

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

DOI: 10.18137/RNU.V9I187.21.04.P.003

УДК 09.04.01

Д.В. Верега, Г.В. Жиба, С.В. Сай

ОЦЕНКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА LTE С УЧЕТОМ ЛИСТВЕННОГО ЛЕСА

При строительстве новых базовых станций на сложных по рельефу загородных трассах, отдаленных и труднодоступных населенных пунктов Хабаровского края необходимо учитывать ослабление сигнала за счет лесных массивов. На примере уже существующего объекта связи проводится оценка распространения радиоволн для технологии LTE в диапазоне 1800...2600 МГц. Проведен расчет затухания для трассы со сложным рельефом с учетом лиственного леса, его сравнение с фактическими показателями. Для решения поставленных задач используются методы математического моделирования, вычислительной математики, системного анализа, методы программирования и натурального экспериментального исследования.

Ключевые слова: LTE, универсальная модель, модель one woodland terminal, многолучевая модель, модель knife-edge.

D.V. Vegeera, G.V. Zhiba, S.V. Sai

EVALUATION OF LTE SIGNAL DISTRIBUTION TAKING INTO ACCOUNT DECIDUOUS FOREST

When constructing new base stations on suburban routes with difficult terrain, remote and inaccessible settlements of the Khabarovsk Territory, it is necessary to take into account the signal attenuation due to forests. Therefore, using the example of an existing communication facility, an assessment of the propagation of radio waves for LTE technology in the range of 1800...2600 MHz is carried out. The calculation of attenuation for a route with a difficult relief, taking into account deciduous forest, is carried out and is compared with the actual indicators. To solve the set tasks, methods of mathematical modeling, computational mathematics, system analysis, programming methods and field experimental research are used.

Keywords: LTE, universal model, one woodland terminal model, multi-beam model, knife-edge model.

Введение

Лесная среда является одним из основных факторов, затрудняющих прохождение радиоволн практически во всех диапазонах частот. Создание современной инфраструктуры передачи голоса и данных на сложных по рельефу загородных трассах, отдаленных и труднодоступных населенных пунктов Хабаровского края является одной из важнейших проблем. Одним из возможных вариантов решения этой проблемы на таких территориях – применение малых земных станций спутниковой связи (далее – МЗССС) для организации канала связи и предоставление услуг связи с помощью стандартной базовой станции (далее – БС) сотовой связи.

В статье рассмотрены результаты расчетов параметров распространения радиоволн стандарта LTE-1800 и LTE-2600 на сложной по рельефу загородной трассе Хабаровского края. При планировании новых базовых станций важным вопросом является выбор диа-

Веера Денис Владимирович

старший преподаватель кафедры вычислительной техники. Тихоокеанский государственный университет, город Хабаровск. Сфера научных интересов: телекоммуникационные системы, системный анализ, математическое моделирование. Автор более 20 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: vegera79@mail.ru

Жиба Григорий Вячеславович

инженер первой категории. Филиал Главного радиочастотного центра в Дальневосточном федеральном округе, город Хабаровск. Сфера научных интересов: телекоммуникационные системы, системный анализ, математическое моделирование, программные комплексы, компьютерное моделирование, программирование. Автор более 10 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: grisha2160@mail.ru

Сай Сергей Владимирович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной техники. Тихоокеанский государственный университет, город Хабаровск. Сфера научных интересов: методы распознавания и анализа изображений, методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов, телекоммуникационные системы, кодирование данных. Автор более 100 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: sai1111@rambler.ru

пазона частот для получения качественного покрытия. На примере уже существующего объекта связи рассматриваются методики расчета затухания и дальности распространения радиосигнала LTE-1800 с учетом лесных массивов, которые сравниваются с фактическими показателями. На основании полученных результатов производится выбор методики, наиболее совпадающей с фактическими показателями, и предварительного определяются подходящие координаты мест установки новых базовых станций. Выбранные методы используются для оценки затухания и зоны покрытия LTE-2600 и сравниваются с результатами LTE-1800. Для оценивания параметров используется метод имитационного моделирования. В качестве среды разработки имитационной модели выбран программный пакет Matlab.

