

УДК 621.371.3

Прогнозирование параметров распространения радиоволн в условиях городской застройки при использовании низко расположенных антенн

Тихомиров А.В.*, Омелянчук Е.В., Семенова А.Ю.***, Михайлов В.Ю.******

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», площадь Шокина, 1,
Москва, Зеленоград, 124498, Россия*

**e-mail: radiotav@yandex.ru*

***e-mail: omelia81@gmail.com*

****e-mail: semenova.anastasia.y@gmail.com*

*****e-mail: mikhvikt@gmail.com*

Аннотация

В статье рассматриваются модели распространения радиоволн в условиях городской застройки. Показано, что существующие модели не отвечают случаю низко расположенных антенн передатчика, что соответствует их применению для проектирования и планирования мобильных эпизодических сетей. На основе экспериментальных исследований на частоте 870 МГц, проведенных в г. Зеленограде, определены значения коэффициентов и предложена модификация Стэнфордской модели SUI для городской среды для случаев высоты подвеса передающей антенны до 10 м. Показано, что в городских условиях радиосигнал затухает пропорционально четвертой степени расстояния при высоте подвеса передающей антенны не менее 3 м.

Ключевые слова: распространение радиоволн, распространение в городских условиях, эмпирические модели, потери при распространении.

Введение

При проектировании наземных систем подвижной радиосвязи для работы в городских условиях, в том числе мобильных эпизодических сетей, необходимо учитывать влияние различных факторов распространения радиоволн на параметры принимаемого сигнала. В зависимости от типа и плотности городской застройки сигнал может включать прямую, отраженную, дифрагированную и преломленную составляющие [1-6]. При отсутствии априорных знаний о типе, размере и форме препятствий оценить потери на трассе можно на основе измерений. Эмпирическая оценка должна носить статистический характер и основываться на определении медианных значений потерь на трассе распространения.

Вследствие разнообразия рельефов и застройки, а также взаимного расположения приемопередающих устройств и, следовательно, сложности прогнозирования влияния тех или иных факторов на трассе распространения на затухание радиоволн, в настоящее время не существует универсальной модели для расчета потерь при распространении радиоволн в городских условиях. Применяемые для прогнозирования уровня сигнала в наземных системах подвижной радиосвязи модели могут быть использованы только для случая мобильных сетей с поднятыми антеннами базовых станций. В связи с растущей

популярностью городских беспроводных сетей (WMAN), подразумевающих большое количество мобильных ретрансляторов, а также в целях определения возможности организации кратковременного радиопокрытия при проведении спасательных работ или иных мероприятий, например, силами МЧС, [7, 8], целью настоящего исследования является прогнозирование параметров распространения радиоволн при низко расположенной антенне передатчика в городских условиях путем модификации существующих эмпирических моделей на основе экспериментальных данных. Полученная модель может быть использована не только для наземных служб, но и для планирования беспроводных сетей малого радиуса действия, использующих беспилотные летательные аппараты.

Модели распространения радиоволн в городских условиях

В большинстве случаев принято оценивать распространение радиоволн по модели «большого расстояния» [5, 9]; электромагнитное поле в этой модели описывается уравнением для свободного пространства с поправочными коэффициентами, которые учитывают рассеяние на многочисленных препятствиях при условии, что электромагнитное поле считается стационарным, монотонным и гладким. В соответствии с моделью «большого расстояния» построено большинство эмпирических моделей распространения радиоволн в городских условиях.

Одной из первых таких моделей, полученных при измерениях уровней радиосигнала в г. Токио, является модель Окамуры [10, 11]. Данная модель

применяется для расстояний между приемником и передатчиком от 1 до 100 км и частотного диапазона 150...3000 МГц и имеет вид:

$$L = L_{FS} + A(f, d) - H(h_t) - H(h_r) - C, \text{ дБ} \quad (1)$$

где L – общие потери при распространении; L_{FS} – затухание в свободном пространстве; $A(f, d)$ – затухание в городе относительно затухания в свободном пространстве при заданных высотах антенн, определяемые графическим способом в зависимости от частоты сигнала и расстояния между приемником и передатчиком; C – фактор затухания для различных типов местности, определяемый графически с учетом частоты; $H(h_t)$, $H(h_r)$ – коэффициенты высоты передающей и приемной антенн соответственно.

