

УДК 621.396.218:614.89.086.5

ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ДЛЯ АНАЛИЗА ВНУТРИСИСТЕМНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СЕТЕЙ СОТОВОЙ СВЯЗИ С МИКРОСОТОВОЙ СТРУКТУРОЙ

А. С. СВИСТУНОВ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск, Беларусь

Выполнен анализ возможности применения эмпирических моделей распространения радиоволн для диагностики внутрисистемной электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности сетей сотовой связи с микросотовой структурой в городской застройке. Приведены сравнительные результаты оценок уровней сигнала, принимаемого абонентским устройством на расстояниях от базовой станции менее 1 км, с использованием трехмерной многолучевой модели (X3D-модель) распространения радиоволн и трехмерной модели рассматриваемого участка типовой городской застройки с высотой зданий 6–20 м и применением известных эмпирических моделей распространения радиоволн. Сравнение осуществлялось с использованием критерия средней ошибки и стандартного отклонения этого параметра. Результаты анализа позволили сделать вывод о том, что при высоком качестве связи в сотовых радиосетях в случае решения задач оценки внутрисистемной электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности сетей сотовой связи могут быть рекомендованы модели COST231 – Хата и Ибрагима – Парсонса, поскольку результаты оценок уровней сигнала с их использованием в наибольшей степени совпадают с данными, полученными с помощью модели X3D. Модели Окамура – Хата, COST231 – Хата и Ибрагима – Парсонса могут быть применены для расстояний между базовыми станциями и абонентскими устройствами 0,4–1,0 км.

Ключевые слова: внутрисистемная электромагнитная совместимость; сотовая радиосвязь; базовые станции; электромагнитная безопасность; модели распространения радиоволн.

EMPIRICAL RADIO WAVE PROPAGATION MODELS FOR ANALYSIS OF INTRASYSTEM ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY AND SAFETY OF MICROCELLULAR COMMUNICATION NETWORKS

A. S. SVISTUNOV^a

^aBelarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6 P. Broŭki Street, Minsk 220013, Belarus

The possibility to use the empirical radio-wave propagation models for diagnostics of intrasystem electromagnetic compatibility and electromagnetic safety of microcellular radio networks in the urban area is analyzed. The paper presents comparative results of signal levels received by mobile stations at distances from base station of less than 1 km

Образец цитирования:

Свистунов А. С. Эмпирические модели распространения радиоволн для анализа внутрисистемной электромагнитной совместимости и безопасности сетей сотовой связи с микросотовой структурой // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2018. № 2. С. 107–116.

For citation:

Svistunov A. S. Empirical radio wave propagation models for analysis of intrasystem electromagnetic compatibility and safety of microcellular communication networks. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2018. No. 2. P. 107–116 (in Russ.).

Автор:

Александр Сергеевич Свистунов – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Электромагнитная совместимость локальных группировок радиоэлектронных средств».

Author:

Alexander S. Svistunov, junior researcher at the research and development laboratory of electromagnetic compatibility of local groups of radioelectronic facilities.
emc@bsuir.by

estimated using the three-dimensional multibeam radio wave propagation model (X3D model), with regard to a three-dimensional model for the fragment of a typical urban area with buildings 6–20 m high, and using the well known radio wave propagation empirical models. Comparison was made with the use of the «Mean error» and «Standard deviation» criteria. Based on the results obtained, it is concluded that the COST231 – Hata model or the Ibrahim – Parsons model may be recommended for diagnostics of intrasystem electromagnetic compatibility and for analysis of electromagnetic safety of microcellular radio networks due to high quality of service in cellular communications because the estimates of signal levels with their use correlate closely with the results obtained using X3D model for the considered urban area. The Okumura – Hata, COST231 – Hata, Ibrahim – Parsons models can be applied for the base – mobile station distances of 0.4–1.0 km.