Технология LTE

В отличие от GSM и UMTS, которые стали стандартами для 2G- и 3G-связи, технология LTE может использовать более широкий спектр частот. Помимо этого для улучшения качества сети возможно расширение спектра за счет использования агрегации частот или совместного использования полос частот, выделенных отдельными операторами [2–4; 10]. В России с учетом существующих ограничений для сотовых операторов выделено 5 частотных диапазонов стандарта LTE: 800; 900; 1800; 2100 и 2600 МГц. Размеры ширины канала для систем стандарта LTE стандартизованы 3GPP и включают в себя набор из шести значений: 1,4; 3; 5; 10; 15 и 20 МГц. Преимущества технологии позволяют также внедрить поддержку NB-IoT и VoLTE.

Оценка распространения сигнала LTE с учетом лиственного леса

Диапазон 800 МГц в отличие от других диапазонов имеет самый большой радиус покрытия радиосигнала, но низкие скорости передачи данных. Используется для обеспечения широкого покрытия в больших и малонаселенных городах. Ширина полосы – до 5 МГц. Преимущества покрытия позволяют также внедрить поддержку NB-IoT и VoLTE.

Диапазон 900 МГц ранее распределялся под использование GSM и UMTS. Переиспользование частот для развития технологии LTE стало возможным благодаря решению Государственной комиссии по радиочастотам (далее – ГКРЧ). LTE-900 имеет высокую проникающую способность радиосигнала. Ширина полосы – до 5 МГц. Большой радиус покрытия и возможность переиспользования спектра частот GSM-900 позволяет обеспечивать сеть LTE небольшие города и населенные пункты в сельской местности, при этом затрачивается минимум средств. Может использоваться как альтернатива LTE-800.

Диапазон 1800 МГц первоначально предназначался для систем GSM-1800; с 2011 года по решению ГКРЧ появилось возможность использовать эти частоты для развертывания систем LTE. Эта частота является золотой серединой между частотами 800 и 2600 МГц, предоставляющей хороший радиус покрытия, скорость передачи данных и возможность обслуживания большого количества абонентов, которые будут потреблять больше ресурсов. Ширина полосы – до 15 МГц, что дает возможность разворачивать мультистандартные базовые станции системы радиодоступа с одновременной поддержкой LTE и GSM.

Диапазон 2100 МГц ранее распределялся под использование сетями UMTS. Переиспользование частот стало возможным после принятого в июле 2017 года решения ГКРЧ. Использование данного диапазона для технологии LTE позволяет обеспечить высокоскоростным мобильным интернетом территории удаленных российских деревень и сел, уже использующих технологию UMTS. Ширина канала – до 15 МГц, что дает возможность разворачивать мультистандартные базовые станции системы радиодоступа с одновременной поддержкой LTE и UMTS. Является хорошей альтернативой LTE-2600 за счет большего радиуса покрытия.

Диапазон 2600 МГц является самым быстрым и распространенным среди LTE. Подходит для многолюдных районов, но обеспечивает малый радиус радиопокрытия. Ширина каналов – до 20 МГц.

Методика проведения экспериментов

Для оценки влияния лесных массивов на распространение радиосигнала существуют различные виды моделей распространения радиоволн, которые учитывают электродинамические свойства растительности различных типов, а также другие факторы, влияющие на распространение в условиях неоднородной растительности. Для оценивания параметров используется метод имитационного моделирования. В качестве среды разработки имитационной модели выбран программный пакет Matlab. Разработанная программа позволяет выбрать модель распространения радиоволн и по заданным параметрам вычислить затухание и дальность распространения сигнала. Частотный диапазон выбранных моделей позволяет сделать анализ для LTE-800, LTE-900, LTE-1800, LTE-2100 и LTE-2600.

На Рисунке 1 представлен интерфейс разработанной программы.

Исходя из сложности трассы рассматриваются следующие методы: универсальная модель (далее – УМ) [5; 11], модель one woodland terminal (далее – OWTM) [5; 11], многолучевая модель (далее – ММ) и knife-edge (далее – КЕ) модели [6–9; 11]. Для оценки эффективности методов результаты сравниваются с фактическим покрытием LTE-1800. Лес лиственный. Измерения проводились летом 2021 года, в движении для выяснения ста-

бильности сигнала, в конкретных точках – на внушительном отдалении от базовой станции. Расстояние мест контрольных измерений было выбрано таким образом, чтобы измерительный комплекс находился в зоне излучения антенны. В состав измерительного оборудования входили: измерительный комплекс для анализа радиопокрытия в сетях LTE; персональный компьютер со специальным программным обеспечением для мониторинга и контроля работы; 4 сотовых телефона с поддержкой LTE фирмы Huawei, LG, Samsung и Apple для тестирования работы.