Для упрощения работы с моделью Окамуры была разработана модель Хаты для частот 150...1500 МГц, где вместо графических зависимостей составляющих потерь используются конечные формулы [12, 13]. Модель Хаты имеет следующий вид:

$$L = 69,55 + 26,16 \lg f - 13,82 \lg h_t - A(h_r) + (44,9 - 6,55 \lg h_t) \lg d, \text{ дБ} \quad (2)$$

где f – частота радиосигнала, МГц, d – дальность связи, км, h_t и h_r – высоты подъема передающей и приемной антенн соответственно, м, $A(h_r)$ – поправочный коэффициент, зависящий от типа местности и определяемый расчетным методом.

Для диапазона частот 1,5...2 ГГц используют модель COST231-Hata, которая является модификацией модели Хаты с измененными коэффициентами перед каждым слагаемым в выражении (2). Помимо этого возможно построение заказной

модели Хаты, где коэффициенты подбираются по результатам измерений, проведенных в конкретной местности.

Модель Уолфиша-Икегами – другая эмпирическая модель, применимая для оценки ослабления сигнала в малых сотах, – основана на представлении электромагнитного поля в точке приема как суммы когерентной и рассеянной составляющей [14-16]:

$$L = a_1 + a_2 + a_3, \quad \text{дБ} \quad (3)$$

где a_1 – ослабление когерентной волны для точки дифракции, a_2 – дополнительное ослабление когерентной волны, зависящее от угла дифракции, a_3 – дополнительное ослабление уровня сигнала за счет рассеянного компонента.

Составляющие a_1 , a_2 , a_3 определяются расчетным методом с учетом высот приемной и передающей антенн, расстояния между приемником и передатчиком, несущей частоты и параметров городской застройки.

Модель Stanford University Interim (SUI) была разработана для стандарта IEEE 802.16 (городские беспроводные вычислительные сети) [17]; потери по данной модели описываются по формуле:

$$L = L_{FS} + 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + s, \quad \text{дБ} \quad (4)$$

где d_0 – расстояние до точки отсчета, находящейся в дальней зоне, м, s – составляющая эффекта затенения, n – показатель ослабления сигнала, рассчитываемый по формуле:

$$n = a - b * h_t + \frac{c}{h_t}, \text{ дБ} \quad (5)$$

где коэффициенты a , b , c выбираются в зависимости от типа рельефа в соответствии с таблицей 1.

По аналогии с моделью Окамуры модель SUI рассматривает три типа рельефов:

- тип А – плотная городская застройка или естественный рельеф с большим количеством препятствий;
- тип В – пригородная зона с разновысотными постройками;
- тип С – сельская местность или естественная среда с малым количеством препятствий.

Таблица 1

Параметры модели SUI

Параметр	Значение для типа рельефа А	Значение для типа рельефа В	Значение для типа рельефа С
a	4,6	4,0	3,6
b	0,0075	0,0065	0,005
c	12,6	17,1	20,0

Рассмотренные модели распространения радиоволн имеют ограничения по применимости, которые приведены в таблице 2. Как видно из таблицы, данные модели подходят в первую очередь для сотовых систем связи, в которых передающая антенна расположена на базовой станции (БС), а приемная антенна на абонентской станции (АС). В большинстве случаев предполагается, что антенна БС

должна возвышаться над крышами соседних зданий. Стоит заметить, что в модели Уолфиша-Икегами высота подвеса передающей антенны, имеющая сравнительно малые величины, определяется относительно средней высоты городской застройки. Таким образом, ни одна из рассмотренных моделей не отвечает случаю низко расположенных передающих антенн.

Как показано на рисунках 1-2 штриховыми линиями, при уменьшении высоты передающей антенны вне границ области применения моделей Хаты и SUI потери на распространение радиосигнала резко увеличиваются, причем величины потерь не отражают реальные данные. Графики построены для рабочей частоты 870 МГц нелицензируемого диапазона частот, подходящей для обеих моделей и используемой при проведении эксперимента, описанного далее.

Таблица 2

Области применимости эмпирических моделей распространения радиоволн в городских условиях

Параметр	Модель Окамуры	Модель Хаты	Модель Уолфиша-Икегами	Модель SUI
Рабочая частота, МГц	150...2000	150...1500	800...2000	До 2000
Протяженность трассы, км	1...20	1...20	0,02...5	0,1...8
Высота антенны БС, м	30...400	30...200	4...50	10...80
Высота антенны АС, м	1...10	1...10	1...3	2...10

