерфейс построен на классах, которыми можно управлять. Каждый класс содержит параметры для хранения данных и методы для управления данными.

Для того чтобы задать сценарий использовались следующие классы и методы QuaDRiGa:

- "qd_track" описывает траектории движения передающих и принимающих терминалов, характер изменения скорости и сценарий распространения радиоволн;
- "qd_arrayant" объединяет все функции, необходимые для описания конфигурации антенн;
- "qd_layout" объединяет траектории пользователей и свойства антенн в общий объект;
- "qd_channel" содержит итоговые коэффициенты канала для каждого

Таблица 8

Входные параметры модели расчета ослабления сигнала и канальных матриц

Входные параметры	Описание
az	азимут спутника относительно наземной станции, град
el	угол места спутника относительно наземной станции, град
orbit	высота орбиты спутника над уровнем земли, км
fe	частота сигнала, Гц

описанного сегмента траектории пути. Может формировать матрицу канальных коэффициентов как во временной области, так и в частотной.

Входные параметры модели представлены в Таблице 8.

Каждый расчет ослабления и канальной матрицы для определенного положения спутника на орбите относительно наземного терминала задавался статичным сценарием, при котором положение спутника определялось высотой орбиты, азимутом и углом места относительно наземного терминала, расположенного на определенной широте. Перерасчет координат в декартовую систему осуществлялся посредством метода `set_satellite_pos`. Ориентация антенны в пространстве и её направление устанавливалась параметрами, заданными в объекте `track.orientation`. При выполнении расчёта данные параметры задавались таким образом, чтобы и приемная и передающая антенна всегда были направлены друг на друга во всех дискретных точках положения спутника. Посредством класса `qd_arrayant` задавались типы и параметры антенн на приёмной и передающей сторонах. Для спутника была задана параболическая антенна радиусом 3 метра с левой круговой поляризацией (Left-Handed Circular Polarization, LHCP). Для приёмного наземного терминала была задана патч антенна с вертикальной поляризацией и углом раскрытия 90° по азимуту и углу места.

Сценарий распространения радиоволн был выбран `QuaDRiGa_NTN_Urban_LOS`, который соответствует случаю при расположении наземного терминала в городской среде и наличии прямой видимости между спутником и терминалом. Полное описание сценариев для спутников приведены в 3GPP TR 38.811.

Таблица 9

Выходные параметры модели расчета ослабления сигнала и канальных матриц

Выходные параметры	Описание
attenuation	ослабление сигнала, дБ
h_channel	отсчеты ИХ спутникового канала передачи
beam_delay	задержки лучей, с

Расчет канальных матриц и ослаблений выполнялся в классе `qd_channel`, исходя из заданных позиций спутника, наземного терминала и частоты сигнала. Остальные параметры были взяты по умолчанию. Выходные параметры модели представлены в **Таблице 9**.

После создания сценария и добавления в него спутника и наземной станции выполняются следующие расчеты:

- 1) Определяется наличие спутника в видимости наземной станции, все последующие расчеты выполняются только при выполнении этого условия.
- 2) Рассчитываются азимут, угол места и расстояние спутника относительно наземной станции.
- 3) Используя значение расстояния от наземной станции до спутника, рассчитывается задержка.
- 4) Рассчитать ускорение спутника относительно местной системы координат: север, восток, вниз (North, East, Down, NED).
- 5) По значению угла азимута и места рассчитывается направление расположения наземной станции относительно спутника.
- 6) Используя направление и ускорение спутника относительно NED, рассчитывается его ускорение по линии связи между спутником и наземной станцией.
- 7) Используя ускорение относительно наземной станции, рассчитывается сдвиг частоты из-за эффекта Доплера.
- 8) С помощью разработанной имитационной модели проведено модельное исследование и оценка основных характеристик системы.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Это исследование предполагает успешную синхронизацию между UE и спутником. Поэтому здесь мы приводим результаты исследования вероятности корректного приема описанных каналов и сигналов в условиях спутникового канала. Также представлены результаты расчета производительности системы в заданных условиях.

