

УДК 621.39

doi:10.31799/1684-8853-2019-5-51-63

Оценка эффективности механизма резервирования полосы пропускания для технологии mmWave в сетях связи пятого поколения

В. О. Бегишев^а, канд. физ.-мат. наук, ассистент, orcid.org/0000-0002-7232-4157, begishev-vo@rudn.ru

Э. С. Сопин^{а, б}, канд. физ.-мат. наук, доцент, orcid.org/0000-0001-9082-2152

Д. А. Молчанов^{а, в}, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0003-4007-7187

А. К. Самуйлов^{а, в}, канд. физ.-мат. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-2087-769X

Ю. В. Гайдамака^{а, б}, доктор физ.-мат. наук, профессор, orcid.org/0000-0003-2655-4805

К. Е. Самуйлов^{а, б}, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0002-6368-9680

^аРоссийский университет дружбы народов, Миклухо-Маклая ул., 6, Москва, 117198, РФ

^бИнститут проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН, Вавилова ул., 44-2, Москва, 119333, РФ

^вТехнологический университет г. Тампере, Коркеакоулункату, 10, Тампере, 33100, Финляндия

Введение: в системах 3GPP NR частые блокировки прямой видимости между приемо-передающими устройствами могут привести к сбросу уже принятых в систему сессий, обслуживание которых не завершено, что снижает качество предоставления услуг пользователям сети связи. Одним из способов повысить непрерывность сессий является механизм резервирования ресурса базовой станции для принятых в систему сессий. **Цель:** разработка математической модели для анализа влияния механизма резервирования радиодиапазона на основные показатели качества обслуживания в сети 5G с учетом ключевых особенностей технологии 3GPP NR, включая высоту взаимодействующих объектов, геометрию и мобильность блокеров, миллиметровый диапазон передачи, модуляционно-кодированные схемы, антенные решетки, а также прямую видимость между приемо-передающими устройствами. **Результаты:** построена математическая модель в виде ресурсной системы массового обслуживания с сигналами, где радиодиапазон базовой станции соответствует ресурсу, а сигналы моделируют изменение условий прямой видимости между приемо-передающими устройствами. Создание приоритета для сессий, чье обслуживание еще не завершено, обеспечивает значительную гибкость для балансировки непрерывности сессии и отказа в установлении новой сессии за счет небольшого снижения эффективности использования радиоресурса. С использованием разработанной модели показано, что управление доступом к ресурсу посредством резервирования даже небольшой полосы пропускания (менее 10 % от общего объема ресурсов) для поддержания сессий, уже принятых на обслуживание, положительно влияет на непрерывность сессий, поскольку заметно увеличивает вероятность их успешного завершения. **Практическая значимость:** предложенный механизм эффективнее работает в условиях перегрузки и с сессиями, имеющими высокие требования к скорости передачи данных, что повышает его востребованность для систем связи 5G NR.

Ключевые слова – миллиметровый диапазон, беспроводные сети пятого поколения, резервирование полосы пропускания, вероятность потери поступающей сессии, вероятность принятой на обслуживание сессии, коэффициент использования ресурса.

Для цитирования: Бегишев В. О., Сопин Э. С., Молчанов Д. А., Самуйлов А. К., Гайдамака Ю. В., Самуйлов К. Е. Оценка эффективности механизма резервирования полосы пропускания для технологии mmWave в сетях связи пятого поколения. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 5, с. 51–63. doi:10.31799/1684-8853-2019-5-51-63

For citation: Begishev V. O., Sopin E. S., Molchanov D. A., Samouylov A. K., Gaidamaka Yu. V., Samouylov K. E. Performance evaluation of bandwidth reservation for mmWave in 5G NR systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 5, pp. 51–63 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-5-51-63

Введение

Ожидается, что семейство технологий, объединенных под общим названием «новое радио 5G» (5G New Radio, 5G NR), станет стандартным решением для мобильных систем 5G, обеспечивая высокую пропускную способность и малые задержки на беспроводном интерфейсе [1]. Предварительные требования к технологиям 5G NR были выдвинуты некоммерческим консорциумом 3rd Generation Partnership Project (3GPP), разрабатывающим спецификации для мобильной телефонии, и появились в Release 15 [2], приня-

том в декабре 2017 г., а в декабре 2019 г. ожидается утверждение окончательной версии стандарта 5G NR. Одной из основных отличительных особенностей радиотехнологии 5G NR является добавление новых диапазонов радиоспектра в пределах от 2,5 до 40 ГГц, в будущем — до 100 ГГц, включающих миллиметровый диапазон длин волн. В то время как процесс стандартизации 5G NR почти завершен и производители оборудования уже проводят тестовые испытания [3], фокус научных исследований смещается в сторону улучшения показателей эффективности новой сети доступа, при этом исследуются как особенно-

сти сетевого трафика [4], так и новые технологии, реализованные в современных сетях [5].

Высокая направленность антенн миллиметрового диапазона позволяет передавать сигнал на значительные расстояния, однако сужение лучей антенны приводит к возможности блокировки распространения радиоволн миллиметрового диапазона малыми объектами, такими как человеческие тела, деревья, столбы освещения. Блокировка распространения радиоволн возникает при появлении препятствия, или блокара, на линии прямой видимости (Line-of-Sight — LoS) между приемно-передающими устройствами, например точкой доступа и оборудованием пользователя. Следствием этого являются резкие кратковременные скачки уровня принимаемого сигнала, которые не удается компенсировать с помощью современных методов обработки сигналов. В последнее время было предпринято несколько попыток исследовать этот процесс для различных сценариев движения объектов, например, модель блокировки прямой видимости со стационарными блокерами и подвижными пользователями была разработана авторами работы [6], а симметричный сценарий с мобильными блокерами и статичными пользователями проанализирован в работе [7]. В зависимости от расстояния между приемно-передающими устройствами на случай блокировки прямой видимости в системах NR предусмотрены два принципиально разных механизма для поддержания уже установленной сессии: механизм множественного подключения [8–11] пользовательского оборудования (ПО), находящегося в отдалении от точки доступа, например от базовой станции (БС), и механизм резервирования ресурсов [12] для ПО вблизи БС.

При блокировке прямой видимости для пользователя, находящегося на значительном расстоянии от обслуживающей его БС, суммарная мощность отраженных сигналов, принимаемых ПО от БС, оказывается ниже порогового значения отношения сигнал/шум (ОСП), что приводит к невозможности поддержания установленной через эту БС сессии. Обеспечить непрерывность сессии в этой ситуации позволяет предложенный консорциумом 3GPP механизм множественного подключения [10], согласно которому ПО разрешается использовать пространственное разнесение передачи путем установления одновременных соединений с несколькими БС, находящимися в непосредственной близости. В течение сессии в случае блокировки текущего активного соединения ПО перенаправляет свой трафик на другую незаблокированную в данный момент БС [12].

Для пользователя, находящегося вблизи обслуживающей его БС, при блокировке прямой видимости мощность принимаемого сигнала остается выше порогового значения, однако ее может

быть недостаточно для поддержания определенной для данной сессии скорости передачи данных. В этом случае потерянную из-за блокировки прямой видимости мощность можно компенсировать выделением дополнительных радиоресурсов. В статье [12] авторы предложили механизм резервирования ресурсов системы, согласно которому часть радиоресурсов недоступна для новых сессий пользователя; она зарезервирована для обеспечения непрерывности сессий, уже принятых на обслуживание. Благодаря резервированию установленная через БС сессия для ПО при блокировке прямой видимости (non-Line-of-Sight — nLoS) не будет прервана, а продолжит обслуживание через ту же БС. Основным преимуществом предложенного механизма резервирования является то, что он может быть использован на отдельно стоящих NR БС и не требует развертывания плотных сетей, что делает это решение подходящим для ранних этапов проникновения технологии NR на рынок. Кроме того, такой механизм не требует одновременной поддержки соединения несколькими БС, что снижает энергопотребление узлов сети.

В настоящей работе построена и проанализирована математическая модель системы, характеризующая производительность NR БС в условиях резервирования части ресурсов для случая стационарных приемно-передающих устройств и подвижных блокеров. В отличие от [12], модель учитывает зависящие от расстояния между БС и ПО модуляционно-кодовые схемы, применяемые в стандарте NR БС, а также возможность многократной блокировки прямой видимости между БС и ПО в течение одной сессии. Также приняты во внимание характерные особенности распространения волн миллиметрового диапазона частот, модель перемещения блокеров и учтены детали процесса обслуживания NR на основе резервирования ресурсов.

