

ИНФОРМАТИКА, ТЕХНИКА И ҲИСОББАРОР ВА ИДОРАКУНӢ - ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ - INFORMATICS, COMPUTER TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

УДК 621.39

DOI:10.65599/QFAC8409

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ СВЯЗИ 5G

Б.Б. Саидов, И. Саъдулло, Н.Б. Хусейнзода

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

В условиях стремительного развития современных беспроводных технологий, в частности систем пятого поколения (5G), возрастают требования к антенным системам по параметрам направленности, коэффициенту усиления и стабильности излучения. Использование мультимедийных концентраторов в составе антенн для 5G-сетей открывает возможности для формирования высоконаправленных диаграмм излучения, уменьшения потерь мощности и обеспечения надёжной связи при передаче данных на миллиметровых частотах. В статье проведено теоретическое и экспериментальное исследование параметров радиоканала сетей мобильной связи пятого поколения (5G). Рассмотрены физические и стохастические процессы, определяющие качество передачи данных, включая затухание, дифракцию, отражение и рассеяние электромагнитных волн. Разработана математическая модель, учитывающая влияние расстояния до базовой станции, коэффициента затухания и уровня шумов на мощность принимаемого сигнала, отношение сигнал/шум (SNR), пропускную способность и вероятность битовой ошибки (BER). На основе моделирования получены зависимости основных характеристик канала от расстояния в диапазоне 10–200 м. Установлено, что при увеличении расстояния наблюдается экспоненциальное снижение пропускной способности и рост вероятности ошибок. Определена пороговая область надёжной передачи данных (до 100 м), при которой SNR превышает 10 дБ. Результаты могут быть использованы при проектировании, оптимизации и внедрении систем связи 5G и 6G, а также при оценке устойчивости радиоканалов в условиях многолучевого распространения и электромагнитных помех.

Ключевые слова: 5G, радиоканал, затухание, пропускная способность, отношение сигнал/шум, вероятность ошибки, моделирование.

УСУЛҶО ВА НАТИҶАҶОИ ТАДҚИҚОТИ ТАҶРИБАВӢ-НАЗАРИЯВИИ СИСТЕМАҶОИ АЛОҚАИ 5G

Б.Б. Саидов, И. Саъдулло, Н.Б. Хусейнзода

Дар шароити рушди босуръати технологияҳои бесим, хусусан системаҳои насли панҷум (5G), талабот ба системаҳои антенна аз рӯи параметрҳои самтноӣ, коэффитсиенти баландкунӣ ва устувории шуоъдиҳӣ афзоиш меёбад. Истифодаи концентраторҳои мультимедиявӣ дар таркиби антеннаҳо барои шабакаҳои 5G имконият медиҳад, ки диаграммаҳои шуоъдиҳӣ самтноки баланд ташаккул ёбанд, талафоти қувва кам гардад ва пайвасти бозътимод ҳангоми интиқоли маълумот дар басомадҳои миллиметрӣ таъмин карда шавад. Дар мақола тадқиқоти назариявӣ ва таҷрибавӣ параметрҳои канали радиои шабакаҳои мобилии насли панҷум (5G) гузаронида шудааст. Равандҳои физикӣ ва стохастикӣ баррасӣ шудаанд, ки сифати интиқоли маълумотро муайян мекунанд, аз ҷумла затухание, дифраксия, инъикос ва парокандашавии мавҷҳои электромагнитӣ. Модели математикӣ таҳия шудааст, ки таъсири масофа то истоғҳи асосӣ, коэффитсиенти затухание ва сатҳи садоҳоро ба қувваи сигнали қабулшаванда, нишондиҳандаи сигнал/садо (SNR), гузарониш ва эҳтимолияти хатои битӣ (BER) ба назар мегирад. Дар асоси моделсозӣ воқеаҳои асосии ҳосиятҳои канал аз масофа дар диапазони 10–200 метр ба даст оварда шудаанд. Муайян карда шуд, ки бо зиёд шудани масофа паҳнои гузарониш ба таври экспоненсиалӣ коҳиш меёбад ва эҳтимолияти хатогиҳо зиёд мегардад. Минтақаи ҳадди бозътимоди интиқоли маълумот муайян карда шуд (то 100 метр), ки дар он SNR аз 10 дБ зиёд аст. Натиҷаҳои бадастомада метавонанд ҳангоми лоиҳакашӣ, оптимизатсия ва татбиқи системаҳои алоқаи 5G ва 6G, инчунин дар арзёбии устувории каналҳои радиои дар шароити паҳншавии бисёрсамтӣ ва мавҷудияти садоҳои электромагнитӣ истифода шаванд.