Таблица 10

Основные параметры моделируемой системы

Параметр	Нисходящий канал	Восходящий канал
f_0 , ГГц	12,6 / 20,1	14,45 / 29,95
Дуплекс	FDD	FDD
B , МГц	50, 100, 200	50, 100
Δf	120, 240 (for SSB)	120
H , км	500, 1000	500, 1000
Параметр	600	800
T_n , К	-51 (500 km) -45 (1000 km)	-48
P_f	29	26

3.1. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМЫ

С помощью разработанной имитационной модели произведено модельное исследование и оценка основных характеристик системы. В **Таблице 10** приведены основные параметры системы, где f_0 – несущая частота, B – полоса сигнала, Δf – расстояние между поднесущими, H – высота орбиты, T_n – шумовая температура, P_f – эффективная изотропно-излучаемая мощность (ЭИИМ).

Оценка вероятности верного декодирования PRACH. В **Таблице 11** представлены параметры конфигурации системы.

Таблица 11

Конфигурация системы для декодирования PRACH

Параметр	Значение
H , км	500
f_0 , ГГц	14.45
B , МГц	100
Δf , кГц	120
ltN	50
P_f , дБ ВТ/Гц	-58...-78

На **Рис. 8** приведена зависимость вероятности верного декодирования параметров сигнала PRACH в зависимости от

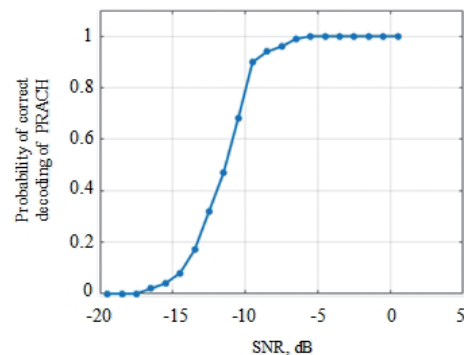


Рис. 8. Зависимость вероятности верного декодирования PRACH от ОСИИ.

Таблица 12

Численные значения вероятности верного декодирования PRACH

P	0	0	0	0.02	0.04	0.08	0.17	0.32	0.47
W , dB	-19.49	-18.49	-17.49	-16.49	-15.49	-14.49	-13.49	-12.49	-11.49
P	0.68	0.90	0.94	0.96	0.99	1	1	1	1
W , dB	-10.49	-9.49	-8.49	-7.49	-6.49	-5.49	-4.49	-3.49	-2.49
P	1	1	1	-	-	-	-	-	-
W , dB	-1.49	-0.49	-0.59	-	-	-	-	-	-

ОСШ в спутниковой линии связи. Предполагается, что абонентская станция устраняет смещение частоты и осуществляет частотную синхронизацию. Для достоверности результатов при передаче как PRACH, так и остальных каналов, ошибка частотной синхронизации внесена преднамеренно, а дисперсия ошибки зависит от ОСШ. Численные значения вероятности верного декодирования параметров сигнала PRACH в зависимости от ОСШ приведены в Таблице 12. На рис. 9 показано расположение PRACH в частотно-временном ресурсе. Уверенный прием и декодирование PRACH обеспечивается при SNR выше -5 дБ. Пропускная способность системы не влияет на результат обработки PRACH.

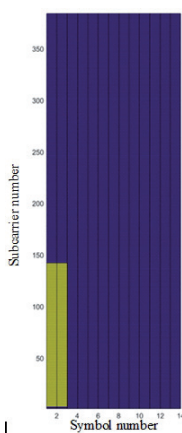


Рис. 9. Расположение PRACH в частотно-временном ресурсе подкадра.

Оценка вероятности верного декодирования CSI-RS. В Таблице 13 представлены параметры конфигурации системы.

Таблица 13

Конфигурация системы для декодирования CSI-RS

Параметр	Значение
H , км	1000
f_0 , ГГц	12.6
B , МГц	50
Δf , кГц	120
l_{tN}	100
P_r , дБ Вт/Гц	-51...-76

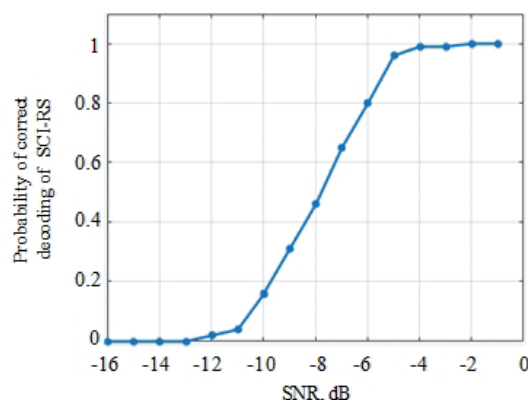


Рис. 10. Зависимость вероятности корректной синхронизации от ОСШ.