Системная модель и принятые допущения

Объектом исследования является фрагмент сети 5G, состоящий из точки доступа — БС, работающей в стандарте 3GPP 5G NR, и оборудования пользователей, находящихся в зоне покрытия БС. Пользователь отправляет на БС запрос на получение услуги связи, при предоставлении которой должна быть установлена и в течение всего времени получения услуги поддерживаться сессия между БС и ПО. Объем ресурса, который выделяется на БС для обслуживания сессии, зависит от местоположения ПО и условий прямой видимости между БС и ПО и может меняться во времени при изменении этих факторов. Предметом исследования является влияние механизма резервирования, предложенного в статье, на харак-

теристики, ориентированные на пользователя, а именно вероятность потери запроса на установление сессии и вероятность преждевременного завершения принятой на обслуживание сессии, а также на коэффициент использования ресурса БС, который относится к системо-ориентированным характеристикам.

Мы начнем с описания моделирования расположения и формы узлов сети, затем перейдем к моделированию распространения сигнала и его блокировки в отсутствие прямой видимости, опишем принципы выделения ресурса для обслуживания сессии с учетом предложенного [12] механизма резервирования ресурсов. Завершим раздел введением интересующих нас характеристик производительности системы.

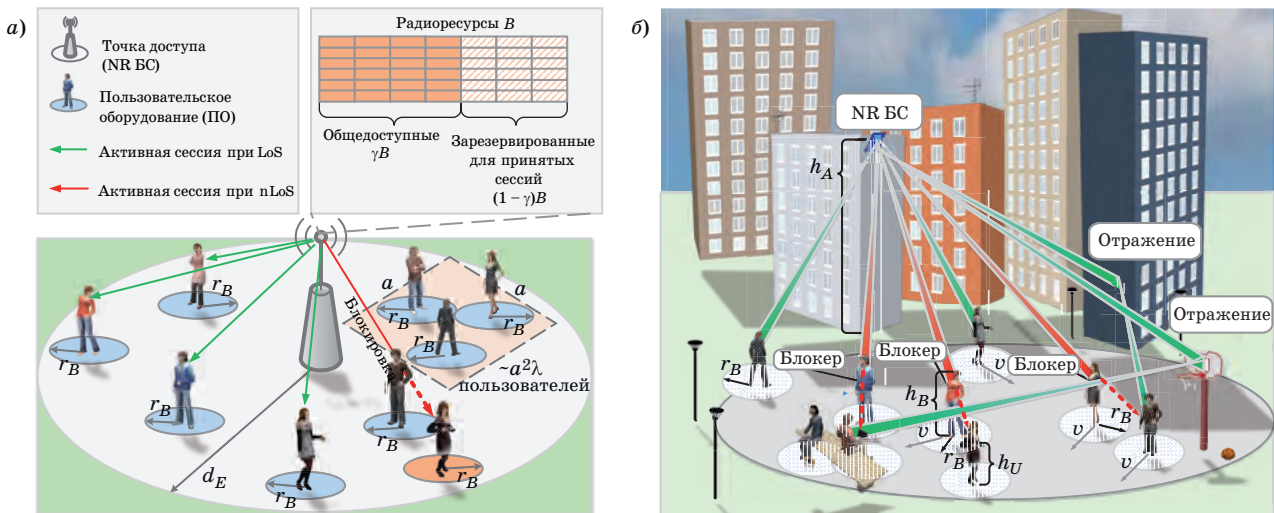
На рис. 1, а изображена одна NR БС с высотой h_A и несколько пешеходов с абонентскими устройствами ПО, которые перемещаются в ее зоне покрытия, имеющей форму круга радиуса d_E . Предполагается, что значение d_E выбрано с учетом высоты h_U расположения ПО. Далее в разделе будет показано, как оценить радиус d_E для модели распространения сигнала и набора модуляционно-кодированных схем (Modulation and Coding Schemes — MCS), указанных для технологии NR в Release 15 [1]. Плотность пешеходов задается распределением Пуассона с параметром λ_B пешеходов на квадратный метр [13].

Иллюстрация динамической блокировки путей распространения радиосигнала показана на рис. 1, б. Пешеходы перемещаются в пределах зоны обслуживания БС согласно модели случайного блуждания Random Direction Model (RDM) [14] со скоростью v [м/с] и экспоненциально распределенной длиной траектории в среднем τ метров.

Движущийся пешеход может на время стать блокиратором прямой видимости для неподвижного пешехода — пользователя сети, установившего сессию с БС. Потоки пешеходов через границу зоны покрытия БС считаются постоянными и равными в обоих направлениях. Пешеходы моделируются цилиндрами с высотой h_B и радиусом основания r_B . Высота пешеходов соответствует среднему росту человека и принимается равной $h_B = 1,7$ м, при этом ПО находится на высоте $h_U = 1,7$ м. В зависимости от условий прямой видимости и расстояния между БС и ПО для поддержки надежной передачи данных используется соответствующая модуляционно-кодированная схема [2].

Пешеходы являются также источниками запросов на установление сессии. Поток запросов, поступающих на БС, предполагаем пуассоновским с параметром, зависящим от интенсивности λ запросов на установление сессии на квадратный метр, а также от площади зоны покрытия πd_E^2 . Предполагаем, что пользователи, генерирующие запросы, неподвижны и равномерно распределены в пределах зоны покрытия БС. Длительность сессии имеет экспоненциальное распределение с средним $1/\mu$. Для обслуживания принятой в систему сессии помимо занятия прибора требуется случайный объем ресурса в соответствии с некоторой функцией распределения (ФР) $F_R(x)$, $x > 0$.

Принятая в систему сессия может быть сброшена до завершения предоставления пользователю услуги, если при изменении условий прямой видимости доступный свободный ресурс на БС недостаточен для поддержания сессии, т. е. для передачи данных с требуемой для запрошенной услуги скоростью. Появление и исчезновение



■ **Рис. 1.** Компоненты анализируемой системы: а — модель развертывания сети; б — модель блокировки
 ■ **Fig. 1.** Components of the system model: а — network deployment model; б — lock model

блокера на линии прямой видимости между БС и соответствующим ПО моделируется с помощью поступающих на БС сигналов прерывания, интервалы между которыми полагаем экспоненциально распределенными с параметром α . После поступления сигнала прерывания требование к ресурсу для продолжения обслуживания сессии меняется, при этом увеличение требования к ресурсу соответствует появлению, а уменьшение — исчезновению блокера на линии прямой видимости между БС и ПО.

Считаем, что БС имеет ресурс объема B [Гц]. Механизм резервирования [12] предполагает, что только часть ресурса, а именно γB , доступна для запросов на установление новой сессии, в то время как для сессий, уже принятых в систему, доступен весь объем ресурса. Резервирование доли $(1 - \gamma)$ ресурса для принятых на обслуживание сессий предназначено для их защиты от сброса, если блокировка прямой видимости между БС и ПО произойдет в состоянии, когда весь общедоступный ресурс занят.

При поступлении запроса на установление новой сессии на БС проверяется, достаточно ли свободного ресурса в доступной для новых запросов части для обслуживания поступившего запроса. В случае положительного ответа устанавливается новая сессия, при этом суммарный объем занятого ресурса в системе увеличивается на величину требования, иначе запрос на установление сессии теряется, не изменяя объема занятого ресурса.

После поступления сигнала прерывания занятый обслуживанием сессии ресурс освобождается, и требование к ресурсу для продолжения обслуживания этой сессии разыгрывается заново с той же ФР $F_R(x)$, $x > 0$. Если новое требование к ресурсу не превосходит старое, т. е. при исчезновении блокера, сессия продолжает свое обслуживание, при этом суммарный занятый ресурс уменьшается на величину разницы между требованиями. Если новое требование к ресурсу превосходит старое, т. е. при появлении блокера, возможны два варианта. Если объем свободных ресурсов не меньше требуемого дополнительного объема, т. е. разницы между требованиями, то сессия продолжает свое обслуживание, при этом суммарный объем занятого ресурса в системе увеличивается на величину разницы между требованиями. Если объем свободных ресурсов не достаточен, то сессия, попавшая в условия nLoS блокировки прямой видимости, сбрасывается, занятый ее обслуживанием ресурс освобождается, уменьшая суммарный объем занятого ресурса в системе.