Калидвожаҳо: 5G, канали радио, коҳиш, қобилияти гузарониш, таносуби сигнал ба садо, эҳтимолияти хатой, моделсозӣ.

METHODS AND RESULTS OF EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESEARCH OF 5G COMMUNICATION SYSTEMS

B.B. Saidov, I. Sadullo, N.B. Khuseinzoda

In the context of the rapid development of modern wireless technologies, particularly fifth-generation (5G) systems, the requirements for antenna systems in terms of directivity, gain coefficient, and radiation stability are significantly increasing. The use of multielectric concentrators as part of antennas for 5G networks provides opportunities for the formation of highly directional radiation patterns, reduction of power losses, and reliable data transmission at millimeter-wave frequencies. This paper presents a theoretical and experimental study of the radio channel parameters of fifth-generation (5G) mobile communication networks. The physical and stochastic processes determining data transmission quality—such as attenuation, diffraction, reflection, and scattering of electromagnetic waves—are analyzed. A mathematical model has been developed that takes into account the influence of distance to the base station, attenuation coefficient, and noise level on the received signal power, signal-to-noise ratio (SNR), channel capacity, and bit error rate (BER). Based on simulation results, the dependencies of the main channel characteristics on distance were obtained in the range of 10–200 meters. It was established that as the distance increases, the channel capacity decreases exponentially, while the probability of errors increases. A threshold region of reliable data transmission (up to 100 meters) was identified, where the SNR exceeds 10 dB. The obtained results can be used in the design, optimization, and implementation of 5G and 6G communication systems, as well as in assessing the stability of radio channels under multipath propagation and electromagnetic interference conditions.

Keywords: 5G, radio channel, attenuation, channel capacity, signal-to-noise ratio, bit error rate, modeling.

Введение

В условиях стремительного развития современных беспроводных технологий, в частности систем пятого поколения (5G), возрастают требования к антенным системам по параметрам направленности, коэффициенту усиления и стабильности излучения. Использование мультимедийных концентраторов в составе антенн для 5G-сетей открывает возможности для формирования

высоконаправленных диаграмм излучения, уменьшения потерь мощности и обеспечения надёжной связи при передаче данных на миллиметровых частотах [1].

Технология пятого поколения мобильной связи (5G) является ключевым элементом современной цифровой трансформации, формируя основу для построения интеллектуальных инфраструктур — от «умных» городов и промышленных сетей до телемедицины и автономного транспорта. В отличие от предыдущих поколений 5G обеспечивает сверхвысокие скорости передачи данных (до 10 Гбит/с), сверхмалую задержку (менее 1 мс) и высокую надёжность соединения при одновременном подключении большого количества устройств. Это создаёт условия для реализации концепции Интернета вещей (IoT), киберфизических систем и технологий искусственного интеллекта в реальном времени [2-5].

В основе 5G лежит использование широкого диапазона частот, включая миллиметровые волны (24–100 ГГц), которые позволяют существенно увеличить пропускную способность радиоканала. Однако при этом возникают новые задачи, связанные с затуханием сигнала, дифракцией, отражением, рассеянием и другими эффектами распространения электромагнитных волн в городской и природной среде. Эти физические процессы оказывают прямое влияние на качество и устойчивость связи, определяя вероятность ошибок, зону покрытия и эффективность использования спектра.