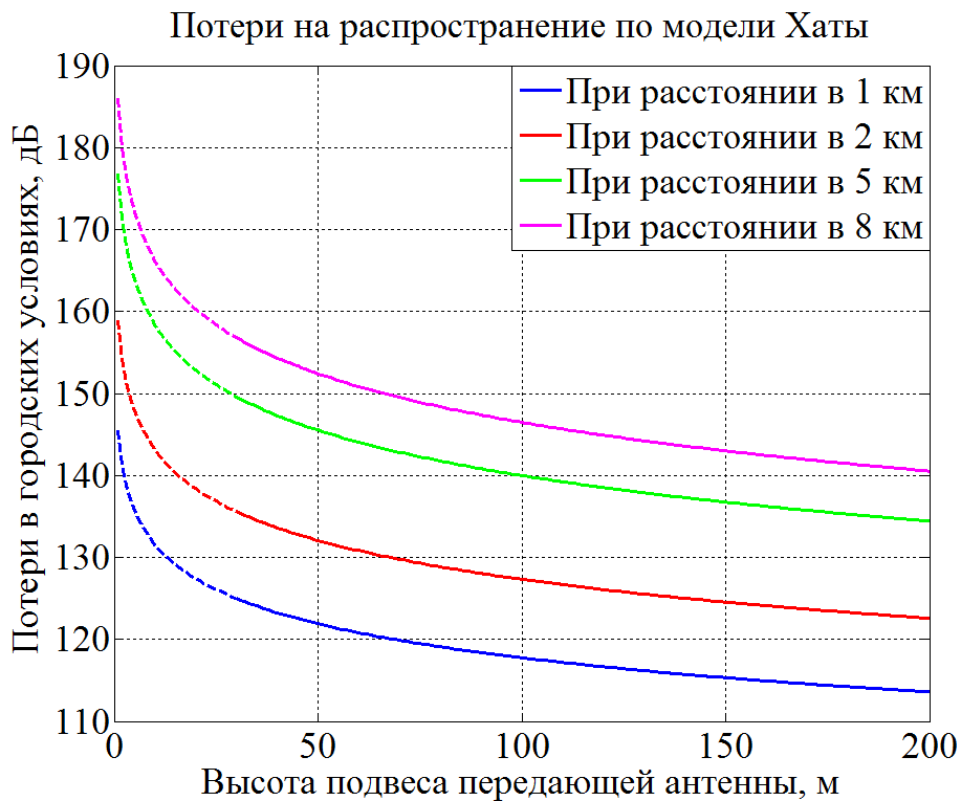


Рисунок 1 – Потери на распространение по модели Хаты для рабочей частоты 870 МГц в зависимости от высоты подвеса передающей антенны

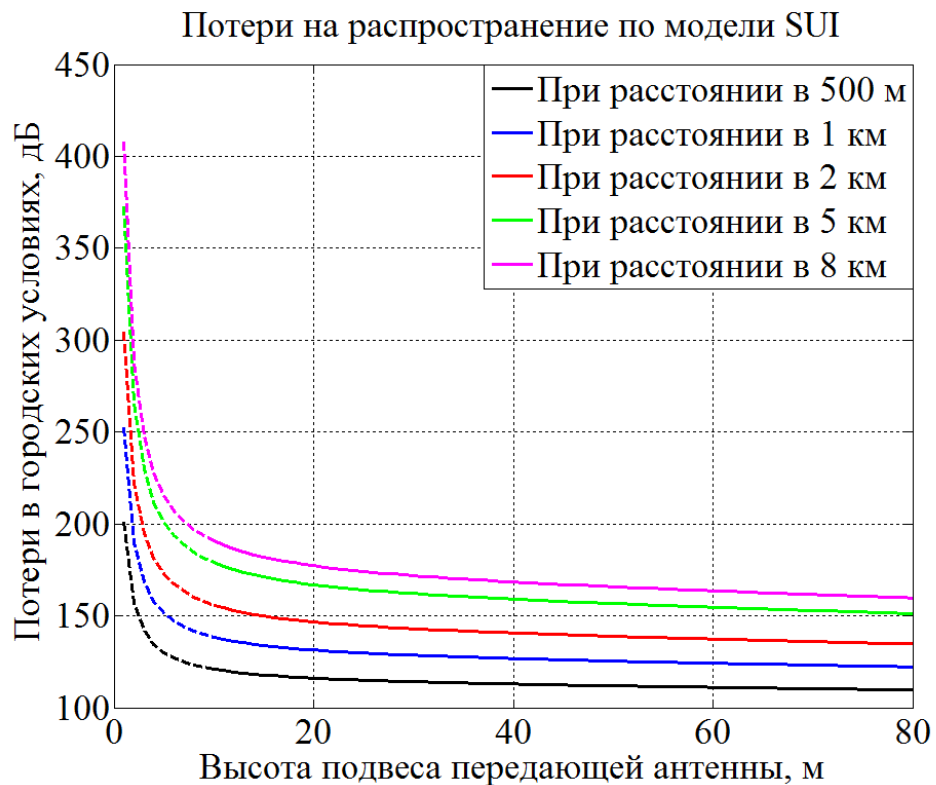


Рисунок 2 – Потери на распространение по модели SUI для рабочей частоты 870 МГц в зависимости от высоты подвеса передающей антенны