На Рис. 10 приведена зависимость вероятности верного декодирования параметров сигнала CSI-RS в зависимости от ОСШ в спутниковой линии связи. При моделировании через спутниковую линию связи передавался один под-кадр, содержащий сигнал CSI-RS. Расположение CSI-RS в частотно-временном ресурсе приведено на Рис. 11.

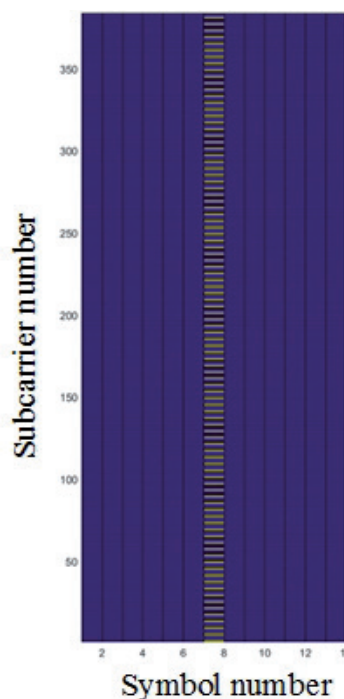


Рис. 11. Расположение CSI-RS в частотно-временном ресурсе подкадра.

Таблица 14

Численные значения вероятности верного декодирования CSI-RS

P	0	0	0	0.02	0.04	0.08	0.16	0.31	0.46
W , dB	-15.97	-14.97	-13.97	-12.97	-11.97	-10.97	-9.97	-8.97	-7.97
P	0.65	0.80	0.96	0.99	1	1	1	-	-
W , dB	-6.97	-5.97	-4.97	-3.97	-2.97	-1.97	-0.97	-	--

Table 15

Конфигурация системы для каналов PDCCH и PUCCH

Параметр	Значение	
	PDCCH	PUCCH
H , km	1000	500
f_0 , GHz	12.6	14.45
B , MHz	50	50
Δf , kHz	120	120
l/N	100	300
P_p , dBW/H	-51...-75	-43...-63

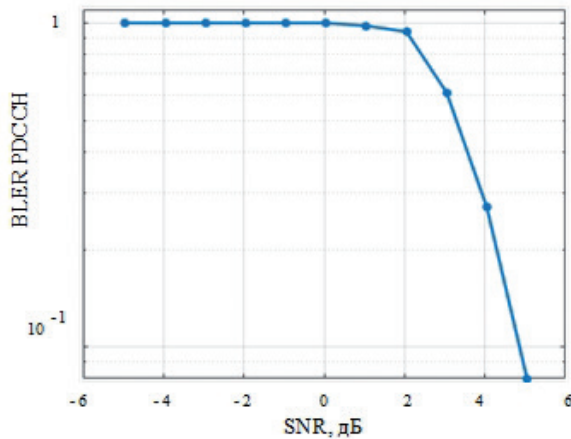


Рис. 12. Зависимость BLER от ОСШ в канале PDCCH.

Численные значения вероятности верного декодирования параметров сигнала CSI-RS в зависимости от ОСШ приведены в Таблице 14. Видно, что при ОСШ выше -4 дБ обеспечивается уверенная обработка сигнала.

Оценка вероятности блоковых ошибок в PDCCH и PUCCH. В Таблице 15 представлены параметры конфигурации системы. На Рис. 12 приведена зависимость BLER канала PDCCH в зависимости от ОСШ в спутниковой линии связи.

Численные значения вероятности верного декодирования параметров сигнала PDCCH в зависимости от ОСШ приведены в Таблице 16.