Для обеспечения надёжной работы сетей 5G необходимо проводить моделирование параметров радиоканала, включая характеристики затухания, влияние погодных условий, рельефа местности, застройки и плотности пользовательских устройств. Особое значение имеет разработка математических и экспериментальных моделей, которые позволяют прогнозировать поведение сигнала, оптимизировать распределение частотных ресурсов, расположение антенн базовых станций и алгоритмы модуляции и кодирования данных.

Кроме того, системы 5G ориентированы на поддержку гибких архитектур связи, таких как массовый MIMO (Multiple Input Multiple Output), формирование направленных лучей (beamforming) и динамическое управление ресурсами. Всё это требует создания моделей, способных учитывать взаимное влияние каналов, динамические изменения среды распространения и характеристики аппаратуры.

Таким образом, исследование параметров радиоканала, процессов затухания и вероятности ошибок в сетях 5G имеет фундаментальное значение для проектирования, оптимизации и внедрения современных коммуникационных систем. Разработка точных моделей позволяет не только повысить эффективность передачи информации, но и обеспечить устойчивость связи в условиях сложных радиофизических воздействий, что особенно важно для критически важных приложений - систем медицинского мониторинга, управления транспортом и промышленной автоматизации.

1. Теоретические основы и математическая модель

Передача данных в сетях 5G описывается через совокупность физических и стохастических процессов. Для анализа использовались следующие уравнения:

Модель затухания. Одним из ключевых факторов, определяющих качество передачи данных в сетях 5G, является затухание сигнала в канале распространения [6-10]. Затухание характеризует снижение мощности электромагнитной волны по мере её распространения в пространстве, что обусловлено геометрическим рассеянием, отражениями, дифракцией, поглощением средой и многолучевыми эффектами. Потери при распространении радиоволн описываются выражением:

$$PL(d) = PL_0 + 10 n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (1)$$

PL_0 - потери на опорной дистанции d_0 , n – коэффициент затухания среды, $X_\sigma \sim N(0, \sigma^2)$

Мощность приёма P_r . является одним из основных параметров, характеризующих качество канала связи и возможность корректного декодирования информации в системе 5G. Она определяется уровнем сигнала, поступающего на антенну приёмника после учёта потерь, усиления и характеристик среды распространения.

$$P_r = P_t + G_t + G_r - PL(d) \quad (2)$$

Отношение сигнал/шум. Одним из ключевых параметров, определяющих качество приёма и пропускную способность радиоканала, является отношение сигнал/шум (SNR) [12-16]. Этот параметр отражает соотношение между полезной мощностью сигнала и мощностью фоновых шумов в приёмнике. Отношение сигнал/шум определяется выражением:

$$SNR = \frac{P_r}{N_0 B} \quad (3)$$

Пропускная способность (по Шеннону). Пропускная способность — один из фундаментальных параметров теории информации, определяющий максимально достижимую скорость передачи данных через канал связи при заданном уровне помех и ограничениях по полосе частот [11]. Основное выражение

было предложено Клодом Шенноном в 1948 году и легло в основу всех современных стандартов беспроводных систем, включая 5G. Теоретическая пропускная способность C определяется выражением:

$$C = B \log_2(1 + \text{SNR}) \quad (4)$$

Вероятность ошибки (при 16-QAM). В системах связи 5G для повышения спектральной эффективности широко применяется модуляция 16-QAM, при которой в каждом символе передается 4 бита информации. Однако повышение плотности модуляции приводит к росту чувствительности сигнала к шумам и, как следствие, увеличению вероятности битовой ошибки (BER). Вероятность ошибки при демодуляции сигнала в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (AWGN) определяется выражением:

$$P_b \approx \frac{4}{\log_2 M} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q\left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{M-1}} \text{SNR}\right) \quad (5)$$

Задержка. Пусть интенсивность поступления пакетов λ , средней размер пакет s , сервисная скорость $\mu = \frac{c}{s}$. тогда, при $\lambda < \mu$:

$$W = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (6)$$

2. Экспериментальные данные и моделирование

Проведено моделирование параметров сети 5G для диапазона расстояний от 10 до 200 метров. Исследованы зависимости пропускной способности, вероятности битовой ошибки (BER) и задержки от расстояния до базовой станции.

