МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

МАТЕРИАЛЫ
VIII Международной молодежной научной
конференции
«МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ИНФОРМАЦИОННЫХ,
ТЕХНИЧЕСКИХ
И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

Томск, 26–30 мая 2021 г.

Под общей редакцией И.С. Шмырина

Томск
Издательство Томского государственного университета
2021

V. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

DOI: 10.17223/978-5-907442-42-9-2021-17

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА МИКРОМОБИЛЬНОСТИ В БЕСПРОВОДНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЯХ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА*

Голос Е.С.¹, Острикова Д.Ю.¹, Молчанов Д.А.², Гайдамака Ю.В.¹

¹Российский университет дружбы народов; ²Университет Тампере
goloselizaveta@gmail.com, d.ostrikova@gmail.com, dmitri.moltcanov@tuni.fi, gaydamaka-yuv@rudn.ru

Введение

Несмотря на то, что запуск первых коммерческих сетей 5G в мире состоялся только в апреле 2019 г., ведущие страны и компании-разработчики технологий 5G уже объявили о планах по разработке технологий мобильной связи шестого поколения – 6G, действующей в терагерцовом диапазоне частот [1]. Ожидается, что будут реализованы совершенно новые приложения и услуги. Однако чтобы удовлетворить требования этих приложений, 6G необходимо радикально повысить скорость доступа сотовых технологий [2]. Помимо высокой скорости доступа, БС ТГц диапазона частот должны будут обеспечивать возможность обслуживать гораздо больше устройств, чем нынешние сети и сети 5G [3]. Однако использование диапазона чрезвычайно высоких частот (THF) приводит к высоким потерям, и, более того, каналы ТГц частот будут подвержены динамической блокировке и микромобильности [4].

Для того, чтобы предотвратить серьезные потери при распространении, будут использованы колоссальные антенные решетки с тысячами элементов как на стороне базовой станции, так и на стороне пользовательского устройства. Эти решетки будут способны создавать диаграммы направленности излучения антенны с шириной луча всего несколько градусов или даже меньше [5].

В данной работе были проанализированы такие характеристики, как вероятность отсутствия связи и эргодическая спектральная эффективность для различных схем переключения: схема моментального переключения и схема поиска луча с учетом микромобильности в зависимости от числа базовых станций и интенсивности блокировки человеческими телами. Была рассмотрена стандартизованная операция мультисвязности 3GPP, когда ПУ одновременно поддерживают связь с несколькими БС в ТГц [6]. В этом исследовании мы фиксируем характеристики распространения в ТГц диапазоне и диаграммы направленности антенны, а также различные конструкции механизмов поиска луча и установления соединения.

1. Математическая модель

В данной работе расположение базовых станций ТГц диапазона частот соответствует точечному пуассоновскому процессу (PPP) в Re^2 с плотностью λ_A . Высота базовой станции (БС) постоянна и равна h_A . Рассматривается одно пользовательское устройство (ПУ) в случайно выбранной точке. Следует отметить, что целевое ПУ остается неподвижным на протяжении всей своей работы. Высота ПУ постоянна и равна h_{ij} .

Люди в пешеходной зоне вокруг ПУ действуют как потенциальные блокаторы с плотностью λ_B в Re^2 . Данные блокаторы моделируются как цилиндры с радиусом r_B . Предполагаем, что рост людей постоянный и равен h_B , причем $h_B > h_{ij}$. Для того, чтобы оценить динамику блокировки ТГц LoS, считаем, что люди движутся в соответствии с

* Публикация выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-07-00933 и № 20 07 01064.

моделью случайного направления (RDM). Согласно этому, пользователь сначала случайным образом определяет направление движения равномерно в $(0, 2\pi)$, а затем движется в выбранном направлении с постоянной скоростью v м/с в течение экспоненциально распределенного времени с параметром μ .