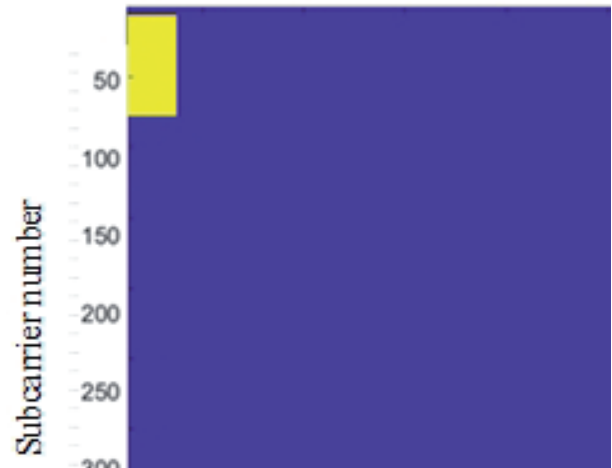


Рис. 13. Расположение данных PDCCH.

При моделировании через спутниковую линию связи передавался один подкадр, содержащий канал PDCCH. Расположение PDCCH в частотно-временном ресурсе приведено на Рис. 13.

На Рис. 14 приведена зависимость BLER канала PUCCH в зависимости от ОСШ в спутниковой линии связи. Численные значения вероятности верного декодирования параметров сигнала PUCCH в зависимости от ОСШ приведены в Таблице 17.

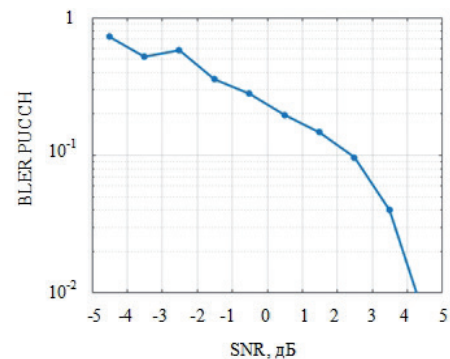


Рис. 14. Зависимость BLER от ОСШ в канале PUCCH.

Таблица 16

Численные значения BLER PDCCH

$BLER$	1	1	1	1	1	1	0.98	0.94	0.61
W , dB	-4.95	-3.95	-2.95	-1.95	-0.95	0.05	1.05	2.05	3.05
$BLER$	0.27	0.08	0	0	0	0	0	-	-
W , dB	4.05	5.05	6.05	7.05	8.05	9.05	10.05	-	--

Table 17

Численные значения BLER PDCCH

BLER	0.72	0.52	0.58	0.35	0.28	0.19	0.14	0.09	0.04
W, dB	-4.51	-3.51	-2.51	-1.51	-0.51	0.48	1.48	2.48	3.48
BLER	0	0.08	0	0	0	0	0	-	-
W, dB	4.48	5.48	6.48	7.48	8.48	9.48	10.05	-	--

При моделировании через спутниковую линию связи передавался один подкадр, содержащий канал PUSCH. Расположение PUSCH в частотно-временном ресурсе приведено на Рис. 15.

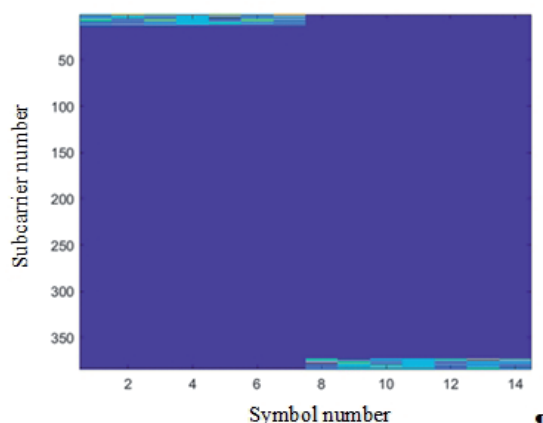


Рис. 15. Расположение данных PUSCH в частотно-временном ресурсе подкадра.

Оценка вероятности блоковых ошибок в PDSCH и PUSCH. В Таблице 18 представлены параметры конфигурации системы.

Таблица 18

Конфигурация системы для каналов PDSCH и PUSCH

Параметр	Значение	
	PDCCH	PUSCH
H, km	500	500
f ₀ , GHz	12.6	14.45
B, MHz	50	50
Δf, kHz	120	120
ltN	100	300
P _f , dBW/H	-51...-59	-48...-56

На Рис. 16 приведена зависимость BLER канала PDSCH в зависимости от ОСИ в спутниковой линии связи. Численные значения вероятности верного декодирования параметров сигнала PDSCH в зависимости от ОСИ приведены в Таблице 19.