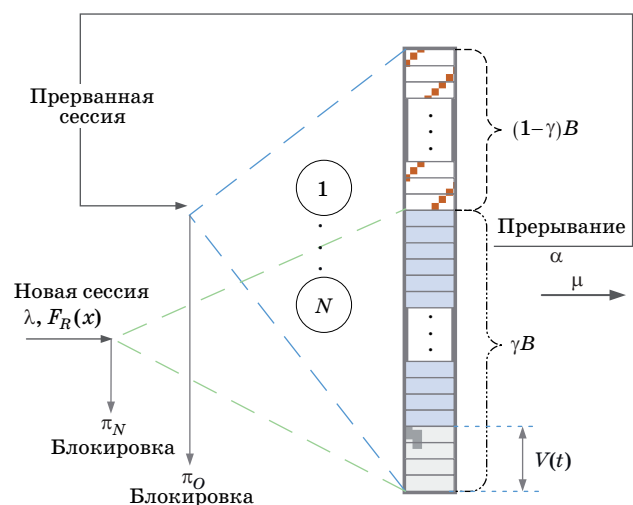
Основной интересующей метрикой является вероятность π_O преждевременного завершения принятой на обслуживание сессии (далее — вероятность сброса принятой сессии). Сброс сессии означает для пользователя сети досрочное прекра-

щение предоставления сетью запрошенной услуги и снижает качество услуг в сети 5G NR [15]. Другой метрикой, которую мы рассматриваем, является вероятность π_N потери поступающего запроса на установление новой сессии (далее — вероятность потери поступающей сессии). Мы также исследуем влияние доли зарезервированных ресурсов на коэффициент U использования ресурсов системы.

Анализ математической модели

Формализация и решение системы массового обслуживания

Рассмотрим систему массового обслуживания (СМО) с сигналами [16] с конечным числом N приборов и ресурсом ограниченного объема B . Система обслуживает два типа заявок — новые и повторные. Для оценки влияния механизма резервирования мы вводим два логических пула ресурсов объема B_0 и B , где $B_0 = \gamma B$ — объем ресурса, доступного для новых и для повторных заявок, $B_0 < B$, а $(1 - \gamma)B$ — объем ресурса, доступного только для повторных заявок. На систему поступает пуассоновский поток новых заявок, который соответствует потоку запросов на установление новой сессии в сети 5G NR. Принятая в систему заявка помимо прибора занимает некоторый случайный объем ресурсов в соответствии с ФР $F_R(x)$. В работе ФР $F_R(x)$ предполагается дискретной, поэтому далее мы будем говорить о целочисленном ресурсе, например, измеряемом в герцах. Длительность обслуживания заявки имеет экспоненциальное распределение с средним $1/\mu$. Схема функционирования системы представлена на рис. 2.



■ **Рис. 2.** Ресурсная СМО с сигналами и резервированием

■ **Fig. 2.** Illustration of our queueing model

Новая заявка принимается, если в общедоступной части γB достаточно свободного ресурса, в противном случае заявка теряется. Также на систему поступает пуассоновский поток сигналов интенсивности α . При поступлении сигнала прерывается обслуживание случайно выбранной новой или повторной заявки, и требование к ресурсу для продолжения ее обслуживания разыгрывается заново с той же ФР $F_R(x)$. Обслуживание принятой в систему заявки может быть прервано несколько раз. Сигнал прерывания вместо выбранной заявки порождает повторную заявку, которая соответствует той же сессии в сети 5G NR в изменившихся условиях прямой видимости между БС и ПО. Повторной заявке доступен весь свободный ресурс из общего объема ресурса B . Если объем запрашиваемого ресурса для повторной заявки больше, чем свободный ресурс, заявка сбрасывается, не завершив обслуживания. При завершении обслуживания заявки или ее сбросе из-за недостатка ресурса для продолжения обслуживания объем занятых ресурсов в системе уменьшается на количество ресурса, которое было ранее выделено для завершенной / сброшенной заявки.

Следуя [16], для вывода стационарного распределения в аналитической замкнутой форме вводим марковский процесс $\mathbf{X}(t) = (\xi(t), \delta(t))$, где $\xi(t)$ — число активных сессий в системе, а $\delta(t)$ — суммарный объем занятых ресурсов [21, 22]. Пространство состояний для процесса $\mathbf{X}(t)$ имеет следующий вид: $\mathbf{X} = \bigcup_{k=1}^N \mathbf{X}_k$, $\mathbf{X}_k = \{(k, r) : 0 \leq r \leq B, p_r^{(k)} > 0\}$, где $p_r^{(k)}$ обозначает k -кратную свертку вероятностей

стей $p_r, r \geq 0$, и интерпретируется как вероятность того, что k заявок занимают r единиц ресурса. Стационарные вероятности процесса $\mathbf{X}(t)$ определяются как

$$q_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{\xi(t) = 0, \delta(t) = 0\}; \quad (1)$$

$$q_k(r) = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{\xi(t) = k, \delta(t) = r\}, (k, r) \in \mathbf{X}_k. \quad (2)$$

Заметим, что если требование к ресурсу повторной заявки не превышает количество свободного ресурса, система меняет свое состояние с (k, j) на (k, r) с вероятностью $\sum_{i=0}^{\min(j,r)} p_{j-i} p_i^{(k-1)} p_{r-i} / p_j^{(k)}$. В противном случае повторная заявка сбрасывается, и система переходит из состояния $(k+1, r+j)$ в (k, r) с вероятностью $(1 - \sum_{s=0}^{B-r} p_s) p_j p_r^{(k)} / p_{j+r}^{(k+1)}$.

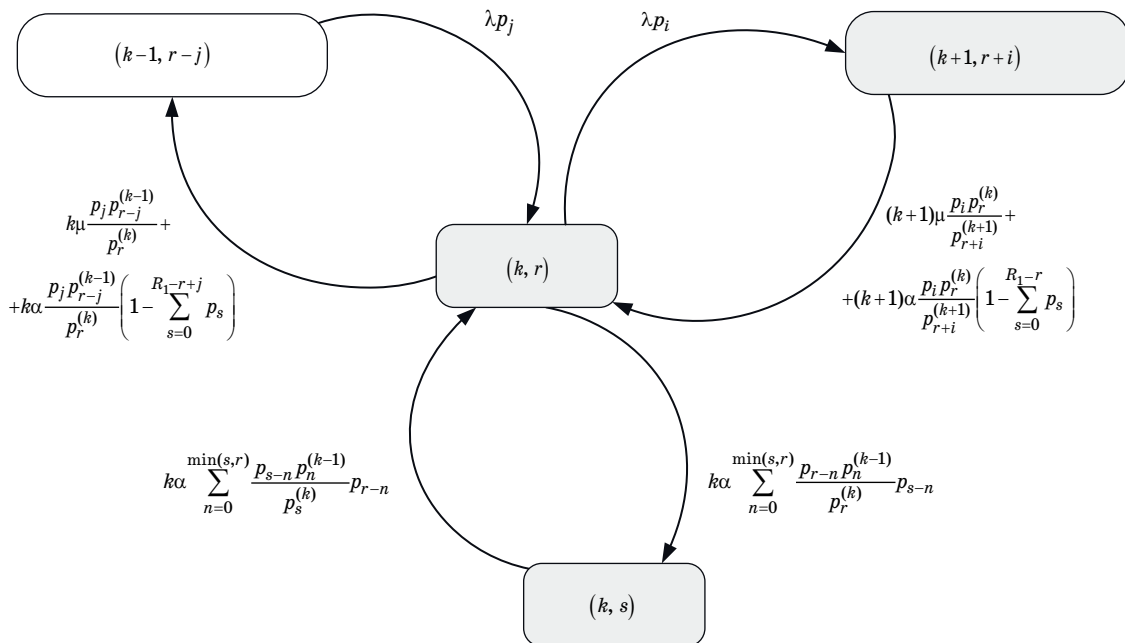
Диаграмма интенсивностей переходов для центральных состояний системы представлена на рис. 3.