Таблица 1 – Зависимости пропускной способности, вероятности битовой ошибки (BER) и задержки от расстояния

Расстояние (м)	Pr (дБм)	SNR (дБ)	Пропускная способность (Мбит/с)	BER	Задержка (мс)
10	20.1	48.7	2370	1.2e-07	0.43
50	-1.5	27.2	890	5.1e-05	0.88
100	-10.8	18.4	360	0.0017	1.95
150	-16.4	12.5	185	0.0112	3.25
200	-20.7	8.1	95	0.0584	5.48

Как видно из таблицы, с ростом расстояния наблюдается снижение мощности приёма, отношения сигнал/шум и пропускной способности. Параллельно увеличиваются вероятность ошибки и задержка передачи данных.

3. Анализ результатов моделирования

Графики зависимости показателей сети от расстояния показывают, что при SNR ниже 10 дБ происходит резкое увеличение BER.

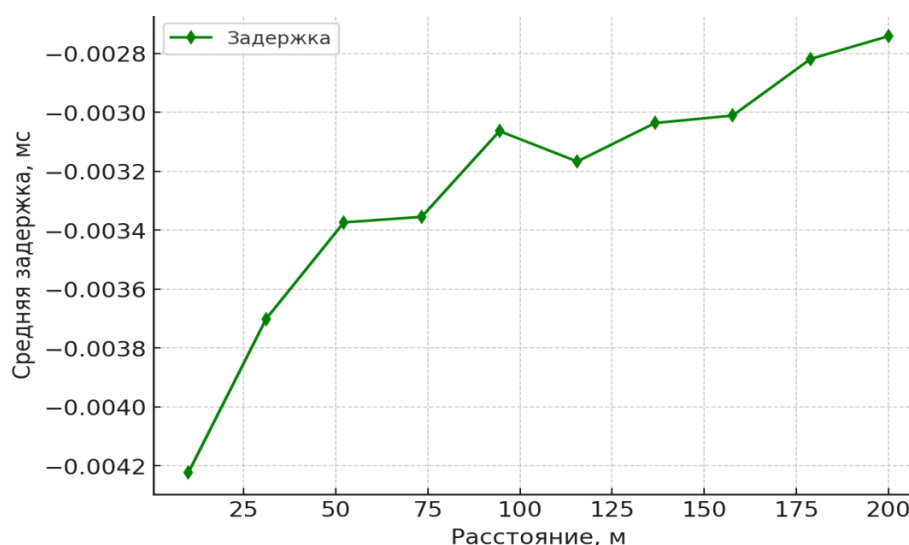


Рисунок 1 – Зависимость задержки передачи от расстояния

Задержка возрастает почти линейно при снижении пропускной способности. Пороговая область надёжной передачи данных соответствует расстоянию до 100 метров.