Будем считать, что в состоянии блокировки LoS связь невозможна, т.о., значение SINR на ПУ в неблокированном состоянии LoS может быть записано как [Ошибка! Источник ссылки не найден.]

$$S(x) = P_T G_A G_U \left[\frac{x^{-\xi_T} e^{-Kx}}{N_0 + M_T} \right].$$

Таблица 1

Данные для численного эксперимента

Обозначение	Значение	Описание
P_T	2	излучаемая мощность передающей антенны
G_A	$10^{0.1-17.58}$	коэффициент усиления передающей антенны
G_U	$10^{0.1-5.57}$	коэффициент усиления принимающей антенны
ξ_T	2.1	коэффициент затухания сигнала
N_0	$10^{0.1(-84)}$	шум
M_T	$10^{0.1-3}$	граница затухания сигнала
λ_A	0.001	плотность расположения бс
h_A	4	высота бс
h_B	1.7	высота блокатора
h_U	1.5	высота пу
r_B	0.4	радиус блокатора

Чтобы оценить влияние мультисвязности на производительность ПУ, мы предполагаем, что выбранное ПУ может поддерживать N соединений с соседними ТГц БС. Рассмотрим два способа построения соединений.

1.1. Схема с мгновенным переключением

Данный метод заключается в том, что процедура поиска луча выполняется в каждом кадре, отражающем сотовую структуру системы связи ТГц диапазона. Это означает, что время переключения является мгновенным. При установлении сессии ПУ выбирает свою ближайшую БС. ПУ меняет свою точку доступа всякий раз, когда оно входит в состояние отключения с текущей БС. Как в моменты установления сессии, так и в моменты повторного подключения выбирается ближайшая неблокируемая БС из ближайшего N . В данной работе N равняется двум, т.е. ПУ связано с двумя ближайшими базовыми станциями и испытывает перебои в работе только тогда, когда обе они находятся в состояниях блокировки.

Рис. 1. Схема с мгновенным переключением

Плотность распределения вероятностей до i -й БС равна $f_i(x) = \frac{2(\pi\lambda_A)^i}{(i-1)!} x^{2i-1} e^{-\pi\lambda_A x^2}$, $x > 0$, $i = \overline{1, N}$. Таким образом, емкость ПУ, связанного с i -й БС, равна $E[C_i] = \int_0^\infty \log_2(1 + S(x)) f_i(x) dx$. Вероятность блокировки i -й БС ТГц диапазона равна

$$p_{N,i} = 1 - \int_0^\infty \frac{2(\pi\lambda_A)^i}{(i-1)!} x^{2i-1} e^{-\pi\lambda_A x^2} e^{-2\pi f_B \lambda_B \frac{h_B - h_U}{h_A - h_U}} dx.$$

В данной работе считаем, что блокировки LoS на БС ТГц независимы друг от друга, вероятность блокировки для N ближайших БС может быть вычислена как

$p_N = \prod_{i=1}^N p_{N,i}$. Доля времени, в течение которой сессия остается активной, равна

$p_{\tau_i} = (1 - p_{N,i}) \prod_{k=1}^{i-1} p_{N,k}$. Таким образом, средняя спектральная эффективность считается

как $C = \sum_{i=1}^N T_i E[C_i]$.

1.2. Схема с поиском луча

Теперь рассмотрим схему с процедурой поиска луча, отражающую стиль проектирования WLAN в системе связи ТГц. В данной системе перебои могут быть вызваны как блокировкой, так и микромобильностью. Для представления процесса микромобильности в ПУ мы используем модель, представленную в [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Согласно ей, микромобильность моделируется как комбинация случайных процессов перемещения по осям $x(t)$ и $y(t)$ вместе со случайными процессами вращения по этим плоскостям, $\phi(t)$ и $\theta(t)$.

С практической точки зрения, выравнивание лучей требуется, когда происходит их расхождение. Чтобы учесть этот принцип, необходимо расширить подход с идеальным поиском луча, принимая во внимание ненулевое время переключения T_B на другую БС путем введения дополнительной компоненты. T_B рассчитывается по формуле $T_B = (N_U + N_T) \delta$, где N_U и N_T – количество конфигураций антенных решеток, соответственно на ПУ и ТГц БС, δ – время однократного переключения решетки. Следует обратить внимание, что на практике T_B зависит от многих факторов, включая используемые

Рис. 2 иллюстрирует рассматриваемую схему для случая $N = 2$ БС, описывая возможные события и состояния, определенные моделью. Блокировка LoS и микроомбильность образуют периоды простоя, которые заканчиваются процедурой поиска луча. Таким образом, период простоя состоит из периода, когда все N БС находятся в заблокированном состоянии, T_{NL} , включая время, необходимое для поиска луча, T_B . В качестве альтернативы он может состоять только из процедуры поиска луча, если есть хотя бы одна БС в незаблокированном состоянии. Переключение БС происходит только в результате процедуры поиска луча, которая устанавливает новое активное соединение с ближайшей БС в незаблокированном состоянии LoS.