Проведение эксперимента в городских условиях

Авторами была проведена серия экспериментов по исследованию распространения радиоволн в условиях неравномерной городской застройки. Для этого была выбрана частота 870 МГц, которая согласно Решению ГКРЧ включена в список нелицензированных частот [18], и может применяться при работе неспециализированных устройств общего применения, при этом мощность сигнала не должна превышать 25 мВт, высота подвеса антенн не должна превышать 10 м.

Эксперименты проводились в соответствии с методикой, разработанной на основе Рекомендации Международного союза электросвязи (МСЭ) ITU-R 1406 «Эффекты распространения радиоволн, касающиеся наземных сухопутной подвижной и радиовещательной служб в диапазонах ОВЧ и УВЧ» и требований ГОСТ Р 51320-99.

Эксперименты проводились на территории г. Зеленограда, карта экспериментов представлена на рисунке 3. В ходе проведения экспериментов передающая антенна устанавливалась на высотах 2; 2,5 и 8 м, и в каждой из приведенных на рисунке 3 точек измерялись значения мощности шума и мощности сигнала с шумом. В качестве передающей антенны использовалась логопериодическая антенна, установленная на высоте 8 м, с коэффициентом усиления 10 дБ. В качестве передающей антенны для высот 2,5 и 2 м и в качестве

приемной антенны использовался несимметричный вибратор с коэффициентом усиления 1,3 дБ. Высота подвеса приемной антенны составляла 1,75 м для всех случаев. Таким образом, было проведено три эксперимента для одной и той же местности.

На карте эксперимента видно, что точки, в которых проводились измерения, расположены по разным сторонам дороги напротив друг друга на приблизительно равном удалении от передатчика. В связи с тем, что условия распространения для разных сторон дороги несколько отличаются, – в одном случае преобладает эффект от затенения зданиями, а в другом приемная антенна размещалась под кронами деревьев, и, следовательно, значителен вклад рассеяния радиосигнала растительностью, принято решение обозначить данные стороны дороги как А и В соответственно и анализировать результаты экспериментов отдельно для каждой из сторон.



Рисунок 3 - Карта проведения эксперимента

Величина потерь для каждой точки определялась путем пересчета измеренных значений сигнала с шумом в медианные значения уровня сигнала [19-20]. Полученные в результате эксперимента значения потерь в зависимости от расстояния приведены на рисунках 4-6. Цветами разделены результаты, полученные для разных сторон А и В. Ось, по которой отмечены расстояния, является

логарифмической, так как осуществлялась нормировка потерь по расстоянию $d_0 = 50$ м до точки отсчета в дальней зоне, где величина потерь L_{FS} составила 46,3 дБ.

Модификация модели SUI для наземной радиосвязи

Полученные в результате эксперимента значения потерь на распространение L_N , нормированные по расстоянию d_0 , удобно аппроксимировать таким образом, чтобы результаты соответствовали модели SUI, в соответствии с выражением:

$$L_N = 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + s, \text{ дБ.} \quad (6)$$