Система уравнений равновесия для процесса $\mathbf{X}(t)$ имеет следующий вид:

$$\lambda q_0 \sum_{j=0}^{B_0} p_j = \mu \sum_{j:(1,j) \in \mathbf{X}_1} q_1(j) + \alpha \sum_{j:(1,j) \in \mathbf{X}_1} q_1(j) \left(1 - \sum_{j=0}^B p_j \right);$$

$$\left(\theta(B_0 - j) \lambda \sum_{j=0}^{B_0-r} p_j + k\mu + k\alpha \right) q_k(r) =$$

$$= \theta(B_0 - j) \lambda \sum_{j \geq 0: (k-1, r-j) \in \mathbf{X}_{k-1}} q_{k-1}(r-j) p_j +$$



■ **Рис. 3.** Диаграмма интенсивностей переходов
 ■ **Fig. 3.** Illustration of transition rates in the Markov model

$$\begin{aligned}
 & + (k+1)\mu \sum_{j \geq 0: (k+1, r+j) \in X_{k+1}} q_{k+1}(r+j) \frac{p_j p_r^{(k)}}{p_{j+r}^{(k+1)}} + \\
 & + (k+1)\alpha \left(1 - \sum_{j=0}^{B-r} p_j \right) \times \\
 & \times \sum_{j \geq 0: (k+1, r+j) \in X_{k+1}} q_{k+1}(r+j) \frac{p_j p_r^{(k)}}{p_{j+r}^{(k+1)}} + k\alpha \times \\
 & \times \sum_{j \geq 0: j: (k, j) \in X_k} q_k(j) \sum_{i=0}^{\min(j, r)} \frac{p_{j-i} p_i^{(k-1)}}{p_j^{(k)}} p_{r-i}; \quad (3) \\
 & N(\mu + \gamma)q_N(r) = \\
 & = \theta(B_0 - j)\lambda \sum_{j \geq 0: (N-1, j) \in X_{N-1}} q_{N-1}(r-j) p_j + \\
 & + N\alpha \sum_{j: (N, j) \in X_N} q_N(j) \sum_{i=0}^{\min(j, r)} \frac{p_{j-i} p_i^{(N-1)}}{p_j^{(N)}} p_{r-i}.
 \end{aligned}$$

Здесь $(N, r) \in X_k$, $1 \leq k \leq N-1$, $(k, r) \in X_k$, а $\theta(B_0 - j)$ — функция Хевисайда:

$$\theta(B_0 - j) = \begin{cases} 0, & j > B_0; \\ 1, & j \leq B_0. \end{cases} \quad (4)$$

Зная стационарные вероятности состояний системы, можно получить вероятностные характеристики СМО, представляющие интерес: вероятности потери новой заявки и сброса повторной заявки, соответствующие вероятностям потери поступающей сессии и сброса принятой на обслуживание сессии в сети 5G NR, а также коэффициент использования ресурса СМО, соответствующий коэффициенту использования ресурсов БС.

В частности, формула для вычисления вероятности потери новой заявки имеет вид

$$\pi_N = 1 - \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{r=0}^{B_0} q_n(r) \sum_{j=0}^{B_0-r} p_j. \quad (5)$$

Для получения формулы вероятности сброса повторной заявки необходимо ввести следующие обозначения. Пусть T — некоторый достаточно большой интервал времени и $\lambda(1 - \pi_N)$ — интенсивность поступления новых заявок. Тогда $\lambda(1 - \pi_N)T$ — среднее число новых заявок, принятых на обслуживание за время T . Среднее число заявок в системе определяется как

$$E[N] = \sum_{n=0}^N \sum_{r=0}^B n q_n(r). \quad (6)$$

Тогда $\alpha E[N]$ является интенсивностью прерывания, а интенсивность сброса заявки определяется как

$$\beta = \alpha E[N] \sum_{n=1}^N \sum_{r=0}^B q_n(r) \sum_{j=0}^r \frac{p_j p_{r-j}^{(n-1)}}{p_r^{(n)}} \left[1 - \sum_{i=0}^{B-r+j} p_i \right]. \quad (7)$$

Используя (7), получаем вероятность сброса повторной заявки

$$\pi_O = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\beta T}{\lambda(1 - \pi_N)T} = \frac{\beta}{\lambda(1 - \pi_N)}. \quad (8)$$

Наконец, коэффициент использования ресурса оцениваем как отношение среднего суммарного занятого ресурса в стационарном режиме к общему ресурсу системы:

$$U = \frac{1}{B} \sum_{n=1}^N \sum_{r=0}^B r q_n(r). \quad (9)$$

Параметризация СМО

Для проведения анализа показателей производительности системы, определенных формулами (5)–(9), необходимо выполнить параметризацию системы, в частности, определить ФР $F_R(x)$ объема запрашиваемого для обслуживания сессии ресурса и интенсивность α поступления сигналов прерываний, соответствующих переходам из условий LoS в nLoS и обратно.

Прежде всего, найдем радиус d_E зоны покрытия БС. Зона покрытия определяется таким образом, что мощность сигнала между БС и ПО, находящимся на границе зоны в условиях nLoS отсутствия прямой видимости, равна пороговому уровню мощности для предоставления запрошенной услуги. Обозначим S_{\min} пороговое значение ОСШ, соответствующее «младшей» модуляционно-кодовой схеме, определенной для NR [2]. Моделируя распространение сигнала с помощью формулы Фрииса [17] с учетом условий nLoS, имеем следующее соотношение:

$$S_{\min} = \frac{P_A G_A G_U}{N_0 W A_2} (d_E^2 + [h_A - h_U]^2)^{-\zeta/2}, \quad (10)$$

где P_A — мощность БС; G_A, G_U — коэффициенты усиления антенн БС и ПО [20]; N_0 — тепловой шум на 1 Гц (постоянная Джонсона — Найквиста); W — полоса, Гц; $A_2 = 10^{2 \log_{10} f_c + 4,24}$ — коэффициент распространения сигнала в условиях nLoS; h_A и h_U — высоты БС и ПО; ζ — экспонента затухания.

Решая уравнение относительно d_E , получаем

$$d_E = \sqrt{\left(P_A G_A G_U / (N_0 W A_2 S_{\min}) \right)^{2/\zeta} - (h_A - h_U)^2}. \quad (11)$$

Имея значение d_E , мы можем определить функцию распределения требований к ресурсам при установлении / поддержании сессии. Пусть S_{nB} — случайная величина, обозначающая ОСШ в условиях LoS прямой видимости, а $F_{S_{nB}}(x)$, $x > 0$ — ее ФР. Учитывая равномерное распределение генерирующих запросы на новые сессии ПО в пределах покрытия БС, ФР $F_D(y)$ расстояния D между ПО и БС может быть записана как

$$F_D(y) = (y^2 - (h_A - h_U)^2) / d_E^2; \\ |h_A - h_U| < y < \sqrt{d_E^2 + (h_A - h_U)^2}. \quad (12)$$

Поскольку модель распространения является монотонно убывающей функцией, распределение ОСШ в условиях LoS может быть выражено через распределение расстояния D , т. е. $F_{S_{nB}}(s) = 1 - F_D\left(\sqrt{\frac{P_A G_A G_U}{N_0 W A_1 s}}\right)$, где $A_1 = 10^{2 \log_{10} f_c + 3,24}$.

Функция распределения случайной величины S_B , определяющая ОСШ в условиях nLoS, получается аналогично. Для определения общей ФР ОСШ нам также требуется вероятность блокировки прямой видимости. В работе [7] вероятность блокировки прямой видимости для ПО, находящегося на расстоянии x , определяется как

$$\pi_B(x) = 1 - e^{-2\lambda_B r_B \left(x \frac{h_B - h_U + r_B}{h_A - h_U} \right)}, \text{ откуда следует, что} \\ \pi_B = \int_0^{d_E} p_B(x) \frac{2x}{d_E^2} dx.$$

Функцию распределения ОСШ $F_S(s)$, $s > 0$, теперь можно определить путем взвешивания случайных величин S_B и S_{nB} , соответствующих условиям nLoS и LoS, с вероятностями π_B и $1 - \pi_B$ соответственно. Обозначим далее s_j , $j = 1, 2, \dots, K$

границы диапазонов ОСШ для модуляционно-кодовых схем MCS NR, определенных в [2], где K — число таких схем. Тогда вероятность m_i того, что для сессии ПО назначена модуляционно-кодовая схема i , имеет вид