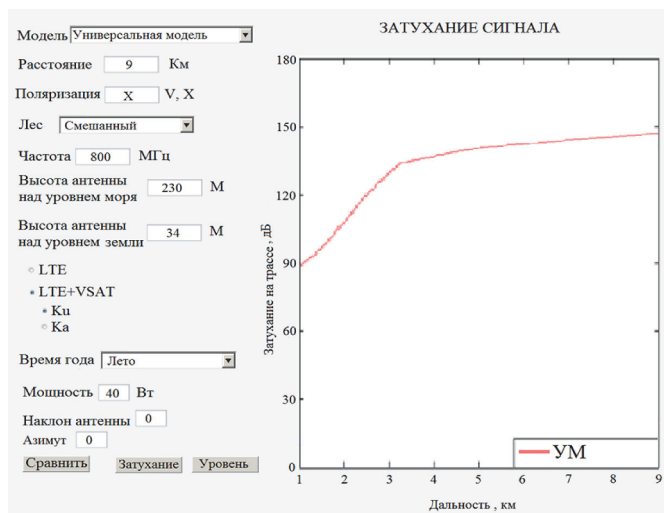


Рисунок 1. Интерфейс разработанной программы

На Рисунке 2 представлен участок трассы, на котором проводились эксперименты, с указанием рельефа местности.

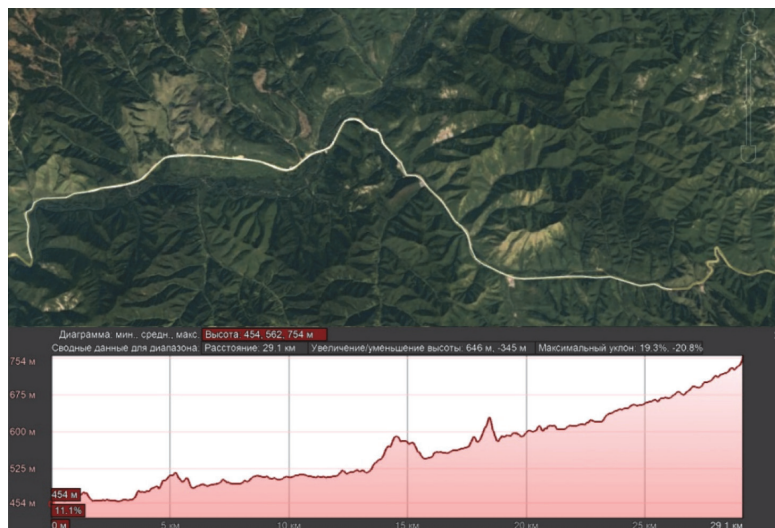


Рисунок 2. Участок трассы, на котором проводились эксперименты, с указанием рельефа местности

Оценка распространения сигнала LTE с учетом лиственного леса

Как видно по Рисунку 2, трасса имеет сложный рельеф, и из-за сильного перепада высот удастся обеспечить сигналом связи лишь отдельный участок. За счет отражения от природных объектов при распространении сигнала сектора 1 покрытие трассы составляет 16,9 км. На пути распространения сигнала в секторе 2 встречается подъем, и прямую видимость ограничивает сопка, вследствие чего покрытие трассы составляет 4 км. Также необходимо учитывать, что на более дальних расстояниях телефон способен осуществлять скачивание и передачу данных, но возможно пропадание сигнала. В качестве источника сигнала использовалась двухсекторная антенна фирмы Kathrein: сектор 1 – 80 градусов и сектор 2 – 160 градусов. Для электроснабжения использовалась схема альтернативной энергетики [1]. Для анализа дальности распространения сигнала в Таблице 1 показаны значения уровня сигнала, которые предложено считать соответствующими очень плохому, плохому, хорошему и очень хорошему качеству сигнала.

Таблица 1

Значения уровня сигнала

Качество сигнала	Значение уровня сигнала, дБм
Очень хорошее	≥ -80
Хорошее	$-80 \dots -90$
Плохое	$-90 \dots -100$
Очень плохое	≤ -100

Результаты моделирования

На Рисунок 3 показан общий график затухания радиосигнала на частоте 1800 МГц сектора 1 (С-1) и сектора 2 (С-2) для четырех моделей.