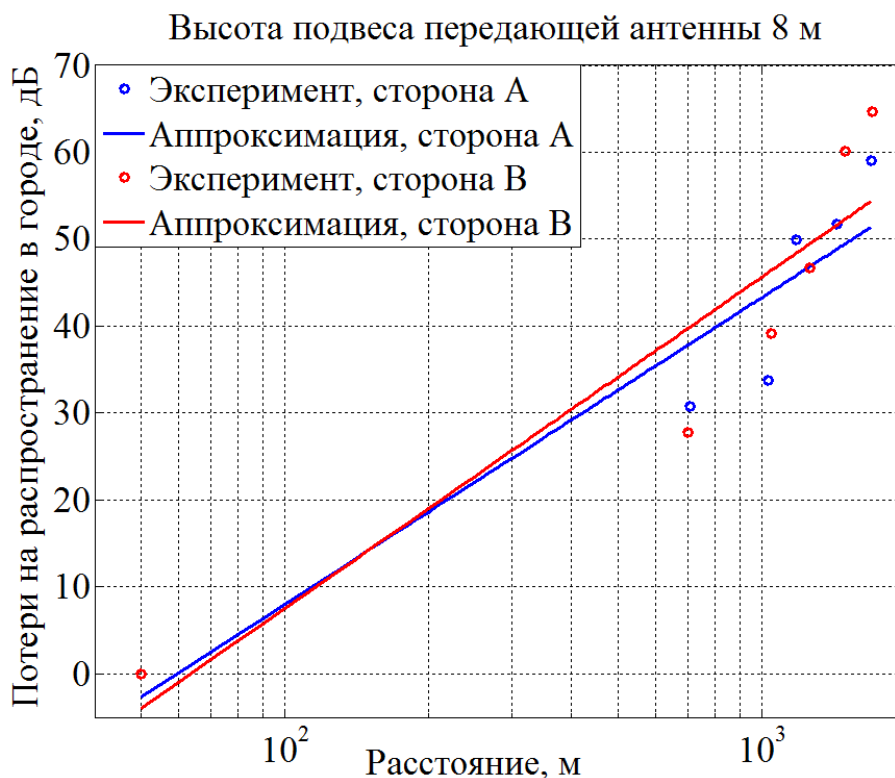


Рисунок 4 – Результаты измерений потерь на распространение и их аппроксимация для высоты подвеса передающей антенны 8 м

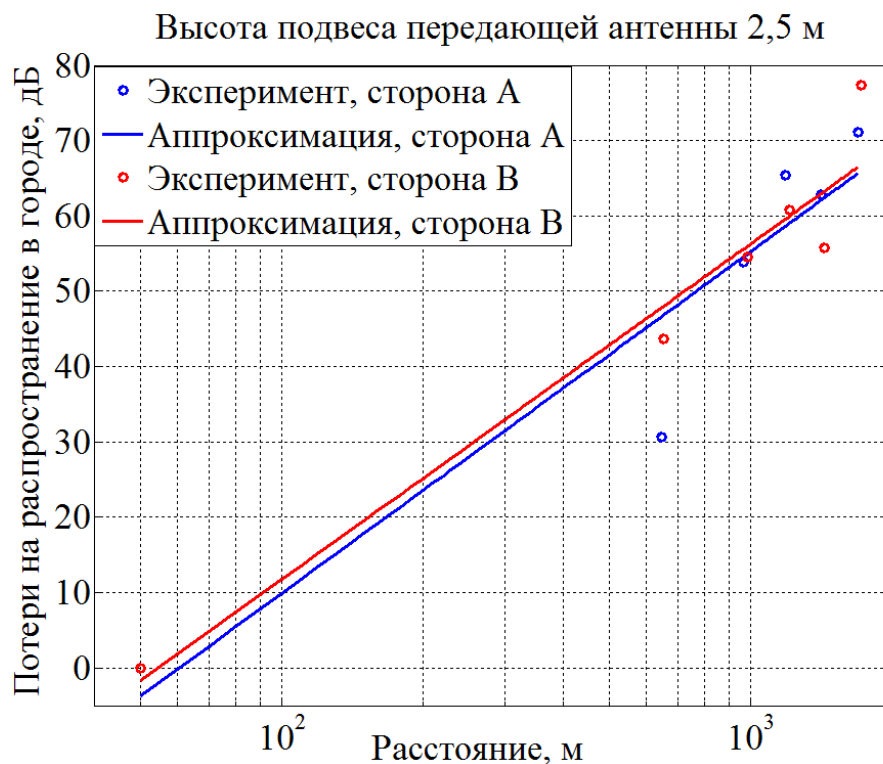


Рисунок 5 – Результаты измерений потерь на распространение и их аппроксимация для высоты подвеса передающей антенны 2,5 м