99

Рис. 3. Поглощающая цепь Маркова с учетом микромобильности

В соответствии с [5], [7], время между последовательными событиями блокировки распределено приблизительно экспоненциально. Таким образом, процесс событий блокировки с i -й БС является однородным пуассоновским с интенсивностью $\mu_{B,i}$:

$$\mu_{B,i} = \int_0^{\infty} f_i(x) \frac{2r_B \lambda_B v (x[h_B - h_U] + r_B[h_A - h_U])}{h_A - h_U} dx.$$

Это означает, что плотность распределения вероятностей и функция распределения неблокированного периода LoS, когда он связан с i -й БС, представлены как $f_{T_{L,i}}(t) = \mu_{B,i} e^{-\mu_{B,i}t}$ и $F_{T_{L,i}}(t) = 1 - e^{-\mu_{B,i}t}$.

Пусть $F_{B,i}(t)$ – функция распределения заблокированного периода с i -й БС. Как показано в [9], распределение заблокированного интервала совпадает с периодом занятости в системе M/GI/inf,

$$F_{B,i}(t) = 1 - \left[\int_0^t [1 - F_{B,i}(t-z)] de^{-\mu_{B,i}F_T(z)} \right] + [1 - F_T(t)] \left[1 - \int_0^t [1 - F_{B,i}(t-z)] e^{-\mu_{B,i}F_T(z)} \mu_{B,i} dz \right],$$

где $F_T(t)$ – это функция распределения времени, необходимого одному блокатору для пересечения зоны блокировки LoS, выраженная ступенчатой функцией Хевисайда

$$F_T(t) = H\left(t - \frac{2r_B}{v}\right).$$

Предполагая независимость процесса блокировки на базовых станциях, функция распределения периода блокировки T_{NL} может быть выражена в виде

$$F_{T_{NL,i}}(t) = 1 - [1 - F_{B,i}(t)] \prod_{j=1, j \neq i}^N [1 - F_{B_j^*}(t)], \text{ где } B_i \text{ и } B_j^* - \text{случайные величины, обозначающие периоды блокировки и остаточной блокировки } j\text{-й БС, соответственно, в то время как } F_{B,i}(x) \text{ и } F_{B_j^*}(x) \text{ являются соответствующими ФР. } F_{B_j^*}(x) \text{ можно рассчитать следующим образом:}$$

$$F_{B_j^*}(t) = \int_0^{\infty} \frac{F_{B,i}(t+\tau) - F_{B,i}(\tau)}{\tau [1 - F_{B,i}(\tau)]} d\tau, \quad j = \overline{1, N}, \quad j \neq i.$$

Далее переходим к расчету среднего времени блокировки LoS:

$$E[T_{NL}] = T_B + \sum_{i=1}^N p_{\tau_i} \int_0^{\infty} t f_{T_{NL,i}}(t) dt.$$

Вновь вернемся к интервалу T_L , определяемому как временной интервал, когда из всех N доступных БС всегда есть БС в неблокированном состоянии, с которыми ПУ может связываться. Ранее описанная марковская цепь, характеризуется матрицей переходных вероятностей $Q = [q_{ij}]$, $i, j = \overline{0, 3N}$. Элементы $Q = [q_{ij}]$ могут быть выражены как

$$\begin{aligned} q_{i, N+i} &= (1 - p_N) \int_0^\infty \int_y^\infty f_{T_{L,i}}(y) f_{T_A}(x) dx dy, \quad i = \overline{1, N}, \\ q_{i, 2N+i} &= (1 - p_N) \int_0^\infty \int_y^\infty f_{T_A}(y) f_{T_{L,i}}(x) dx dy, \quad i = \overline{1, N}, \\ q_{N+i, i} &= \prod_{k=1}^{i-1} p_{N,k}, \quad i = \overline{1, N}, \\ q_{N+i, j} &= (1 - p_{N,j}) \prod_{k=1, k \neq i}^{i-1} p_{N,k}, \quad i, j = \overline{1, N}, \quad i \neq j, \\ q_{i, 0} &= p_N, \quad i = \overline{1, N}, \end{aligned}$$

$q_{0,0} = 1$, $q_{i,j} = 0$ в остальных случаях.