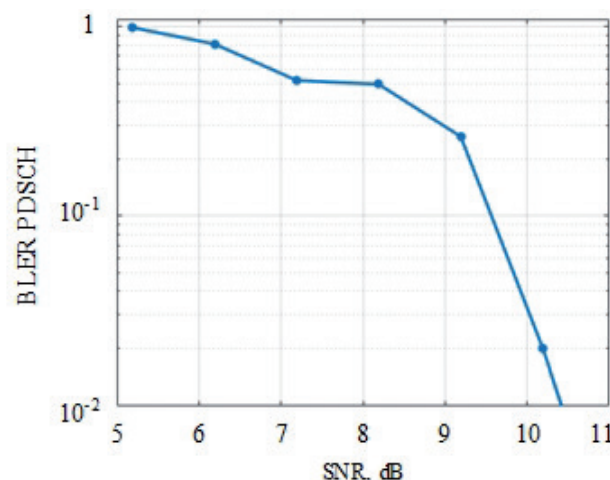


Рис. 16. Зависимость BLER от ОСИ в канале PDSCH.

При моделировании через спутниковую линию связи передавался один слот, содержащий канал PDSCH. Размер транспортного блока 9480 бит. Сигнально-кодовая конструкция QAM-16 и код с малой плотностью проверок на четность (Low-density parity-check code, LDPC-code) – 490/1024. Расположение PDSCH в частотно-временном ресурсе приведено на Рис. 17.

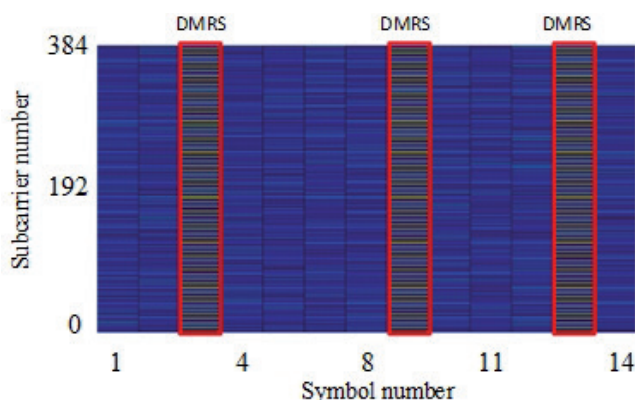


Рис. 17. Расположение данных PDSCH в частотно-временном ресурсе подкадра.

Таблица 19

Численные значения BLER PDSCH

BLER	0.99	0.81	0.52	0.49	0.26	0.02	0.001	0	0
W, dB	5.19	6.19	7.19	8.19	9.19	10.19	11.19	12.19	13.19

Таблица 20

Численные значения BLER PUSCH

BLER	1	1	1	1	1	1	0.65	0.018	0
W, dB	2.20	3.20	4.20	5.20	6.20	7.20	8.20	9.20	10.20

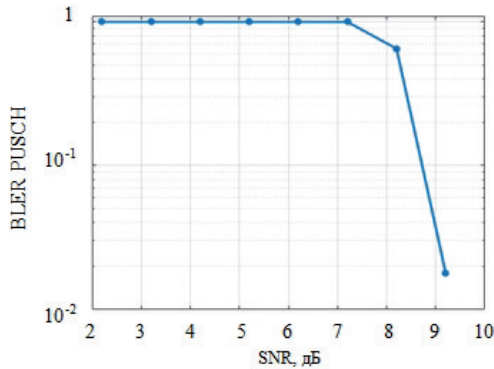


Рис. 18. Зависимость BLER от ОСШ в канале PUSCH.

На Рис. 18 приведена зависимость BLER канала PUSCH в зависимости от ОСШ в спутниковой линии связи. Численные значения вероятности верного декодирования параметров сигнала PDSCH в зависимости от ОСШ приведены в Таблице 20.

При моделировании через спутниковую линию связи передавался один слот, содержащий канал PUSCH. Размер транспортного блока 8712 бит. Сигнально-кодовая конструкция QAM-16 и 490/1024 LDPC. Расположение PUSCH в частотно-временном ресурсе приведено на Рис. 19.