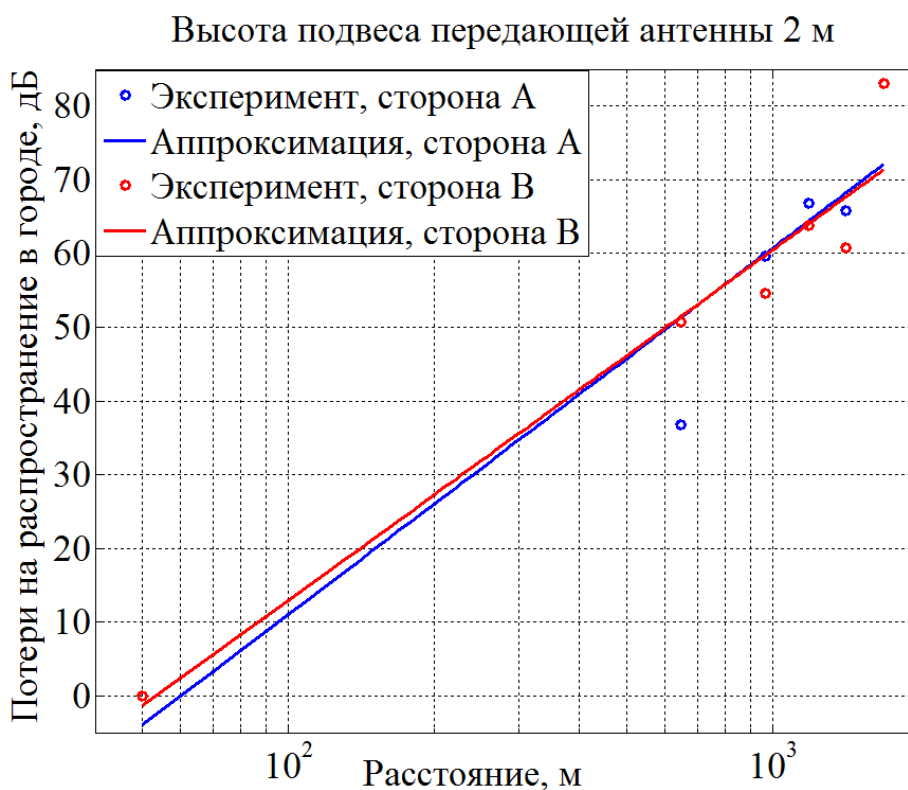


Рисунок 6 – Результаты измерений потерь на распространение и их аппроксимация для высоты подвеса передающей антенны 2 м

Для всех экспериментов с учетом разделения результатов для сторон дороги А и В, проведена линейная аппроксимация методом наименьших квадратов. Результаты представлены на рисунках 4-6.

Аппроксимировав полученные экспериментальным путем значения потерь, авторы определили значения переменных n и s в формуле (6) для каждого из рассматриваемых случаев. Усредненное значение s для всех экспериментов равно минус 2,9 дБ. Величина n является показателем степени затухания радиосигнала в условиях городской застройки, зависит от высоты подвеса передающей антенны и определяется из выражения (5), где коэффициенты a , b , c неизвестны для рассматриваемых случаев. Эти коэффициенты были определены по трем значениям n и соответствующим им h_i для каждой из сторон дороги А и В путем решения систем уравнений. В результате были рассчитаны значения коэффициентов, представленные в таблице 3.

Таблица 3

Коэффициенты для модифицированной модели SUI

Параметр	Значение для стороны А	Значение для стороны В	Значения, усредненные по величине общих потерь
a	2,61	3,03	2,86
b	-0,044	-0,046	-0,05
c	4,53	3,25	3,74

По полученным коэффициентам для каждой из сторон дороги А и В можно определить величину общих потерь на распространение в городе в соответствии с моделью SUI, соответствующую результатам проведенных экспериментов. Для оценки условий распространения радиосигнала в городских условиях, то есть

обобщения результатов проведенных исследований, полученные значения общих потерь для сторон А и В усредняются. В результате линейной аппроксимации средних значений потерь после их нормировки по d_0 были получены новые значения коэффициентов a , b , c , также приведенные в таблице 3.

Усредненные значения общих потерь на распространение в городских условиях приведены на рисунке 7 для расстояний от 50 м до 2000 м и высот антенн от 1 м до 10 м. Значения потерь на рисунке 7 получены с помощью модифицированной модели SUI по формуле (4) с коэффициентами, приведенными в таблице 3, и обобщают результаты серии проведенных экспериментов. Полученные значения потерь для высоты передающей антенны 10 м ниже, чем для модели SUI и для модели Хаты, и не превышают 110 дБ на расстоянии 2 км.