Напомним, что среднее количество посещений поглощающей цепью Маркова переходного состояния определяется элементами фундаментальной матрицы $D = (I - U)^{-1}$, где $U = [u_{ij} = q_{ij}]$, $i, j = \overline{1, 3N}$ – подматрица, описывающая процесс до выхода из множества переходных состояний. Элемент (i, j) матрицы D – это ожидаемое число раз, когда цепочка находится в состоянии j , учитывая, что цепочка началась в состоянии i . С использованием фундаментальной матрицы, среднее число шагов от состояния i до поглощения задается соответствующими элементами вектора $\vec{\tau}$ с компонентами $\tau_i = \sum_{j=1}^{3N} \pi_j d_{ji}$, $i = \overline{1, 3N}$.

Используя полученный результат, можем найти среднюю продолжительность поиска луча в неблокированном состоянии: $E[B] = T_B \sum_{j=N+1}^{3N} \tau_{N+j}$. Данное выражение при-

водит к средней продолжительности интервала связи: $E[T_L] = E[B] + \sum_{i=1}^N \tau_i T_{L,i}$.

Теперь средняя продолжительность непрерывной связи с i -й БС может быть найдена из минимума двух случайных величин как

$$T_{L,i} = \int_0^\infty t (f_{T_{L,i}}(t) [1 - F_A(t)] + f_{T_A}(t) [1 - f_{T_{L,i}}(t)]) dt. \text{ Это выражение дает нам возможность}$$

определить долю времени, в течение которого ПУ связано с i -й БС. Используя это наблюдение, средняя спектральная эффективность в течении времени T_L может быть

$$\text{найдена как } E[C_{T_L}] = \frac{1}{E[T_L]} \sum_{i=1}^N \tau_i T_{L,i} E[C_i].$$

Таким образом, вероятность отсутствия связи может быть представлена как $p_0 = \frac{E[T_{NL}] + E[B]}{E[T_{NL}] + E[T_L]}$. Также можно определить эргодическую спектральную эффектив-

$$\text{ность } E[C] = \frac{E[T_L] E[C_{T_L}]}{E[T_{NL}] + E[T_L]}.$$

2. Численные результаты

Для проведения численного исследования используем данные, представленные в табл. 1. На рис. 4 изображены графики зависимости вероятности отсутствия связи и спектральной эффективности в ТГц диапазоне частот от плотности блокаторов при степени мультисвязности $N = 1$ и $N = 3$.

Рис. 4 Вероятность отсутствия связи (а) и спектральная эффективность (б) в зависимости от плотности блокаторов

Как можно заметить из рисунка, с увеличением плотности блокаторов вероятность отсутствия связи также возрастает, а спектральная эффективность, наоборот, убывает. Также из графика видно, что показатели системы при переключении по запросу с учетом микроподвижности становятся еще хуже, чем при переключении по запросу без учета микроподвижности по сравнению со схемой мгновенного переключения. Аналогичную ситуацию можно заметить и на графике спектральной эффективности. Также стоит отметить, что эффективность работы схемы напрямую зависит от числа БС. С увеличением БС показатели системы улучшаются, т.е. вероятность отсутствия связи становится значительно ниже, чем при тех же значениях плотности блокаторов, но с меньшим числом БС, а спектральная эффективность – выше.

Заключение

В работе была рассмотрена модель обслуживания пользовательского устройства базовыми станциями, работающими в ТГц диапазоне частот в условиях динамической блокировки и микроподвижности. Результаты численного эксперимента демонстрируют, что присутствие микроподвижности значительно ухудшает исследуемые характеристики обслуживания. Однако использование большего числа ТГц БС по принципу множественных подключений позволяет кардинально улучшить показатели функционирования системы. В дальнейшем планируется рассмотреть влияние динамической блокировки и микроподвижности на другие показатели эффективности системы, например, угловую скорость вращений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dang S., Amin O., Shihada B., Alouini M.-S. What should 6g be? // Nature Electronics. – 2020. – V. 3. – No. 1. – P. 20–29.
2. Rappaport T.S., Xing Y., Kanhere O., Ju S., Madanayake A., Mandal S., Alkhateeb A., Trichopoulos G.C. Wireless communications and applications above 100 ghz: Opportunities and challenges for 6g and beyond // IEEE Access. – 2019. – V. 7. – P. 78729–78757.
3. Medvedeva E., Gorbunova Y., Gaidamaka Y., Samouylov K. A discrete queueing model for performance analysis of scheduling schemes in multi-user mimo systems // IEEE International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Work-shops (ICUMT). – 2019. – V. 2019. – P. 1–5.