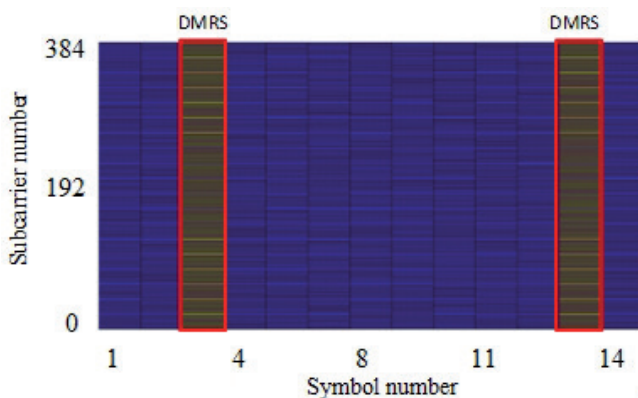


Рис. 19. Расположение данных PUSCH в частотно-временном ресурсе подкадра.

Оценка вероятности блоковых ошибок в PUSCH. В Таблице 21 представлены параметры конфигурации системы.

На Рис. 20 приведена зависимость BLER в канале PUSCH от ОСШ в спутниковой линии связи в условиях Доплеровского смещения частоты в 60.22 кГц.

Частотно-временное расположение PUSCH внутри SSB представлено на Рис. 21. Численные значения BLER для канала PUSCH приведены в Таблице 22.

Таблица 21

Конфигурация системы для канала PUSCH

Parameter	Value
H, km	1000
f_0 , GHz	12.6
B, MHz	50
Δf , kHz	120
l/N	100
P_p , dBW/H	-46...-76

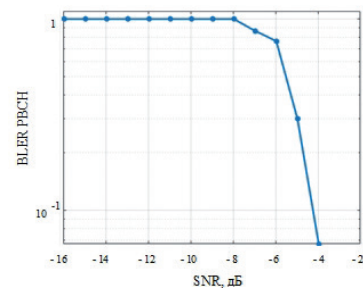


Рис. 20. Зависимость BLER от ОСШ в канале PUSCH.

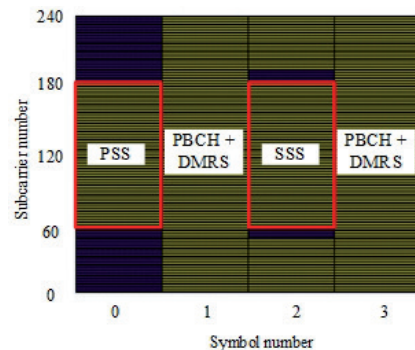


Рис. 21. Частотно-временное расположение PUSCH внутри SSB.

При моделировании PUSCH через спутниковую линию связи передавался блок синхронизации (SSB), содержащий канал PUSCH. Размер транспортного блока 32 бита.

3.2 ОЦЕНКА СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

Скорость передачи данных в соответствии с стандартом может быть рассчитана с помощью формулы:

$$C = 10^{-6} \sum_{j=1}^J \left[n_{beams}^{(j)} v_{layers}^{(j)} Q_m^{(j)} f^{(j)} R \frac{12N_{RB}^{(j),\mu}}{T_s^\mu} (1 - OH^{(j)}) \right], \quad (1)$$

где J – количество агрегированных поднесущих; R – скорость помехоустойчивого кодирования; $n_{beams}^{(j)}$ – количество пространственных лучей; $v_{layers}^{(j)}$ – количество мультиплексируемых слоев MIMO; $Q_m^{(j)}$ – количество бит в одном символе QAM модуляции; $f^{(j)}$ – масштабирующий фактор;

Таблица 22

Численные значения BLER от ОСШ в канале РВСН

BLER	1	1	1	1	1	1	1	1	1
W, dB	-15.96	-14.96	-13.96	-12.96	-11.96	-10.96	-9.96	-8.96	-7.96
BLER	0.866	0.766	0.300	0.0667	0	0	0	0	0
W, dB	-6.96	-5.96	-4.96	-3.96	-2.96	-1.96	-0.96	0.03	1.03
BLER	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W, dB	2.03	3.03	4.03	5.03	6.03	7.03	8.03	9.03	10.03
BLER	0	0	0	0	-	-	-	-	-
W, dB	11.03	12.03	13.03	14.03	-	-	-	-	-

μ – нумерология, определяющая частотный разнос поднесущих $\Delta f = 2^\mu \cdot 15$ кГц; T_s^μ – длительность OFDM символа, которая может быть получена по формуле $T_s^\mu = 10^{-3} / (14 \cdot 2^\mu)$; $N_{RB}^{(j),\mu}$ – количество ресурсных блоков в полосе пропускания; $OH^{(j)}$ – накладные расходы передачи служебной информации.