Key words: intrasystem electromagnetic compatibility; cellular radio network; base stations; electromagnetic safety; radio wave propagation models.

Введение

В настоящее время в связи с массовым охватом населения услугами беспроводной связи наблюдается тенденция к увеличению пространственной плотности абонентских устройств (АУ) на городской территории и базовых станций (БС) для их обслуживания и уменьшению размеров сайтов сетей сотовой связи до нескольких сотен метров. С учетом этого факта большой интерес представляет вопрос электромагнитной безопасности сетей сотовой связи для населения и их внутрисистемной электромагнитной совместимости (ЭМС) (уровня внутрисетевых помех при оценке качества связи).

Проведение исследований электромагнитной безопасности и внутрисистемной ЭМС сетей сотовой связи связано с применением моделей условий распространения радиоволн (РРВ) между БС и АУ для определения уровня полезного сигнала и внутрисетевых помех. Однако широко используемые эмпирические модели условий РРВ, как правило, определены для расстояний между БС и АУ не менее чем 1 км и не охватывают все полосы радиочастот сотовой связи. В связи с этим для малых размеров сайтов, характерных для городских сотовых сетей с микросотовой структурой, возможность использования эмпирических моделей для диагностики внутрисистемной ЭМС и анализа электромагнитной безопасности сотовых радиосетей должна быть оценена дополнительно.

Ранее в работах [1–6] были сделаны попытки расширить область определения ряда наиболее применимых эмпирических моделей условий РРВ путем добавления в них поправочных коэффициентов для более объективной оценки затухания сигнала при РРВ на расстоянии менее 1 км между БС и АУ для различных типов местности и стандартов связи. Однако данные результаты могут быть признаны адекватными только для тех типов территорий, на которых производились измерения.

Цель настоящей работы – оценка возможности применения известных эмпирических моделей условий РРВ для диагностики внутрисистемной ЭМС и анализа электромагнитной безопасности сотовых сетей с микросотовой структурой на территории типовой средневысотной городской застройки.

Для этого реализована трехмерная модель участка типовой городской застройки с высотой зданий 6–20 м с размещением АУ вне зданий на земной поверхности. С использованием этой трехмерной модели выполнено моделирование условий РРВ от БС к АУ в сайтах радиусом менее 1 км с помощью модели РРВ X3D [7], затем для этих же условий осуществлено моделирование условий РРВ с применением известных эмпирических моделей, и далее проведено сравнение результатов оценок уровней сигнала, полученных с помощью эмпирических моделей и модели X3D.

Объекты и методы исследований

Модели и исходные данные, используемые при имитационном моделировании условий РРВ, представлены ниже.

Модель РРВ в городской застройке. В качестве модели условий РРВ для городской территории применена многолучевая трехмерная модель X3D [7]. Она основана на использовании трехмерного алгоритма SBR (shooting and bouncing ray), применяемого для определения траекторий лучей РРВ от БС к АУ в трехмерном пространстве. Модель не имеет принципиальных ограничений на ее использование в принятых условиях. Параметры трехмерной модели условий РРВ: количество отражений луча не превышает 6; количество точек дифракций составляет не более 1; угол между двумя соседними лучами, исходящими из одного источника, равен $0,25^\circ$; количество лучей, исходящих из одного источника, – до 10.

Модель городской застройки. Использована топографическая компьютерная модель фрагмента центральной части г. Минска (рис. 1).