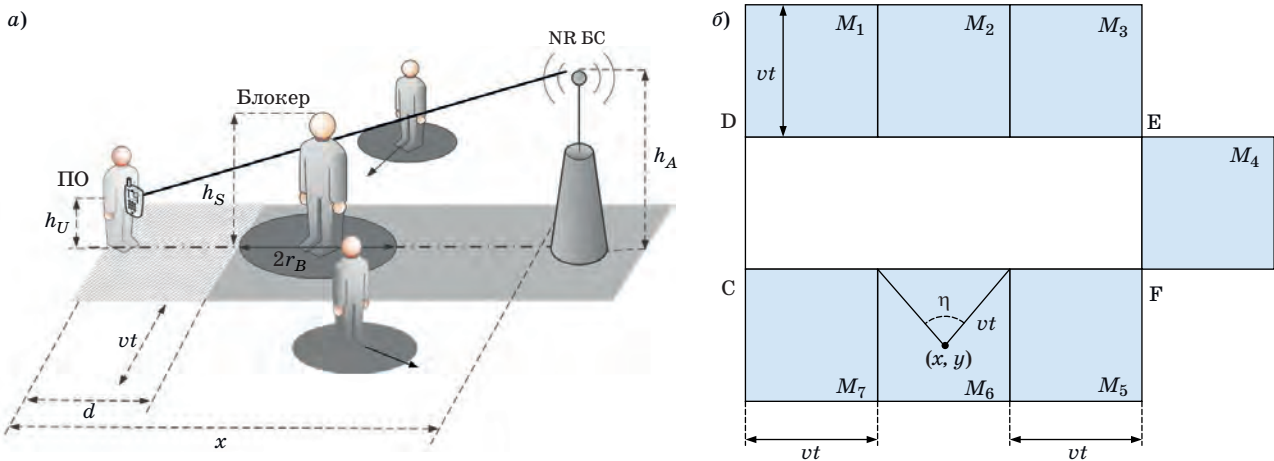
$$m_i = F_S(s_{i+1}) - F_S(s_i). \quad (13)$$

Поскольку скорость передачи данных для каждой модуляционно-кодовой схемы известна [2], зная пространственное распределение ПО, с помощью (13) мы можем оценить объем ресурса, требуемый для поддержания сессии с заданной средней скоростью передачи данных R . Таким образом, получаем ФР $F_R(x)$ объема запрашиваемых ресурсов для модели СМО из первого раздела.

Осталось определить параметр α — интенсивность изменения условий прямой видимости для ПО. Для этого сначала мы определяем интенсивность $\varepsilon(x)$ пересечения блокерами зоны блокировки прямой видимости для пользователя, расположенного на расстоянии x от БС. На рис. 4, а эта прямоугольная зона показана серым фоном, а на рис. 4, б показаны семь областей вокруг зоны блокировки, двигаясь из которых блокеры могут пересекать зону блокировки, перекрывая прямую видимость между ПО и БС. Интенсивность блокеров, пересекающих зону блокировки ПО, может быть аппроксимирована следующим образом:

$$\varepsilon(x) = \sum_{i=1}^7 \iint_{M_i} g_i(x, y) P\{E\} P\{T > 1\} \lambda_B M_i dx dy, \quad (14)$$

где M_i — площадь области i ; $g_i(x, y)$ — плотность вероятности нахождения блокера в точке (x, y) в области i ; $P\{E\}$ — вероятность того, что блокер движется в направлении зоны блокировки; $P\{T > 1\}$ — вероятность того, что блокер не меня-



■ Рис. 4. Зона блокировки прямой видимости ПО: а — модель движения блокера; б — источники блокеров
 ■ Fig. 4. UE blocking zone: а — blocker movement model; б — sources of blockers

ет направление своего движения в течение единицы времени.

Заметим, что $g_i(x, y) = 1/M_i$; $P\{T > 1\} = \exp(-1/\tau)$; $P\{E\} = \eta_i(x, y)/2\pi$, где $\eta_i(x, y)$ — диапазон угла направления движения блокера в области i , который приведет к пересечению зоны блокировки прямой видимости.

Теперь мы можем упростить выражение (14) следующим образом:

$$\varepsilon(x) = \frac{\lambda e^{-1/\tau}}{2\pi} \sum_{i=1}^7 \iint \eta_i(x, y) dx dy,$$

где $\eta_1(x, y) = ([x_D - x]/vt)$, $i = 1, 3, 5, 7$; $\eta_2(x, y) = 2 \cos^{-1}([x_E - x]/vt)$, $i = 2, 6$; $\eta_4(x, y) = 2 \tan^{-1} \times ([x - x_E]/[y - y_E])$.

Окончательно нормированная по времени интенсивность поступления блокеров в зону блокировки прямой видимости в зоне покрытия БС имеет вид

$$\varepsilon = \int_0^{d_E} \varepsilon(x) \frac{2x}{d_E^2} dx. \quad (15)$$

Формула (15) определяет параметр экспоненциального распределения длительности интервала LoS прямой видимости между ПО и БС [18]. Длительность интервала nLoS блокировки прямой видимости между ПО и БС соответствует периоду занятости в СМО $M|GI|_{\infty}$, где ФР времени обслуживания, которое представляет собою время пребывания блокера в зоне блокировки, зависит от модели движения блокера [19]. Тогда параметр α — интенсивность изменения условий прямой видимости для ПО — может быть получен как обратная величина к среднему интервалу LoS и nLoS.

Численные результаты и их интерпретация

В данном разделе приведены результаты численного анализа применения механизма резервирования ресурсов БС 3GPP NR для сессий, принятых на обслуживание. В качестве показателей эффективности мы используем вероятность потери запроса на установление сессии и вероятность сброса принятой на обслуживание сессии, а также коэффициент использования ресурса БС. Значения параметров системы для численного анализа приведены в таблице.

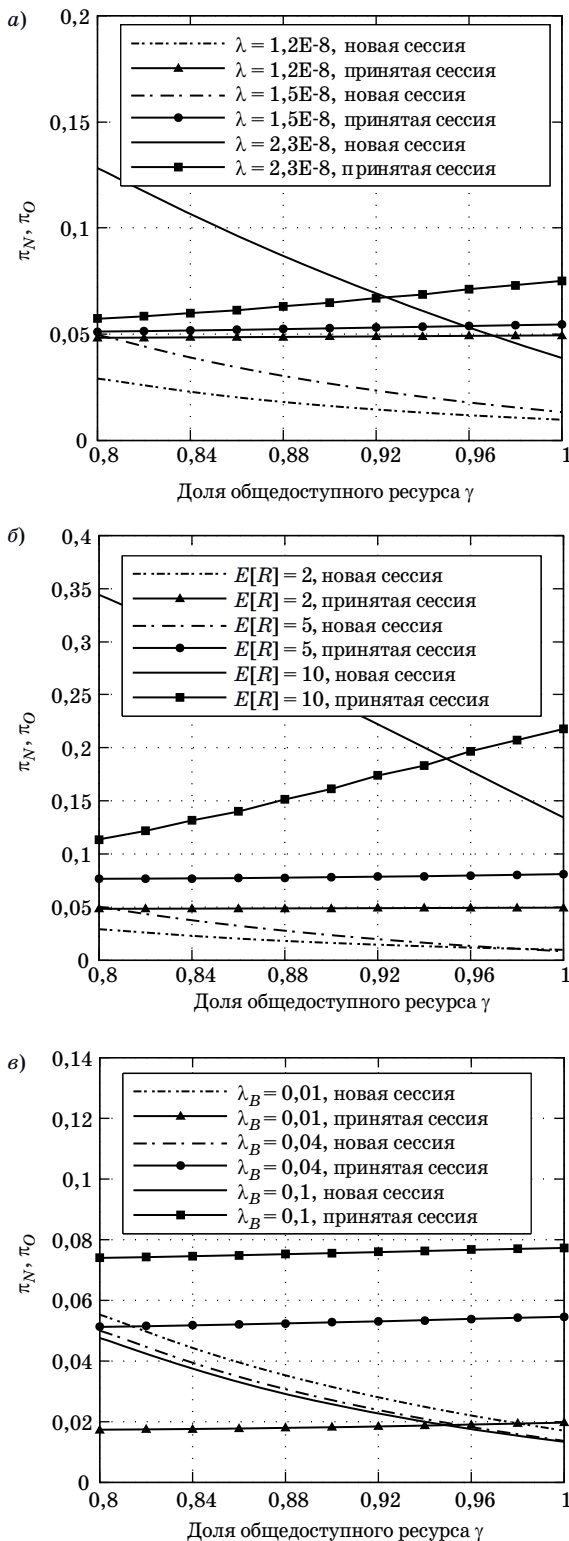
Заметим, что нагрузка в системе зависит от площади зоны покрытия NR БС. Для параметризации модели мы выбрали интенсивность λ поступления запросов на установление сессии на квадратный метр, которая указана на графиках рис. 5 и 6. Также отметим, что расчеты для различных