В рамках рассматриваемой системы следует принять следующие параметры: $J = 1$, $v_{layers}^{(j)} = 1$, $f^{(j)} = 1$, $n_{beams}^{(j)} = 1$, $\mu = 3$, $OH^{(j)} = 0.18$ (для нисходящего канала) и $OH^{(j)} = 0.1$ (для восходящего канала), $T_s^\mu = 8.9286 \cdot 10^{-6}$.

Учитывая принятые значения параметров, формула (1) для нисходящего канала примет следующий вид:

$$C = 0.82 \cdot 10^{-6} QR \frac{12N_{RB}}{8.9286 \cdot 10^{-6}} \quad (2)$$

и для восходящего канала:

$$C = 0.9 \cdot 10^{-6} QR \frac{12N_{RB}}{8.9286 \cdot 10^{-6}} \quad (3)$$

Тогда, чтобы рассчитать скорость передачи данных необходимо использовать формулы (2, 3), зная параметры Q , R , N_{RB} . В свою очередь, параметры Q , R определяются выбранной для передачи сигнально-кодовой конструкцией (СКК), описанных в таблицах 5.1.3.1-1 – 5.1.3.1-3 [10].

Пропуская способность показывает предельную скорость передачи данных, которая может быть достигнута в канале передачи. Пропускная способность для N_{RB} ресурсных блоков может быть рассчитана по формулам (2, 3), принимая максимальные значения $Q = 8$ (для QAM-256) и $R = 948/1024$, соответственно:

$$C = 6.0731 \cdot 10^{-6} QR \frac{12N_{RB}}{8.9286 \cdot 10^{-6}}, \quad (4)$$

для нисходящего канала и

$$C = 6.6656 \cdot 10^{-6} QR \frac{12N_{RB}}{8.9286 \cdot 10^{-6}}, \quad (5)$$

для восходящего канала.

Расчетная пропускная способность приведена в **Таблице 23**.

Спектральная эффективность системы напрямую определяется спектральной

Таблица 23

Расчетная пропускная способность

Нисходящий канал			
Полоса, МГц	50	100	200
C, мбит/с	260.11	520.23	1040.47
Восходящий канал			
Полоса, МГц	50	100	-
C, мбит/с	280.66	570.33	-

эффективностью используемой сигнально-кодовой конструкцией, которая выбрана для передачи данных. В современных системах используется принцип адаптивного выбора СКК, позволяющий приспособиться к условиям канала распространения и выбирать СКК с наибольшей спектральной эффективностью, сохраняя при этом требуемый уровень вероятности битовых ошибок при приеме. Как правило, для каждой конкретной системы связи набор доступных СКК формируется исходя из предполагаемых эксплуатационных сценариев и рабочего диапазона ОСШ. Все доступные СКК описаны в стандарте конкретной системы связи, а каждая из них определена типом модуляции, скоростью и методом помехоустойчивого кодирования.

В 5G NR предусмотрено 28 различных СКК, которые приведены в технической спецификации. Всего предусмотрено несколько таблиц СКК, а тип таблицы определяется конфигурацией системы.

В качестве примера можно рассмотреть первую таблицу 5.1.3.1-1 [10]. На **Рис. 22** представлена зависимость спектральной эффективности от ОСШ при адаптивном выборе СКК.

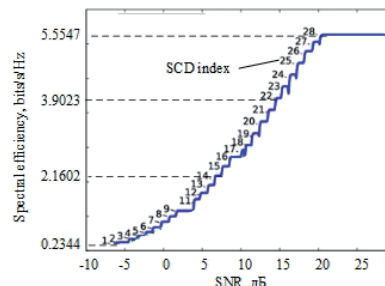


Рис. 22. Зависимость спектральной эффективности от ОСШ.

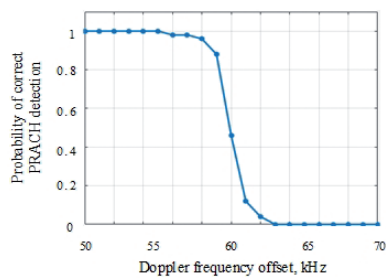


Рис. 23. Зависимость вероятности верного детектирования канала PRACH от доплеровского смещения частоты.