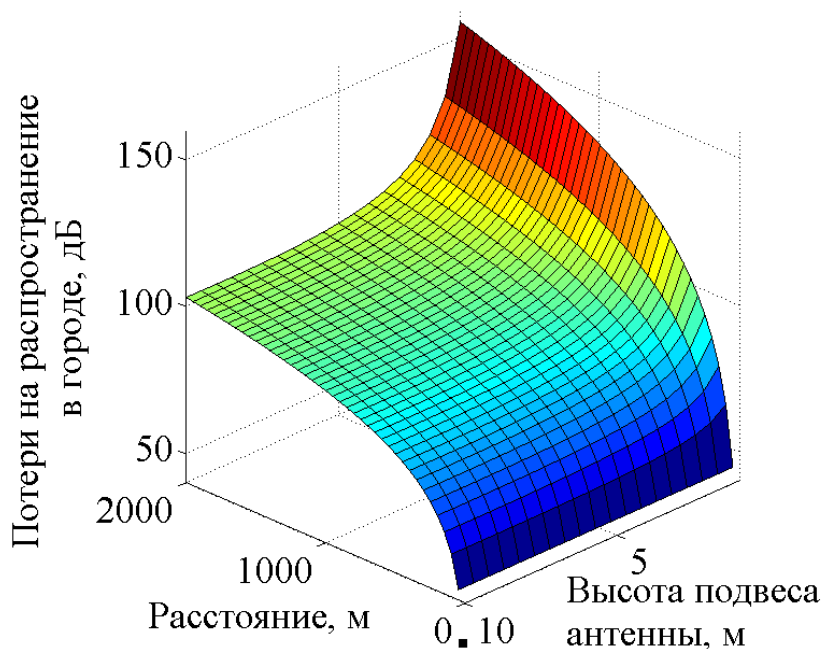


Рисунок 7 – Усредненные значения общих потерь на распространение в городе в зависимости от расстояния и высоты подвеса передающей антенны

Так как в выражение (4) входит показатель степени затухания радиосигнала n , в качестве наглядного результата, позволяющего оценить условия распространения радиоволн в условиях городской застройки, приведен рисунок 8 зависимости величины n от высоты подвеса антенны до 10 м. Видно, что для высот передающих антенн до 4 м данный показатель не превышает 4, что значительно меньше, чем при расширении модели SUI для рассматриваемых условий. Таким образом, при оценке потерь на распространение радиосигнала в городских условиях при низко расположенной антенне передатчика можно использовать значение показателя степени ослабления $n = 4$.

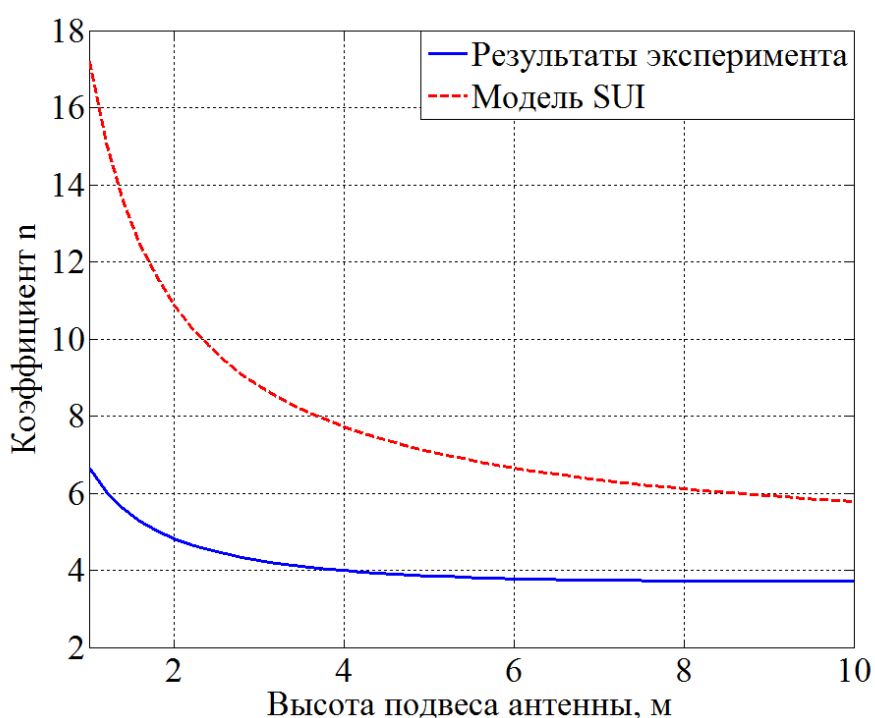


Рисунок 8 – Зависимость показателя степени ослабления n от высоты подвеса передающей антенны

Выводы

Создание универсальной модели распространения радиоволн в условиях городской застройки является затруднительным, требует учета многих факторов и обработки большого количества экспериментальных данных. Обычно при проектировании той или иной системы связи прогнозирование затухания радиоволн проводится по одной из существующих эмпирических моделей, которые выбираются в соответствии с особенностями конкретной застройки, применения системы связи и необходимой точности оценки затухания. В некоторых случаях требуется построение заказных моделей под конкретные условия.