- Исходные данные для численного анализа
- Default parameters for numerical assessment

Параметр	Значение
Несущая частота, f_c	28 Гц
Полоса частот, B	400 МГц
Высота БС, h_A	10 м
Высота блокера, h_B	1,7 м
Высота ПО, h_U	1,5 м
Радиус блокера, r_B	0,4 м
Скорость перемещения блокера, v	2 м/с
Среднее перемещение блокера за такт, τ	5 м
Мощность передатчика, P_T	0,2 Вт
Экспонента затухания, ζ	2,1
Плотность блокеров, λ_B	0,5 на 1 м ²
Тепловой шум, N_0	-84 дБм
Затухание сигнала	15 дБ
Антенная решетка ПО	4 × 4 элементов
Усиление антенны ПО, G_R	5,57 дБи
Средняя скорость передачи данных, R	2, 5, 10 Мбит/с
Среднее время обслуживания сессии, $1/\mu$	30 с
Интенсивность поступления сессий на БС, λ	$10^{-4}, 10^{-2}$ сессий/с
Число антенных элементов БС	1, 4, 8, 16, 32, 64, 128
Доля общедоступного ресурса, γ	[0,8; 1]

конфигураций антенных решеток не показали качественного изменения поведения исследуемых характеристик, поэтому ниже приведены результаты для одного из вариантов, а именно антенной решетки 4 × 4 на стороне ПО. Схемы MCS для NR были взяты из публикации [2].

Вероятности потери поступающей сессии и вероятности сброса принятой на обслуживание сессии в зависимости от параметра γ механизма резервирования ресурсов показаны на рис. 5 для средней скорости передачи данных 2 Мбит/с, интенсивности поступления запросов на установление сессии, равной $2,2 \cdot 10^{-8}$ на квадратный метр, и плотности блокеров, равной 0,04 на квадратный метр. На рис. 5, а можно заметить, что механизм резервирования ресурсов позволяет сократить сброс сессий, принятых на обслуживание. Как и ожидалось, существует баланс между вероятностями потери поступающей сессии и сброса



■ **Рис. 5.** Вероятности потери поступающей сессии и сброса принятой сессии: *a* — интенсивность поступления запросов на установление сессии; *b* — средняя скорость передачи данных; *в* — плотность блокиров

■ **Fig. 5.** New and ongoing session drop probabilities for selected system parameters: *a* — the intensity of requests to establish a session; *b* — average data rate; *в* — blocker density

принятой на обслуживание сессии. Тем не менее преимущества предлагаемого метода очевидны для всех рассмотренных интенсивностей поступления запросов на установление сессии. Важно отметить положительный эффект применения механизма резервирования с точки зрения вероятности сброса принятых на обслуживание сессий при увеличении интенсивности поступления запросов на установление новой сессии, что обеспечивает более высокую производительность системы именно в условиях перегрузки. Последнее имеет решающее значение для потенциальных операторов сетей 5G NR.

Рассмотрим влияние скорости R передачи данных, представленное на рис. 5, б, для интенсивности поступления запросов на установление сессии, равной $2,2 \cdot 10^{-8}$ на квадратный метр, и плотности блокиров $0,04$ на квадратный метр. Здесь наблюдаются несколько важных эффектов. Во-первых, увеличение средней скорости передачи данных отрицательно влияет на вероятность потери поступающей сессии и, напротив, положительно — на вероятность сброса сессии, принятой на обслуживание. Во-вторых, что более важно, в ответ на растущие требования к скорости передачи данных преимущество резервирования ресурсов резко возрастает. В частности, для средней скорости 10 Мбит/с вероятность сброса принятой сессии при резервировании 20% ресурса для принятых на обслуживание сессий уменьшается в два раза — с $0,21$ для $\gamma = 1$ до $0,11$ при $\gamma = 0,8$. Для тех же значений γ и $E[R] = 5$ Мбит/с разница практически не увеличивается. Следовательно, резервирование ресурсов особенно эффективно для сессий, имеющих высокие требования к скорости передачи данных. Обслуживание таких сессий является основной задачей будущих систем 5G NR.

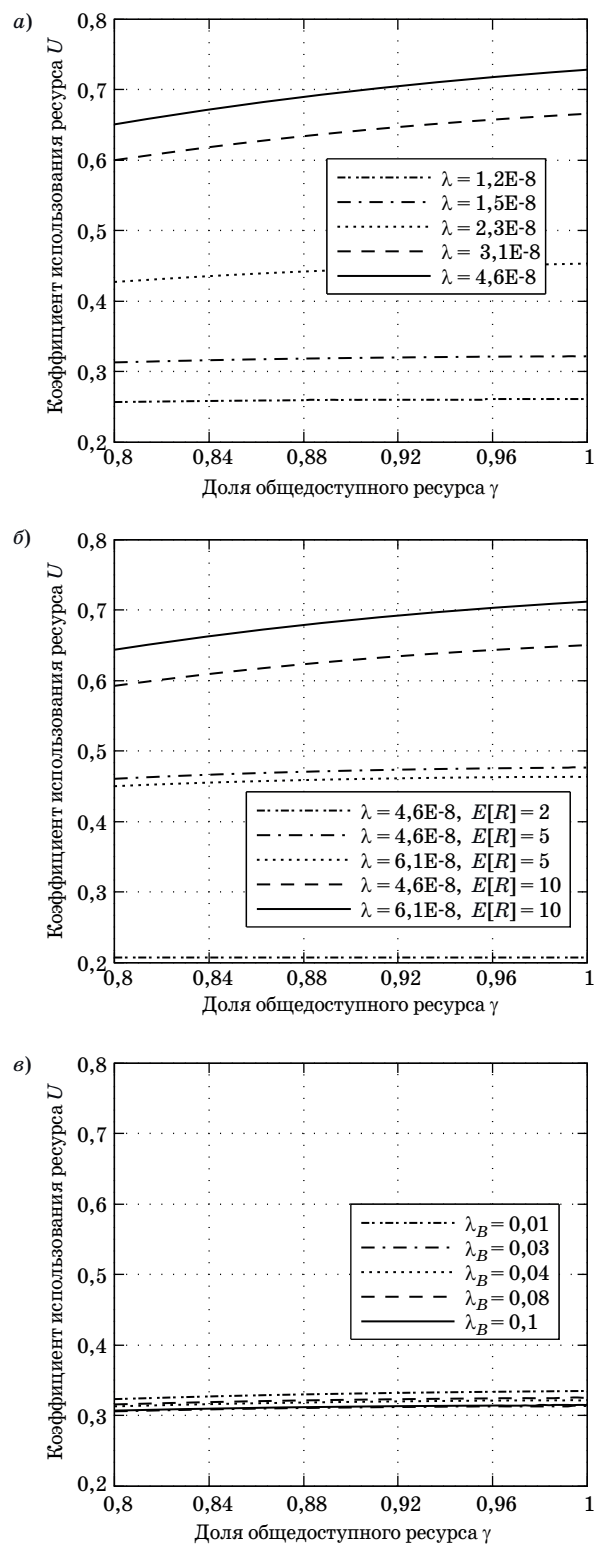
Известно, что блокировки прямой видимости серьезно влияют на производительность систем NR, работающих в миллиметровом диапазоне частот. На рис. 5, в показано влияние плотности блокиров на вероятности потери поступающей сессии и сброса принятой сессии для скорости передачи данных 2 Мбит/с и интенсивности поступления запросов на установление сессии, равной $2,2 \cdot 10^{-8}$ на квадратный метр. Несложно заметить существенную разницу между вероятностями сброса принятой сессии, соответствующими разным значениям плотности блокиров. Фактически вероятность π_O увеличивается от $0,02$ до $0,07$ – $0,08$. Разница же в вероятностях потери поступающей сессии намного меньше и не превышает $0,01$ во всем рассматриваемом диапазоне. Причиной такого поведения является то, что более высокие значения плотности блокиров приводят к более высокой интенсивности изменения условий прямой видимости между БС и ПО. Рост числа переходов между состояниями LoS/

nLoS для ПО в течение обслуживания одной сессии приводит к увеличению вероятности сброса принятой сессии. Заметим, что такой же эффект дает увеличение высоты БС или блокера, а также уменьшение высоты ПО, что увеличивает зону блокировки LoS, тем самым приводя к более частым изменениям условий прямой видимости для ПО.