Спектральная эффективность может быть получена по значению пропускной способности из Таблицы 23. Спектральная эффективность в нисходящем канале достигает 5.2 бит/с/Гц и в восходящем канале 5.61 бит/с/Гц.

3.3 EFFECT OF DOPPLER FREQUENCY OFFSET ON SIGNAL PROCESSING

На **Рис. 23** показана зависимость вероятности верного детектирования канала PRACH от доплеровского смещения частоты в восходящей линии связи при отношении сигнал-шум 6.65 дБ. При смещении частоты, превышающем половину частотного разнеса поднесущих (60 кГц), невозможно осуществить корректный прием PRACH.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

5G NR в части физического уровня может быть использован в спутниковых сетях широкополосного многопользовательского доступа Ku и Ka диапазонов. Для этого необходимо обеспечить отношение сигнал/шум на входе демодулятора приемного устройства не менее минус 5 дБ при опорном уровне BLER > 10%. Максимальная производительность системы достигается при ОСИШ более 20 дБ.

5G NR не применим к ССС с доплеровским смещением несущей частоты более 60 кГц.

В модели не рассмотрен эффект доплеровского рассеяния, который может существенно повлиять на нарушение ортогональности поднесущих и ухудшить прием сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cassiau N, Maret L, Dore J-B, Savin V, Ktenas D. Assessment of 5G NR physical layer for future satellite networks. *IEEE Global Conference on Signal and Information Processing. IEEE Xplore*, 2018, pp. 1020-1024; doi: 10.1109/GlobalSIP.2018.8646358.
2. Völk F, Schwarz RT, Knopp A. Field Trial on 5G New Radio Over Satellite. *Frontiers in Communications and Networks*, 2021, 2:1-10; doi: 10.3389/frcmn.2021.673534.
3. Saarnisaari H, de Lima C. Application of 5G new radio for satellite links with low peak-to-average power ratios. *International Journal of Satellite*

Communications and Networking, 2021, 39:445-454; doi: 10.1002/sat.1378.

4. Dahlman E, Parkvall S, Skold J. *5G NR: The next generation wireless access technology*. Academic Press, 2020.
5. Saarnisaari H, de Lima CM. Integrating 5G NR and satellites systems: Main features needed changes and performance results. *IJSCN Special Issue "Satellite Networks Integration with 5G"*, 2020.
6. Saarnisaari H, de Lima CM. 5G NR over satellite links: Evaluation of synchronization and random access processes. *Proc. 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2019, pp. 1-4.
7. Saarnisaari H, de Lima CM. 5G new radio in SatCom: an overview of physical and medium access layer issues. *Proc. 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2020, pp. 1-4.
8. 3GPP, "Study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces", *3GPP, Tech. Rep. 38.801 (Version 14)*, March 2017.
9. QuaDRiGa: The Next Generation Radio Channel Model. Retrieved from <https://quadriga-channel-model.de/>.
10. ETSI TS 38.214 V15.3.0. 5G; NR; Physical layer procedures for data (3GPP TS 38.214 version 15.3.0 Release 15), 2018.

Рогожников Евгений Васильевич

к.т.н., доцент

Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники
40, просп. Ленина, Томск 634050, Россия
E-mail: evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru

Дмитриев Эдгар Михайлович

ассистент

Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники
40, просп. Ленина, Томск 634050, Россия
E-mail: edegor1993@mail.ru

Кондрашов Данила Александрович

аспирант

Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники
40, просп. Ленина, Томск 634050, Россия
E-mail: danila.a.kondrashov@tusur.ru

Крюков Яков Владимирович

к.т.н., доцент

Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники
40, просп. Ленина, Томск 634050, Россия
E-mail: iakov.v.kriukov@tusur.ru

Коновальчиков Артем Владимирович

аспирант

Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники
40, просп. Ленина, Томск 634050, Россия
E-mail: artem.konovalchikov@tusur.ru

Мухамадиев Семен Минисович

магистрант

Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники
40, просп. Ленина, Томск 634050, Россия
E-mail: sema.fandmc3@mail.ru