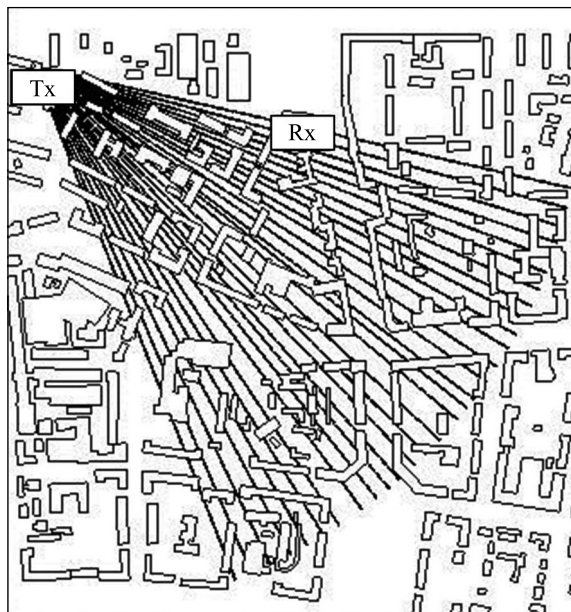


Рис. 1. Модель фрагмента городской застройки центральной части г. Минска с одной БС (Tx) и множеством АУ (Rx1 – RxN)

Fig. 1. Model for a fragment of city housing at the central part of Minsk with one base station (Tx) and multitude of mobile stations (Rx1 – RxN)

Приняты следующие характеристики компьютерной модели участка городской застройки:

- рассматриваемая территория городской застройки соответствует территории типа *urban high-rise* (городская зона многоэтажной застройки) [8];
- высота зданий составляет преимущественно 6–20 м;
- земная поверхность рассматриваемого участка городской застройки в основном равнинная, поэтому в компьютерной модели она выполнена в виде плоскости;
- тип покрытия земной поверхности – асфальт;
- использован сценарий моделирования условий РРВ с применением модели Х3Д с размещенными на исследуемом участке городской территории одной БС (Tx) с различной высотой подвеса ее антенн и координатами установки и множеством АУ RxN ($N = 1, \dots, 200$) с шагом 5 м вдоль прямолинейных трасс при различных азимутах относительно БС с началом в точке, координаты которой совпадают с координатами точки установки БС Tx (см. рис. 1);
- моделирование условий РРВ выполнено для расстояний между БС и АУ 0,1–1,0 км. Такое расстояние соответствует радиусу сайтов типа *micro-cell* (микросота) [8].

Эмпирические модели условий РРВ. Анализ выполнен для следующих известных эмпирических моделей условий РРВ:

- модель Окамура – Хата [9] определена для полосы частот 500–1500 МГц и расстояний между БС и АУ 1–20 км для высот подвеса антенн БС 30–200 м и АУ 1–10 м;
- модель COST231 – Хата [10] предназначена для полосы частот 1500–2000 МГц и расстояний между БС и АУ 1–20 км для высот подвеса антенн БС 30–200 м и АУ 1–10 м;
- модель COST231 – Уолфиша – Икегами [10] определена для полосы частот 800–2000 МГц и расстояний между БС и АУ 0,2–5,0 км для высот подвеса антенн БС 4–50 м и АУ 1–3 м. Она также учитывает параметры городской застройки (высота здания, ширина улиц и т. д.). При использовании данной модели высота зданий принята максимальной (равной 20 м);
- модель Ли [11] применяется для частоты 900 МГц и расстояний между БС и АУ от 1 км. Модель содержит коэффициент регулировки частоты, который позволяет аналитически увеличить частотный диапазон для ее применения;
- модель Ибрагима – Парсонса [12] определена для полосы частот 150–1000 МГц и расстояний между БС и АУ менее 10 км для высот подвеса антенн БС 30–300 м и АУ менее 3 м;
- модель Эриксона [13] предназначена для полосы частот 150–1500 МГц и расстояний между БС и АУ от 1 км.

Системные параметры моделирования. Приняты следующие системные параметры моделирования:

- анализ проведен для БС с частотой сигнала 1800 МГц;
- эквивалентная изотропно излучаемая мощность БС составляет 43 дБмВт;

- тип антенны БС и АУ – всенаправленная;
- высота антенны АУ $H_{ms} = 2,0$ м;
- высота подвеса антенн БС $H_{bs} = 30 \dots 50$ м.