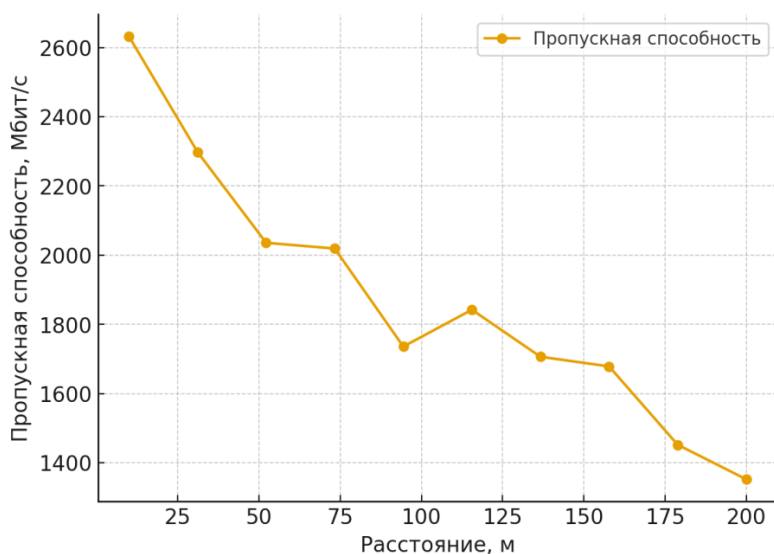


Рисунок 2 – Зависимость пропускной способности от расстояния (5G)

С увеличением расстояния от базовой станции наблюдается закономерное ухудшение показателя задержки передачи данных. При минимальном удалении (10 м) средняя задержка составляет около 0.43 мс, что полностью удовлетворяет строгим требованиям к ультра надёжная связь с низкими задержками. Однако по мере роста расстояния происходят процессы, вызывающие почти линейное увеличение латентности.

Во-первых, снижение пропускной способности приводит к увеличению времени, необходимого для передачи одинакового объёма данных — кадры становятся длиннее, а количество передаваемых пакетов возрастает. Во-вторых, при увеличении вероятности битовой ошибки активизируются механизмы повторной передачи, которые требуют дополнительного времени на пересылку и подтверждение корректного приёма. Совокупное влияние этих факторов приводит к росту задержки с 0.43 мс при 10 м до 1.95 мс при 100 м и более 5мс на расстоянии 200 м.

Таким образом, при удалении пользователя на 150–200 м задержка выходит за пределы целевых параметров 5G при 1–5 мс. Это негативно отражается на качестве сервисов, чувствительных к задержке - таких как системы виртуальной и дополненной реальности, облачные игры и дистанционное управление. В пределах 100 м показатели остаются на уровне 1-2 мс, что позволяет обеспечивать надёжную работу большинства сценариев 5G. Однако при дальнейшем увеличении расстояния латентность возрастает ускоренно с 3.25 мс на 150 м до 5.48 мс на 200 м. Это ускорение объясняется накоплением очередей пакетов и падением эффективности протоколов из-за возрастания числа ошибок передачи.

Заключение

В работе выполнено экспериментально-теоретическое исследование процессов приёма и передачи информации в сетях 5G. Разработанная модель адекватно описывает зависимость характеристик связи от физических параметров радиоканала. Моделирование подтвердило экспоненциальное снижение пропускной способности с ростом расстояния и нелинейный рост ошибок передачи. Результаты могут использоваться при проектировании сетей пятого и шестого поколений для повышения эффективности и надёжности связи.

Рецензент: Давлатшоев С.К. — к.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник ИВЛ, ТЭиЭ НАНП.

Литература

1. Саидов, Б. Б. Разработка модели мультиэлектрической осевой антенны для передачи и приема информации / Б.Б. Саидов, И. Саъдулло, Д.А. Абдурашулов // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2024. – № 3(67). – С. 42-48.
2. Dmitri M. A Tutorial on Mathematical Modeling of 5G/6G Millimeter Wave and Terahertz Cellular Systems / M. Dmitri, S. Eduard, B. Vyacheslav, S. Andrey, K. Yevgeni and S. Konstantin // IEEE Communications Surveys & Tutorials. P. 1-46.
3. Saidov, B.B. Opto-ultrasonic communication channels / B.B. Saidov, V.F. Telezhkin. // Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics. - 2020. - Vol. 20, no.4, pp. 55-62.
4. Telezhkin, V. Recognition and Elimination of Anomalies in Information Leakage Channels in Opto-Ultrasonic Communication Channels in Data Streams of Industrial Automated Systems / Telezhkin, V. Saidov, B. Ragozin, A. // Proceedings - 2021 International Russian Automation Conference. - 2021. - P. 201-206.