Механизм резервирования ресурсов предназначен для достижения баланса между вероятностями потери поступающей сессии и сброса принятой сессии. Заметим, что резервирование ресурсов для сессий, уже принятых в систему, может поставить под угрозу эффективность использования ресурсов. Использование ресурсов сети в зависимости от интенсивности поступления новых сессий проиллюстрировано на рис. 6 при средней скорости передачи данных 2 Мбит/с и плотности блокеров 0,04 на квадратный метр. Ожидаемо, что при росте λ увеличивается объем используемых ресурсов во всем рассматриваемом диапазоне резервирования. В частности, для более низких значений, например для интенсивности поступления запросов на установление сессии, равной $1,2 \cdot 10^{-8}$, коэффициент использования ресурсов остается практически неизменным, 0,26 при $\gamma \in [0,8; 1]$. Для более высоких значений интенсивности поступления запросов на установление сессий, для которых резервирование ресурсов показало высокую эффективность на стороне пользователя (см. рис. 5), ухудшение составляет от 0,73 для $\gamma = 1$ до 0,65 для $\gamma = 0,8$. Причиной такого эффекта являются частые изменения условий прямой видимости ПО для сессий, принятых на обслуживание.

Влияние средней скорости передачи данных на коэффициент использования ресурсов показано на рис. 6, б для двух предложенных интенсивностей поступления сессий и плотности блокеров, равной 0,04 на квадратный метр. Следует заметить, что снижение коэффициента использования ресурсов незначительно для всех рассмотренных скоростей передачи данных. Однако важно отметить, что при более высоких скоростях коэффициент использования ресурсов увеличивается. Причина такого поведения в следующем: во-первых, улучшение частично связано с более высокой предложенной нагрузкой $\rho = E[R]\lambda/\mu$, во-вторых, сессии с большей средней скоростью характеризуются высокими требованиями к ресурсам в условиях nLoS.

Наконец, рассмотрим влияние плотности блокеров на коэффициент использования ресурсов (рис. 6, в) при средней скорости 2 Мбит/с и интенсивности поступления запросов на установление сессий, равной $1,5 \cdot 10^{-8}$ на квадратный метр. Мы наблюдаем, что увеличение λ_B приводит к незначительному снижению использования ре-



■ **Рис. 6.** Коэффициент использования ресурсов: а — интенсивность поступления запросов на установление сессии; б — средняя скорость передачи данных; в — плотность блокеров

■ **Fig. 6.** System resource utilization as a function of system parameters: а — the intensity of requests to establish a session; б — average data rate; в — blocker density

сурсов во всем диапазоне значений параметра механизма резервирования. Основная причина заключается в том, что высокая интенсивность изменений условий прямой видимости для ПО приводит к большому количеству прерываний соответствующей сессии, что было видно также на рис. 5, 6, причем ключевым параметром здесь является отношение между средней длительностью обслуживания сессии и частотой изменения условий прямой видимости.

Заключение

В системах 3GPP NR частые блокировки прямой видимости между приемо-передающими устройствами могут привести к сбросу уже принятых в систему сессий, обслуживание которых не завершено. В статье предложен механизм резервирования ресурса БС в целях повышения качества предоставления услуг в системах 3GPP NR, а также разработана математическая модель, позволяющая исследовать влияние этого механизма на основные показатели качества обслуживания в сети 5G NR — непрерывность сессий и отказ в установлении новой сессии. Модель учитывает ключевые особенности технологии 3GPP NR, включая высоту взаимодействующих объектов, геометрию и мобильность блокеров, миллиметровый диапазон передачи, модуляционно-кодовые схемы, антенные решетки, а также прямую видимость между приемо-передающими устройствами.

Численный анализ показал, что создание приоритета для сессий, чье обслуживание еще не за-

вершено, обеспечивает значительную гибкость для балансировки непрерывности сессии и отказа в установлении новой сессии за счет небольшого снижения эффективности использования радиоресурса. На практике резервирование небольшого количества радиоресурсов для сессий, принятых на обслуживание, может значительно повысить непрерывность сессий в системе. Важно отметить, что свои лучшие показатели система демонстрирует в условиях перегрузки. Кроме того, для любого заданного значения параметра механизма резервирования вероятность сброса обслуживаемой сессии уменьшается с увеличением средней скорости передачи данных в течение сессии. Эти особенности повышают востребованность предложенного механизма для систем NR, которые в первую очередь предназначены для приложений, требующих высокой пропускной способности.

Благодарности

Авторы благодарят аспиранта кафедры прикладной информатики и теории вероятностей РУДН Т. Р. Велиеву, принимавшую участие в проведении численного эксперимента, за оформление его результатов.

Финансовая поддержка

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 2.882.2017/4.6).

Литература

1. Report ITU-R M.2376-0: Technical feasibility of IMT in bands above 6 GHz. ITU, Electronic Publication, Geneva, 2015. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2376-2015-PDF-E.pdf (дата обращения: 15.05.2019).
2. 3rd Generation Partnership Project: Technical Specification Group Radio Access Network, NR, Physical channels and modulation (Release 15), 3GPP TR 38.211, V15.6.0, 2019. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.211/ (дата обращения: 10.06.2019).
3. Report Qualcomm: Making 5G NR a Commercial Reality, 2019. <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/making-5g-nr-a-commercial-reality.pdf> (дата обращения: 15.05.2019).
4. Татарникова Т. М. Статистические методы исследования сетевого трафика. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 5, с. 35–43. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2018-5-35-43>
5. Галинина О. С., Андреев С. Д., Тюрликов А. М. Учет специфики доступа большого числа устройств при межмашинном взаимодействии в современных сотовых сетях. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 4, с. 105–114. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2019-4-105-114>
6. Samuylov A., Gapeyenko M., Moltchanov D., Gerasimenko M., Singh S., Himayat N., Andreev S., and Koucheryavy Y. Characterizing spatial correlation of blockage statistics in urban mmWave systems. *2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2016, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2016.7848859>
7. Gapeyenko M., Samuylov A., Gerasimenko M., Moltchanov D., Singh S., Akdeniz M., Aryafar E., Himayat N., Andreev S., and Koucheryavy Y. On the temporal effects of mobile blockers in urban millimeter-wave cellular scenarios. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 66, 2017, no. 11, pp. 10124–10138. doi:10.1109/TVT.2017.2754543
8. Michalopoulos D. S., Viering I., and Du L. User-plane multiconnectivity aspects in 5G. *2016 23rd Interna-*

- tional Conference on Telecommunications (ICT), May 2016, pp. 1–5.
9. Ohmann D., Awada A., Viering I., Simsek M., and Fettweis G. P. Achieving high availability in wireless networks by inter-frequency multi-connectivity. *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, May 2016, 7 p. doi:10.1109/ICC.2016.7511428
 10. 3rd Generation Partnership Project: NR, Multi-connectivity; Overall description; Stage-2 (Release 15), 3GPP TR 37.340, December 2017. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37_series/37.340/ (дата обращения: 23.04.2019).
 11. Giordani M., Mezzavilla M., and Zorzi M. Initial access in 5G mmwave cellular networks. *IEEE Communications Magazine*, Nov. 2016, vol. 54, pp. 40–47.
 12. Moltchanov D., Samuylov A., Petrov V., Gapeyenko M., Himayat N., Andreev S., and Koucheryavy Y. Improving session continuity with bandwidth reservation in mmwave communications. *IEEE Wireless Communications Letters* 8, 2019, no. 1, pp. 105–108. doi:10.1109/LWC.2018.2859988
 13. Kingman J. F. C. *Poisson processes*. Wiley Online Library, 1993. 112 p. doi.org/10.1002/0470011815.b2a07042
 14. Nain P., Towsley D., Liu B., and Liu Z. Properties of random direction models. *IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, 2005, vol. 3, pp. 1897–1907. doi:10.1109/INFCOM.2005.1498468
 15. Seitz N. ITU-T QoS standards for IP-based networks. *IEEE Communications Magazine*, 2003, vol. 41, no. 6, pp. 82–89.
 16. Наумов В. А., Самуйлов К. Е. Анализ сетей ресурсных систем массового обслуживания. *Автоматика и телемеханика*, 2018, вып. 5, с. 59–68. doi.org/10.1134/S0005117918050041
 17. Friis H. T. A note on a simple transmission formula. *Proceedings of the IRE*, 1946, vol. 34(5), pp. 254–256. doi:10.1109/JRPROC.1946.234568
 18. Gapeyenko M., Samuylov A., Gerasimenko M., Moltchanov D., Singh S., Aryafar E., Yeh S., Himayat N., Andreev S., and Koucheryavy Y. Analysis of human-body blockage in urban millimeter-wave cellular communications. *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2016, 7 p. doi:10.1109/ICC.2016.7511572
 19. Daley D. J. and Servi L. Idle and busy periods in stable m/m/k queues. *Journal of Applied Probability*, 1988, vol. 35 (4), pp. 950–962.
 20. Constantine A. B., et al. *Antenna theory: analysis and design. Microstrip Antennas*. Third edition. John Wiley & Sons, 2005. 1099 p.
 21. Bobbio A. and Trivedi K. S. An aggregation technique for the transient analysis of stiff markov chains. *IEEE Transactions on Computers*, 1986, no. 9, pp. 803–814.
 22. Ciardo G. and Smirni E. Etaqa: an efficient technique for the analysis of qbd-processes by aggregation. *Performance Evaluation*, 1999, vol. 36, pp. 71–93.