Результаты исследований и их обсуждение

Примеры распределения значений затухания сигнала, полученных с использованием многолучевой модели при различной высоте подвеса антенн БС (множества этих значений представлены в виде множества точек серого цвета), показаны на рис. 2, а, б, в. На этих же рисунках приведены соответствующие расчетные кривые зависимостей затухания между БС и АУ с применением перечисленных выше эмпирических моделей.

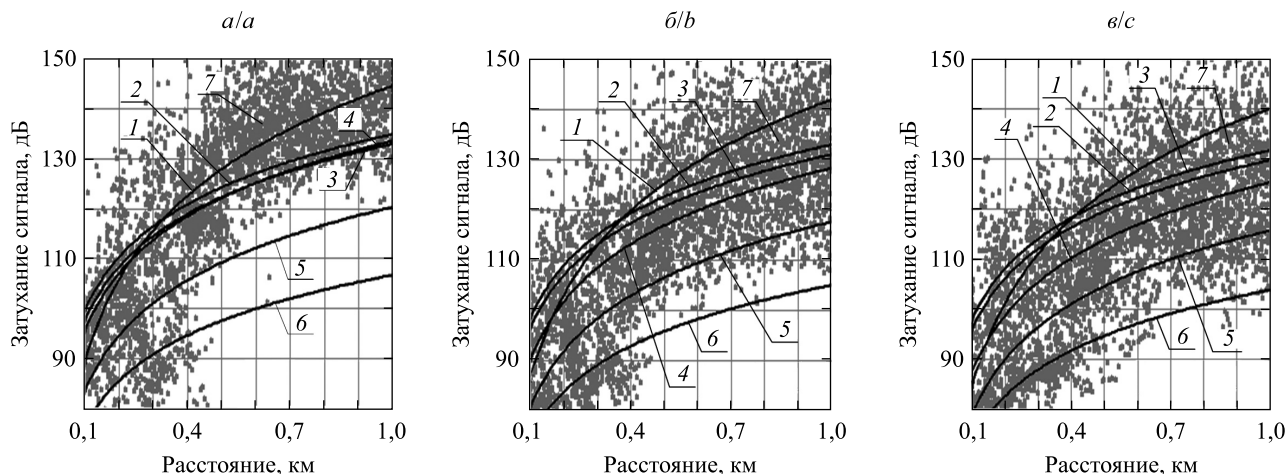


Рис. 2. Примеры распределения значений затуханий сигнала, полученных с использованием модели X3D при различной высоте подвеса антенн БС: а – $H_{bs} = 30$ м, б – $H_{bs} = 40$ м, в – $H_{bs} = 50$ м; 1 – модель Ибрагима – Парсонса, 2 – модель COST231 – Хата, 3 – модель Окамура – Хата, 4 – модель COST231 – Уолфиша – Икегами, 5 – модель Ли, 6 – модель Эриксона, 7 – модель X3D

Fig. 2. Examples of distribution of the signal attenuation values obtained with the use of X3D model for different heights of the base station antenna: а – $H_{bs} = 30$ m, б – $H_{bs} = 40$ m, в – $H_{bs} = 50$ m; 1 – Ibrahim – Parsons model, 2 – COST231 – Hata model, 3 – Okumura – Hata model, 4 – COST231 – Walfish – Ikegami model, 5 – Lee model, 6 – Ericsson model, 7 – X3D model

Результаты расчета статистических параметров распределения значений затухания сигнала при РРВ для различных расстояний между БС и АУ при разной высоте подвеса антенн БС представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета статистических параметров распределения значений затухания сигнала при РРВ для различных расстояний d между БС и АУ при разной высоте подвеса антенн БС H_{bs}