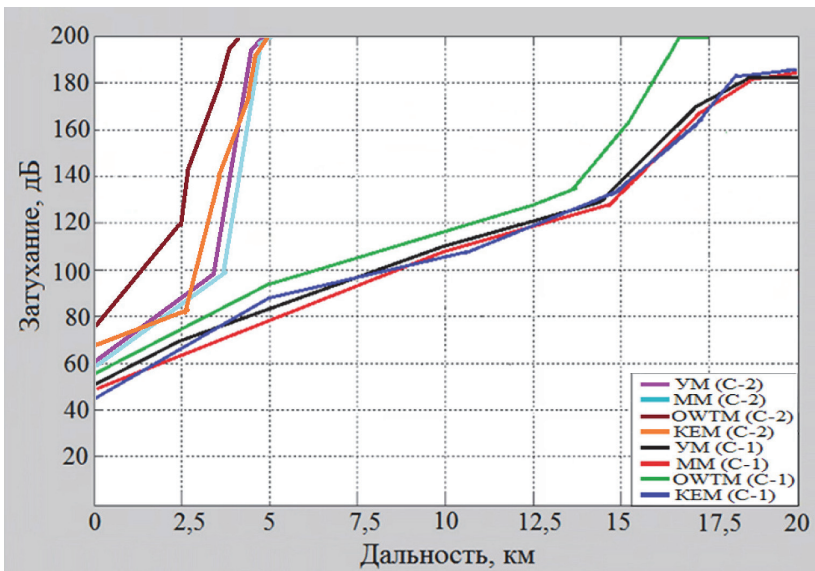


Рисунок 3. Общий график затухания сигнала на частоте 1800 МГц для сектора 1 и сектора 2

На Рисунке 4 показан общий график прогнозирования уровня радиосигнала на частоте 1800 МГц сектора 1 и сектора 2 для четырех моделей.

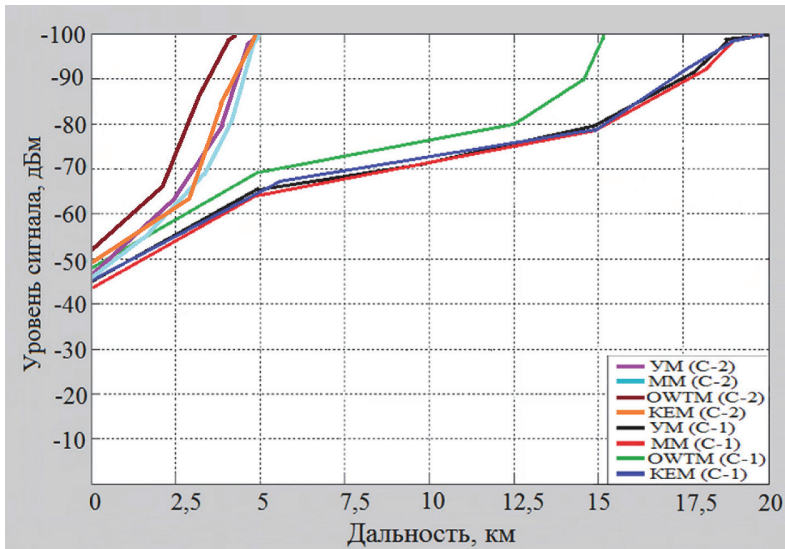


Рисунок 4. Общий график уровня радиосигнала на частоте 1800 МГц для сектора 1 и сектора 2, рассчитанный выбранными методами

Так как на пути сектора 2 встречается помеха в виде большой сопки, полученные расчеты для этого сектора не учитываются при выборе подходящей модели, потому что с увеличением частоты зона покрытия не изменится.

Результаты моделирования и экспериментальные данные на частоте 1800 МГц для сектора 1 показаны на Рисунке 5.

Результаты распространения сигнала LTE-1800 в зависимости от модели для лиственного леса, полученные с помощью моделирования и экспериментальным путем, показаны в Таблице 2.