4. Bilgin B.A., Ramezani H., Akan O.B. Human blockage model for indoor terahertz band communication // IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). – 2019. P. 1–6.
5. Gerasimenko M., Moltchanov D., Gapeyenko M., Andreev S., Koucheryavy Y. Capacity of multiconnectivity mmWave systems with dynamic blockage and directional antennas // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. – 68 (4). – P. 3534–3549.
6. 3GPP, “NR; Multi-connectivity; stage 2 (Release 16),” 3GPP TS 37.340 V16.0.0, December 2019.
7. Begishev V., Moltchanov D., Sopin E., Samuylov A., Andreev S., Koucheryavy Y., Samouylov K. Quantifying the impact of guard capacity on session continuity in 3GPP New Radio systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2019. – V. 68. – No. 12. – P. 12345–12359.
8. Petrov V., Moltchanov D., Koucheryavy Y., Jornet J.M. Capacity and outage of terahertz communications with user micromobility and beam misalignment // IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020. – V. 69. – No. 6. – P. 6822–6827.
9. Gapeyenko M., Samuylov A., Gerasimenko M., Moltchanov D., Singh S., Akdeniz M.R., Aryafar E., Himayat N., Andreev S., Koucheryavy Y. On the temporal effects of mobile blockers in urban millimeter wave cellular scenarios // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2017. – Available online.

DOI: 10.17223/978-5-907442-42-9-2021-18

О КОНЦЕПЦИИ P2P ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ДАННЫХ В СЕТИ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

Джегюеде А.М.А.Э., Салпагаров С.И.

Российский университет дружбы народов
1042205202@rudn.ru, salpagarov-si@rudn.ru

Введение

Одноранговая сеть peer-to-peer (P2P) – хорошо известный вид распределенной сети, которая в последние 20 лет широко используется для многих целей. Цели варьируются от протоколов обмена файлами [1] до протоколов потоковой передачи [2] и обмен финансовыми транзакциями в блокчейн-приложениях [3]. Помимо P2P, существует еще одна сетевая архитектура – клиент-серверная (CS). CS из-за его централизованной топологии подвержен сбоям, когда количество пользовательских запросов к центральному серверу превышает определенный порог [4], вследствие чего может наблюдаться неспособность клиентов общаться друг с другом. Более того, реализация архитектуры CS обходится слишком дорого из-за стоимости серверов и их обслуживания. P2P представляет собой децентрализованную распределенную сеть, в которой каждый узел имеет одинаковые привилегии и одинаковый набор функций. Благодаря недорогой реализации эта архитектура пользуется большим успехом в различных областях, таких как телевидение [2], системы обмена файлами [1], VoIP сервисы [5] и блокчейн-приложения.

1. P2P топологии

Как правило, топология описывает взаимосвязь между узлами в сети [2]. Она может быть физической или логической. В архитектуре P2P чаще всего используются топологии ячеистые и древовидные. В древовидной топологии существуют два класса узлов – родительские (корневые) и дочерние узлы. Для древовидной топологии характерно наличие единой точки отказа в лице корневого узла. Механизм быстрой замены был реализован в рамках реализации системы MAPSTER – одноранговая система обмена данными [6]. В MAPSTER была реализована Super Peer топология. В ней различались SP-узлы (суперузлы), ASP-узлы (запасные суперузлы) и NP-узлы (нормальные узлы). Сеть разделена на домены (кластеры). В каждом домене SP-узел имеет главную роль маршрутизации и управления. ASP-узлы являются резервными, выбираются из ряда наиболее устойчивых по ряду параметров (мощности процессора, доступной пропускной способности и т.д.) среди NP-узлов и готовы в установленном порядке заменить SP-узлы. В [7] была представлена гибридная топология под названием UStream. Она предполагает три слоя, состоящих из Root-узлов, Parent-узлы и Children-узлов со-