Table 1

Calculation results for statistical parameters of the signal attenuation distribution values on radio wave propagation for different distances d between base and mobile station and different heights H_{bs} of the base station antenna

d , км	Среднее значение, дБ			Медианное значение, дБ			Стандартное отклонение, дБ		
	H_{bs} , м			H_{bs} , м			H_{bs} , м		
	30	40	50	30	40	50	30	40	50
0,4	113,0	105,6	103,6	113,4	105,2	102,0	13,3	13,0	11,7
0,5	120,0	115,3	111,0	120,8	115,1	111,7	13,6	11,4	11,5
0,6	131,7	123,0	119,0	132,4	122,0	117,8	12,5	13,7	12,7
0,7	138,9	128,3	122,3	137,4	127,4	122,1	16,2	13,7	12,2
0,8	145,0	133,1	126,4	141,3	131,6	125,2	16,9	13,5	13,0
0,9	147,5	136,1	129,1	143,3	134,7	128,6	17,9	14,3	13,0
1,0	149,0	139,5	131,1	144,6	139,8	131,7	17,0	15,9	13,9

Примеры гистограмм распределения затухания сигнала при РРВ от БС к АУ, располагаемым на различных расстояниях от БС при высоте подвеса антенн БС 30 м, представлены на рис. 3.

Зависимость затухания сигнала от расстояния между БС и АУ при использовании эмпирических моделей и модели X3D для разной высоты подвеса антенн БС показана на рис. 4. Точки 7 соответствуют медианному значению затухания сигнала, полученному с помощью модели X3D, для различных расстояний между БС и АУ (100; 150–1000 м). Точки 8 и 9 представляют значения первого и третьего квартилей распределения значений затуханий сигнала, полученного с помощью этой же модели для таких же расстояний между БС и АУ. Эмпирические модели Окамура – Хата, COST231 – Хата, Ли, Эриксона, Ибрагима – Парсонса использованы при значениях параметров, не входящих в область применения данных моделей (частота сигнала, расстояние между БС и АУ).

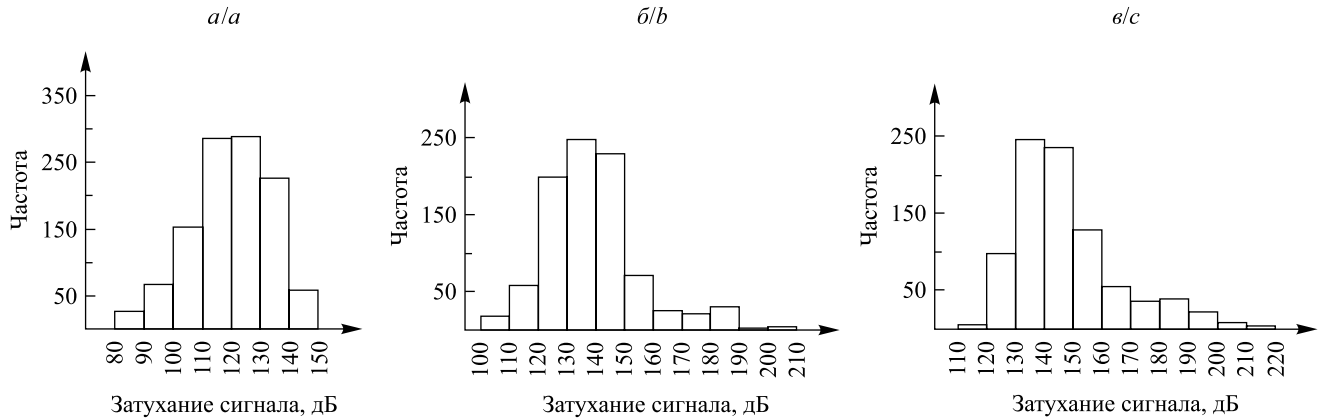


Рис. 3. Примеры гистограмм распределения затухания сигнала при РРВ от БС к АУ для различных расстояний d между БС и АУ при высоте подвеса антенн БС 30 м: а – $d = 0,5$ км; б – $d = 0,7$ км; в – $d = 0,9$ км