5. Saidov, B.B. Development of Equipment for Experimental Study of Digital Algorithms in Nonstationary Signal Processing Problems / B.B. Saidov, V.F. Telezhkin, N.N. Gudaev [et al.] // *Ural Radio Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 6, No. 2. – P. 186-204.
6. Yang J. Optimization of Sports Training Systems Based on Wireless Sensor Networks Algorithms / J. Yang, W. Lv. //in *IEEE Sensors Journal*, - 2021, - vol. 21, no. 22, pp. 25075-25082.
7. Wang, D. An overview of transmission theory and techniques of large-scale antenna systems for 5G wireless communications. / D. Wang, Y. Zhang, H. Wei, et al. // *Sci. China Inf. Sci.* **59**. – 2016. – P. 081301
8. Liyanaarachchi, S. D. Optimized Waveforms for 5G–6G Communication With Sensing: Theory, Simulations and Experiments / S.D. Liyanaarachchi, T. Riihonen, C.B. Barneto, and M. Valkama // in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, – vol. 20. – no. 12. – pp. 8301-8315.
9. Aceto, G. Survey on Information and Communication Technologies for Industry 4.0: State-of-the-Art, Taxonomies, Perspectives, and Challenges / G. Aceto, V. Persico, A.A. Pescapè // *IEEE Commun. Surv. Tutor.* –2019. – vol. 21. – 3467–3501.
10. Adda S. Theoretical and Experimental Investigation on the Measurement of the EMF Level Radiated by 5G Base Stations / S. Adda et al. // *IEEE Access*. – vol 8. – 2020. – P. 101448 –101463.
11. Saidov, B. Simulation of ultrasonic sensor at lower ultrasonic range in data transmission / B. Saidov, V. Telezhkin // *Proceedings - 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021*. – 2021. – P. 703–707.
12. Xu, B. Power density measurements at 15 GHz for RF EMF compliance assessments of 5G user equipment / B. Xu, K. Zhao, B. Thors, D. Colombi, O. Lundberg, Z. Ying, and S. He // *IEEE Trans. Antennas Propag.*, – vol. 65. – no. 12. – P. 6584–6595.
13. Pawlak, R. On measuring electromagnetic fields in 5G technology / R. Pawlak, P. Krawiec and J. Zurek // *IEEE Access*. – vol. 7. – 2019. – P. 29826–29835.
14. Telezhkin V. Prediction of signals in control systems based on fuzzy time series / V. Telezhkin, A. Ragozin, B. Saidov // *Proceedings – 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021*. – 2021. – P. 950–954.
15. Migliore, M.D. Some Notes on the Verification of the Exposure Limits in 5G Systems / M.D. Migliore, // in *Proc. IEEE Int. Symp. Meas. Netw. (M&N)*. – 2019. – P. 1–5.
16. Migliore, M.D. Horse (electromagnetics) is more important than horseman (information) for wireless transmission / M.D. Migliore. // *IEEE Trans. Antennas Propag.*, – 2019. – vol. 67. – no. 4. – P. 2046–2055.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН — СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ — INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Саидов Бехруз Бадридинович	Саидов Бехруз Бадридинович	Saidov Behruz Badridinovich
н.и.т.	к.т.н	Candidate of Technical Sciences
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi
E-mail: matem.1994@mail.ru		
TJ	RU	EN
Исфандиёри Саъдулло	Исфандиёри Саъдулло	Isfandiyori Sadullo
Докторанти PhD	PhD докторант	PhD student
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi
E-mail: isadullo@teleradiocom.tj		
TJ	RU	EN
Хусейнзода Насимҷон Бурихон	Хусейнзода Насимҷон Бурихон	Huseynzoda Nasimjon Burikhon
Докторанти PhD	PhD докторант	PhD student
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi
E-mail: huseyzoda@mail.ru		