UDC 621.39

doi:10.31799/1684-8853-2019-5-51-63

Performance evaluation of bandwidth reservation for mmWave 5G NR systemsV. O. Begishev^a, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-7232-4157, begishev-vo@rudn.ruE. S. Sopin^{a,b}, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, orcid.org/0000-0001-9082-2152D. A. Molchanov^{a,c}, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0003-4007-7187A. K. Samouylov^{a,c}, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-2087-769XYu. V. Gaidamaka^{a,b}, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, orcid.org/0000-0003-2655-4805K. E. Samouylov^{a,b}, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-6368-9680^aPeoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6, Miklukho-Maklay St., 117198, Moscow, Russian Federation^bThe Institute of Informatics Problems of the Federal Research Center «Computer Science and Control» of the RAS, 44-2, Vavilov St., 119333, Moscow, Russian Federation^cTampere University of Technology, 10, Korkeakoulunkatu, 33100, Tampere, Finland

Introduction: In 3GPP New Radio (NR) systems, frequent radio propagation path blockages can lead to the disconnection of ongoing sessions already accepted into the system, reducing the quality of service in the network. Controlling access to system resource by prioritizing for the ongoing sessions can increase the session continuity. In this paper, we propose resource allocation with a reservation mechanism. **Purpose:** Development of a mathematical model for analyzing the effect of this mechanism on other system performance indicators – dropping probabilities for new and ongoing sessions and system utilization. The model takes into account the key features of the 3GPP NR technology, including the height of the interacting objects, the spatial distribution and mobility of the blockers, as well as the line-of-sight propagation properties between the transceivers for mmWave NR technology. **Results:** We analyzed the reservation mechanism with the help of a developed model in the form of a resource queueing system with signals, where the base station bandwidth corresponds to the resource, and the signals model a change in the line-of-sight conditions between the receiving and transmitting devices. Creating a priority for ongoing sessions whose service has not yet been completed provides a considerable flexibility for balancing the session continuity and dropping of a new session, with a slight decrease in the efficiency of the radio resource utility. With the developed model, we showed that reserving even a small bandwidth (less than 10% of the total resources) to maintain the ongoing sessions has a positive effect on their continuity, as it increases the probability of their successful completion. **Practical relevance:**

The proposed mechanism works more efficiently in overload conditions and with sessions which have a high data transfer rate requirements. This increases the demand for the proposed mechanism in 5G NR communication systems.

Keywords — millimeter wave, 5G networks, New Radio, session continuity, bandwidth reservation, new session drop probability, ongoing session drop probability, system resource utilization.

For citation: Begishev V. O., Sopin E. S., Molchanov D. A., Samouylov A. K., Gaidamaka Yu. V., Samouylov K. E. Performance evaluation of bandwidth reservation for mmWave 5G NR systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 5, pp. 51–63 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-5-51-63

References

1. Report ITU-R M.2376-0: Technical feasibility of IMT in bands above 6 GHz. ITU, Electronic Publication, Geneva, 2015. Available at: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2376-2015-PDF-E.pdf (accessed 15 May 2019).
2. 3rd Generation Partnership Project: Technical Specification Group Radio Access Network, NR, Physical channels and modulation (Release 15), 3GPP TR 38.211, V15.6.0, 2019. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.211/ (accessed 10 June 2019).
3. Report Qualcomm: Making 5G NR a Commercial Reality, 2019. Available at: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/making-5g-nr-a-commercial-reality.pdf> (accessed 15 May 2019).
4. Tatarnikova T. M. Statistical methods for studying network traffic. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 5, pp. 35–43 (In Russian). <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2018-5-35-43>
5. Galinina O. S., Andreev S. D., and Tyurlikov A. M. On multiple access of a large number of machine-type devices in cellular networks. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 4, pp. 105–114 (In Russian). <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2019-4-105-114>
6. Samuylov A., Gapeyenko M., Moltchanov D., Gerasimenko M., Singh S., Himayat N., Andreev S., and Koucheryavy Y. Characterizing spatial correlation of blockage statistics in urban mmWave systems. *2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2016, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2016.7848859>
7. Gapeyenko M., Samuylov A., Gerasimenko M., Moltchanov D., Singh S., Akdeniz M., Aryafar E., Himayat N., Andreev S., and Koucheryavy Y. On the temporal effects of mobile blockers in urban millimeter-wave cellular scenarios. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 66, 2017, no. 11, pp. 10124–10138. doi:10.1109/TVT.2017.2754543
8. Michalopoulos D. S., Viering I., and Du L. User-plane multi-connectivity aspects in 5G. *2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*, May 2016, pp. 1–5.
9. Ohmann D., Awada A., Viering I., Simsek M., and Fettweis G. P. Achieving high availability in wireless networks by inter-frequency multi-connectivity. *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, May 2016, 7 p.
10. 3GPP, NR; Multi-connectivity; Overall description; Stage-2 (Release 15), 3GPP TR 37.340, December 2017. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37_series/37.340/ (accessed 23 April 2019).
11. Giordani M., Mezzavilla M., and Zorzi M. Initial access in 5G mmwave cellular networks. *IEEE Communications Magazine*, Nov. 2016, vol. 54, pp. 40–47.
12. Moltchanov D., Samuylov A., Petrov V., Gapeyenko M., Himayat N., Andreev S., and Koucheryavy Y. Improving session continuity with bandwidth reservation in mmwave communications. *IEEE Wireless Communications Letters* 8, 2019, no. 1, pp. 105–108. doi:10.1109/LWC.2018.2859988
13. Kingman J. F. C. *Poisson processes*. Wiley Online Library, 1993. 112 p. doi.org/10.1002/0470011815.b2a07042
14. Nain P., Towsley D., Liu B., and Liu Z. Properties of random direction models. *IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, 2005, vol. 3, pp. 1897–1907. doi:10.1109/INFCOM.2005.1498468
15. Seitz N. ITU-T QoS standards for IP-based networks. *IEEE Communications Magazine*, 2003, vol. 41, no. 6, pp. 82–89.
16. Naumov B. A., Samouylov K. Analysis of networks of the resource queuing systems. *Automation and Remote Control*, 2018, vol. 5, pp. 59–68 (In Russian). doi.org/10.1134/S0005117918050041
17. Friis H. T. A note on a simple transmission formula. *Proceedings of the IRE*, 1946, vol. 34(5), pp. 254–256. doi:10.1109/JRPROC.1946.234568
18. Gapeyenko M., Samuylov A., Gerasimenko M., Moltchanov D., Singh S., Aryafar E., Yeh S., Himayat N., Andreev S., and Koucheryavy Y. Analysis of human-body blockage in urban millimeter-wave cellular communications. *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2016, 7 p. doi:10.1109/ICC.2016.7511572
19. Daley D. J. and Servi L. Idle and busy periods in stable m/m/k queues. *Journal of Applied Probability*, 1988, vol. 35(4), pp. 950–962.
20. Constantine A. B., et al. *Antenna theory: analysis and design. Microstrip Antennas*. Third edition. John Wiley & Sons, 2005. 1099 p.
21. Bobbio A. and Trivedi K. S. An aggregation technique for the transient analysis of stiff markov chains. *IEEE Transactions on Computers*, 1986, no. 9, pp. 803–814.
22. Ciardo G. and Smirni E. Etaqa: an efficient technique for the analysis of qbd-processes by aggregation. *Performance Evaluation*, 1999, vol. 36, pp. 71–93.