Fig. 3. Histograms of the signal attenuation distribution on radio wave propagation for different distances d between base and mobile station at the base station antenna height 30 m: а – $d = 0.5$ km; б – $d = 0.7$ km; в – $d = 0.9$ km

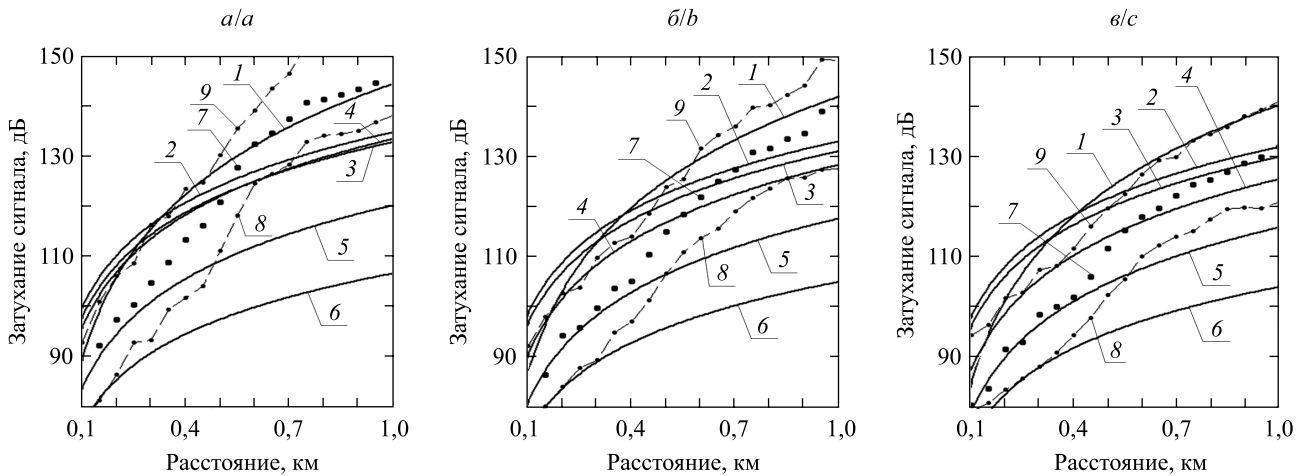


Рис. 4. Зависимость затухания сигнала от расстояния между БС и АУ при использовании эмпирических моделей и модели X3D для разной высоты подвеса антенн БС:

а – $H_{bs} = 30$ м, б – $H_{bs} = 40$ м, в – $H_{bs} = 50$ м; 1 – модель Ибрагима – Парсонса, 2 – модель COST231 – Хата, 3 – модель Окамура – Хата, 4 – модель COST231 – Уолфиша – Икегами, 5 – модель Ли, 6 – модель Эриксона, 7 – модель X3D (медианное значение), 8 – модель X3D (значение первого квартиля), 9 – модель X3D (значение третьего квартиля)

Fig. 4. Signal attenuation as a function of the distance between the base and mobile station with the use of empirical models and X3D model at the base station antenna height H_{bs} :

а – $H_{bs} = 30$ м, б – $H_{bs} = 40$ м, в – $H_{bs} = 50$ м; 1 – Ibrahim – Parsons model, 2 – COST231 – Hata model, 3 – Okumura – Hata model, 4 – COST231 – Walfish – Ikegami model, 5 – Lee model, 6 – Ericsson model, 7 – X3D model (median), 8 – X3D model (first quartile), 9 – X3D model (third quartile)

Результаты расчета средней ошибки ME (mean error) и стандартного отклонения ESD (error standard deviation) этой ошибки для некоторых расстояний d между БС и АУ, которые являются критериями при сравнении результатов оценок уровня сигнала, полученных с помощью эмпирических моделей условий РРВ и трехмерной многолучевой модели X3D при разной высоте подвеса антенн БС, приведены в табл. 2–4.