Таблица 2

Результаты распространения сигнала в зависимости от модели для лиственного леса

Модель	Дальность распространения сигнала LTE-1800			
	Теория		Практика	
	Сектор 1, км	Сектор 2, км	Сектор 1, км	Сектор 2, км
Универсальная	19,9	5	16,9	4
Многолучевая	19,7	5		
One woodland terminal	15,1	4,3		
Knife-edge	19,9	5		

На основе полученных данных можно сделать следующие выводы. Так как на пути сектора 2 встречается помеха в виде большой сопки, полученные расчеты для этого сектора не учитываются при выборе подходящей модели, так как с увеличением частоты зона по-

Оценка распространения сигнала LTE с учетом лиственного леса

крытия не изменится. Модель one woodland прогнозирует хороший уровень сигнала до 14,7 км и с возможным пропаданием до 15,1 км. Данная модель подходит не для всех условий, но, не смотря на это, позволяет учитывать, на каком километре будет неустойчивый сигнал, что тоже важно при планировании новых базовых станций. Многолучевая, knife-edge и универсальная модели показывают похожие результаты и прогнозируют хороший уровень сигнала до 17,5 км с возможным пропаданием до 19,9 км. Однако точность результатов математической knife-edge и многолучевой моделей зависит от входных данных, поэтому без учета каких-либо параметров рассматриваемой местности можно получить некорректные результаты.

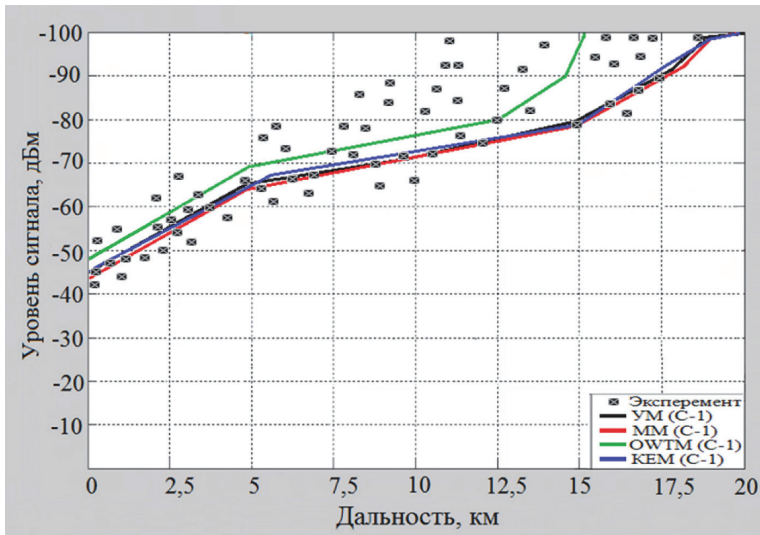


Рисунок 5. Результаты моделирования и экспериментальные данные на частоте 1800 МГц для сектора 1

Основываясь на практических показателях покрытия, полученных в результате экспериментальных исследований на реальном участке автодороги Лидога – Ванино в Хабаровском крае, для дальнейшего анализа на территории загородных трасс края рекомендуется использовать универсальную и многолучевую модели. В связи с этим для анализа LTE-2600 будут использоваться именно эти модели.

Прогнозирование покрытия для LTE-2600

Для расчета дальности распространения радиосигнала LTE-2600 используются те же ключевые параметры, что и для LTE-1800.

Результаты затухания радиосигнала на частоте 2600 и 1800 МГц, рассчитанные при помощи универсальной и многолучевой моделей для сектора 1, показаны на Рисунке 6.

Результаты прогнозирования уровня радиосигнала на частоте 2600 и 1800 МГц, рассчитанные при помощи универсальной и многолучевой моделей для сектора 1, показаны на Рисунке 7.

Результаты распространения сигнала LTE для сектора 1 в зависимости от диапазона и модели для лиственного леса показаны в Таблице 3.

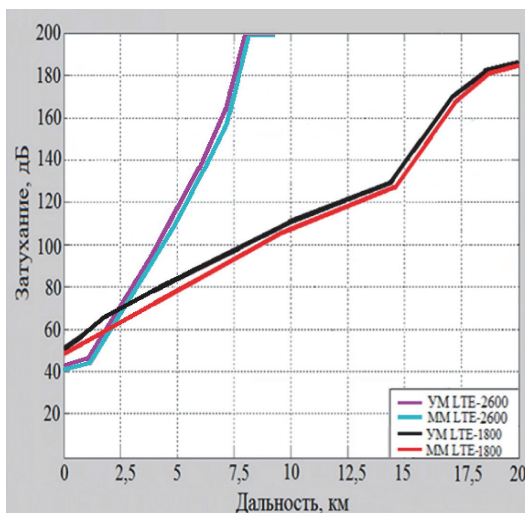


Рисунок 6. Результаты затухания радиосигнала на частоте 2600 и 1800 МГц, рассчитанные при помощи универсальной и многолучевой моделей для сектора 1