При этом существующие модели распространения не рассматривают случаи, когда антенна передатчика расположена ниже 10 м; то есть в случае проектирования системы связи с мобильными ретрансляторами требуется проведение дополнительных исследований в области распространения радиоволн. Проведенная серия экспериментов для высот подъема передающей антенны 2; 2,5 и 8 м позволяет оценить затухание радиосигналов в условиях многоэтажной городской застройки с большим количеством растительности. Выполненная аппроксимация данных, полученных экспериментальным путем, к модели SUI позволяет прогнозировать потери на распространение в других городах с похожей застройкой. Анализ экспериментальных данных показывает, что для высот подвеса передающей антенны выше 3 м и приемной антенны около 1,5 м можно использовать показатель степени ослабления равный 4.

Библиографический список

1. Рекомендация МСЭ-R P.1406-2 (07/2015). Эффекты распространения радиоволн, касающиеся наземных сухопутной подвижной и радиовещательной служб в диапазонах ОБЧ и УВЧ. URL: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1406-2-201507-I!!PDF-R.pdf
2. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. – М.: Радио и связь, 2000. - 520 с.
3. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 640 с.
4. Маковеева М.М., Шинаков Ю.С. Системы связи с подвижными объектами. - М.: Радио и связь, 2002. – 440 с.
5. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. - М.: Горячая линия - Телеком, 2007. - 432 с.
6. COST 235. Radiowave propagation effects on next-generation fixed-services terrestrial telecommunication systems. Chair: M.P.M. Hall, UK. URL: http://www.cost.eu/COST_Actions/ict/235
7. Бахтин А.А., Волков А.С., Миронов А.В., Муратчаев С.С. Разработка алгоритма маршрутизации в децентрализованных самоорганизующихся сетях MANET // Естественные и технические науки. 2016. № 12. С. 232 – 243.
8. Антонов Д.А., Жарков М.В., Кузнецов И.М., Чернодубов А.Ю. Методы повышения точности и помехозащищенности навигационного обеспечения

транспортного средства // Труды МАИ. 2016. № 90. URL:
<http://trudymai.ru/published.php?ID=74758>

9. Theodore S. Rappaport. Wireless Communications: Principles and Practice, (2nd Edition), New Jersey, Prentice Hall, 2002, 707 p.
10. Okumura Y., Ohmori E., Kawano T., Fukuda K. Field Strength and Its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Radio Service // Review of the Electrical Communication Laboratory, 1968, vol. 16, no. 9 - 10, pp. 825 - 873.
11. Garg Vijay Kumar. IS-95 CDMA and cdma2000: Cellular/PCS Systems Implementation, Prentice Hall PTR, 2000, 423 p.
12. Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile services // IEEE Trans. Vehicular Technology, 1980, vol. 29, no. 3, pp. 317 – 326.
13. Kufre M. Udofia, Nwiido Friday, Afolayan J. Jimoh. Okumura-Hata Propagation Model Tuning Through Composite Function of Prediction. Residual // Mathematical and Software Engineering, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 93 - 104.
14. *Cost Final Report*, available at: <http://www.lx.it.pt/cost231/>
15. Walfish J., Bertoni H.L. A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments // IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1988, vol. 36, no.12, pp. 1788 – 1796.
16. Ikegami F., Takeuchi T., Yoshida S. Theoretical Prediction of Mean Field Strength for Urban Mobile Radio // IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1991, vol. 39, no. 3, pp. 299 – 302.

17. Erceg V., Greenstein L.J., Tjandra S.Y., Parkoff S.R., Gupta A., Kulic B., Julius A.A., Bianchi R. An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments // IEEE Journal on Selected Areas Communications, 1999, vol. 17, pp. 1205 – 1211.
18. Приложение 11 к Решению ГКРЧ от 7 мая 2007, № 07-20-03-001 Неспециализированные (любого назначения) устройства. URL: www.rfs-rf.ru/upload/medialibrary/d24/018818.doc
19. Tikhomirov A., Omelyanchuk E., Semenova A., Mikhailov V. Experimental Study of UHF Radio Wave Propagation in Rough Terrain. // Proceedings of the 2017 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, 2017 ElConRusNW, Moscow, 2017, pp. 307 – 311.
20. Tikhomirov A., Omelyanchuk E., Semenova A. Radio Wave Propagation Impact on Signal Parameters of Local Positioning Systems // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, Saint Petersburg, 2016, pp. 490 – 494.