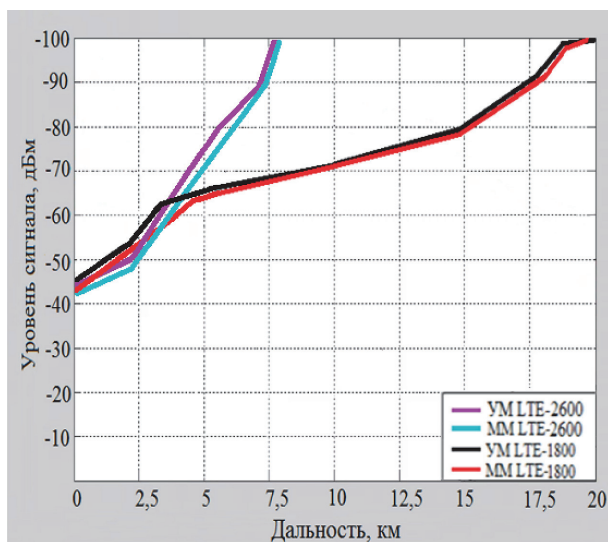


Рисунок 7. Результаты расчетов уровня радиосигнала на частоте 2600 и 1800 МГц, рассчитанные при помощи универсальной и многолучевой моделей для сектора 1

Таблица 3

Результаты распространения сигнала LTE для сектора 1 в зависимости от диапазона и модели для лиственного леса

Модель	Дальность распространения сигнала LTE	
	LTE-2600, км	LTE-1800, км
Универсальная	7,7	19,9
Многолучевая	7,8	19,7

Оценка распространения сигнала LTE с учетом лиственного леса

Результаты проведенных измерений показывают, что при использовании технологии LTE-1800 можно достигнуть большего покрытия местности со сложным рельефом, чем при использовании LTE-2600. Если в приоритете высокая скорость передачи данных, то для этого подойдет технология LTE-2600; если перед оператором стоит цель по обеспечению территории хорошим покрытием, то необходимо использовать LTE-1800. Помимо этого для улучшения качества сети возможно расширение спектра за счет использования агрегации частот или совместного использования полос частот, выделенных отдельными операторами.

Заключение

В работе проведен анализ распространения радиоволн на сложной по рельефу автомобильной трассе Лидога – Ванино Хабаровского края, окруженной лиственным лесом. Исходя из сложности трассы рассматриваются следующие методы для расчета дальности связи: универсальная, one woodland terminal, многолучевая и knife-edge модели. Полученные в работе результаты подтверждаются экспериментально. Анализ представленных методов показывает, что для дальнейшего использования при размещении базовых станций на территории загородных трасс Хабаровского края стандарта LTE рекомендуется использовать универсальную и многолучевую модели.

Анализ результатов распространения радиосигналов LTE показывает, что на сложных по рельефу загородных трассах для обеспечения максимально устойчивого покрытия необходимо использовать стандарт LTE-1800.

Предложенные методы, модели и технические решения позволяют учесть распространение радиоволн еще на этапе проектирования радиосистем и устройств связи для практической реализации современной инфраструктуры передачи голоса и данных на сложных по рельефу загородных трассах.

Литература

1. Вегера Д.В., Власов В.Н., Писаренко В.П., Терещенко В.Д. Использование альтернативной энергетики в системах энергоснабжения телекоммуникационного оборудования // Наука и технологии. 2018. № 1. С. 77–81.
2. Жиба Г.В., Захаров И.С., Смоляков А.А., Писаренко В.П. Исследование возможностей применимости стандарта LTE CAT.9 // Ученые заметки ТОГУ. 2017. Т. 8, № 2. С. 155–163.
3. Жиба Г.В., Захаров И.С., Смоляков А.А., Писаренко В.П., Шевцов А.Н. Исследование повышения скорости LTE-A с помощью агрегации частот // Информационные технологии XXI века: сб. науч. тр. Хабаровск, 2017. С. 451–460.
4. Жиба Г.В., Писаренко В.П., Захаров И.С., Шевцов А.Н. Анализ помехоустойчивости каналов связи LTE и WIMAX // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2017. № 3. С. 17–21.
5. Рекомендация МСЭ-RR.833-9. Ослабление сигналов растительностью. Женева, 2016. 31 с.
6. Balkhanov V.K., Advocate V.R., Bashkuev Yu.B. (2014) Average electrical characteristics of the «forest layer» and the height of the forest cover. *Journal of Technical Physics*, vol. 84, no. 8, pp. 132–136.
7. Li Y., Ling H. (2009) Numerical modeling and mechanism analysis of VHF wave propagation in forested environments using the equivalent slab model. *Progress in Electromag*, vol. 91, pp. 17–34.

8. Yeow Chong Daniel (2014) Modeling of radiowave propagation in a forested environment, p. 15.
9. Pathak P.H., Carluccio G., Albani M. (2013) The uniform geometrical theory of diffraction and some of its applications. IEEE Antennas and Propagation magazine, vol. 55, no. 4, pp. 41–69.
10. Zhiba G.V., Pisarenko V.P., Shevtsov A.N. (2018) Improve noise immunity of transfer messages by radio channel in cellular systems. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon, p. 8602932.
11. Zhiba G.V., Pisarenko V.P., Vegera D.V. (2020) Analysis of LTE signal propagation models in wooded areas for Khabarovs highways. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon, p. 9271104.

References

1. Vegera D.V., Vlasov V.N., Pisarenko V.P., Tereshchenko V.D. (2018) *Ispol'zovanie al'ternativnoj energetiki v sistemah energosnabzheniya telekommunikacionnogo oborudovaniya* [Use of alternative energy in power supply systems for telecommunication equipment]. *Nauka i tekhnologii*, no. 1, pp. 77–81 (in Russian).
2. Zhiba G.V., Zakharov I.S., Smolyakov A.A., Pisarenko V.P. (2017) *Issledovanie vozmozhnostei primenimosti standarta LTE CAT.9* [Investigation of the applicability of the LTE CAT.9 standard]. *Uchenye zametki TOGU*, vol. 8, no. 2, pp. 155–163 (in Russian).
3. Zhiba G.V., Zakharov I.S., Smolyakov A.A., Pisarenko V.P., Shevtsov A.N. (2017) *Issledovanie povysheniya skorosti LTE-A s pomoshch'yu agregatsii chastot* [Research of increasing the speed of LTE-A using frequency aggregation]. *Informatsionnye tekhnologii XXI veka: sb. nauch. tr., Khabarovsk*, pp. 451–460 (in Russian).
4. Zhiba G.V., Pisarenko V.P., Zakharov I.S., Shevtsov A.N. (2017) *Analiz pomekhoustoichivosti kanalov svyazi LTE i WIMAX* [Analysis of noise immunity of LTE and WIMAX communication channels]. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona*, no. 3, pp. 17–21 (in Russian).
5. *Rekomendatsiya MSE-R.P.833-9. Oslablenie signalov rastitel'nost'yu* [Recommendation ITU-R P.833-9. Attenuation of signals by vegetation]. Geneva, 2016, 31 p. (in Russian).
6. Balkhanov V.K., Advocate V.R., Bashkuev Yu.B. (2014) Average electrical characteristics of the «forest layer» and the height of the forest cover. *Journal of Technical Physics*, vol. 84, no. 8, pp. 132–136.
7. Li Y., Ling H. (2009) Numerical modeling and mechanism analysis of VHF wave propagation in forested environments using the equivalent slab model. *Progress in Electromag.*, vol. 91, pp. 17–34.
8. Yeow Chong Daniel (2014) Modeling of radiowave propagation in a forested environment, p. 15.
9. Pathak P.H., Carluccio G., Albani M. (2013) The uniform geometrical theory of diffraction and some of its applications. IEEE Antennas and Propagation magazine, vol. 55, no. 4, pp. 41–69.
10. Zhiba G.V., Pisarenko V.P., Shevtsov A.N. (2018) Improve noise immunity of transfer messages by radio channel in cellular systems. 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon, p. 8602932.
11. Zhiba G.V., Pisarenko V.P., Vegera D.V. (2020) Analysis of LTE signal propagation models in wooded areas for Khabarovs highways. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon, p. 9271104.