Таблица 2

Результаты расчета ME и ESD при сравнении уровней сигналов,
полученных с использованием эмпирических моделей
и модели X3D при высоте подвеса антенн БС 30 м, дБмВт

Table 2

Calculation results for ME and ESD with comparison of the signal levels
obtained using empirical models and X3D model at the base station antenna height 30 m, dBmW

Наименование модели	ME	ESD	ME	ESD	ME	ESD	ME	ESD
	d , км							
	0,1		0,4		0,7		1,0	
Модель Окамура – Хата	–39,6	–38,2	–57,7	–52,9	–79,2	–72,4	–90,3	–96,8
Модель COST231 – Хата	–39,6	–38,2	–57,7	–52,9	–79,6	–72,4	–92,4	–98,0
Модель COST231 – Уолфиша – Икегами	–39,6	–38,2	–57,7	–52,9	–72,8	–72,4	–91,0	–94,4
Модель Ли	–39,2	–40,0	–57,2	–53,1	–71,4	–73,6	–77,2	–96,8
Модель Ибрагима – Парсонса	–40,0	–38,5	–57,7	–52,9	–79,2	–71,4	–99,2	–97,7
Модель Эриксона	–34,3	–38,8	–51,7	–55,4	–58,9	–72,3	–63,7	–96,8

Таблица 3

Результаты расчета ME и ESD при сравнении уровней сигналов,
полученных с использованием эмпирических моделей
и модели X3D при высоте подвеса антенн БС 40 м, дБмВт

Table 3

Calculation results for ME and ESD with comparison of the signal levels
obtained using empirical models and X3D model at the base
station antenna height 40 m, dBmW

Наименование модели	ME	ESD	ME	ESD	ME	ESD	ME	ESD
	d , км							
	0,1		0,4		0,7		1,0	
Модель Окамура – Хата	–39,2	–39,2	–54,0	–50,0	–70,1	–64,2	–82,8	–77,2
Модель COST231 – Хата	–39,2	–39,2	–54,0	–50,0	–70,1	–64,1	–83,3	–77,2
Модель COST231 – Уолфиша – Икегами	–39,2	–39,6	–54,0	–50,0	–70,0	–64,1	–82,1	–77,2
Модель Ли	–39,6	–42,4	–53,7	–50,0	–67,2	–64,7	–74,7	–80,0
Модель Ибрагима – Парсонса	–39,2	–40,5	–54,0	–50,0	–66,8	–64,1	–83,8	–77,0
Модель Эриксона	–32,7	–39,2	–49,6	–52,6	–57,7	–66,2	–62,2	–77,0

Таблица 4

Результаты расчета ME и ESD при сравнении уровней сигналов,
полученных с использованием эмпирических моделей и модели X3D
при высоте подвеса антенн БС 50 м, дБмВт

Table 4

Calculation results for ME and ESD with comparison of the signal levels
obtained using empirical models and X3D model at the base station antenna height 50 m, dBmW

Наименование модели	ME	ESD	ME	ESD	ME	ESD	ME	ESD
	<i>d</i> , км							
	0,1		0,4		0,7		1,0	
Модель Окамура – Хата	–39,6	–40,4	–56,6	–52,8	–65,2	–57,7	–80,9	–74,8
Модель COST231 – Хата	–39,6	–40,3	–56,6	–52,8	–65,2	–57,7	–81,1	–74,3
Модель COST231 – Уолфиша – Икегами	–40,0	–41,8	–56,6	–52,9	–65,2	–57,7	–79,6	–74,9
Модель Ли	–38,5	–40,3	–55,7	–53,5	–63,9	–57,7	–72,9	–76,2
Модель Ибрагима – Парсонса	–40,2	–43,7	–56,6	–52,8	–65,2	–57,7	–81,4	–74,7
Модель Эриксона	–31,2	–40,3	–49,2	–55,5	–56,2	–59,2	–61,0	–74,7

Расчетные формулы параметров ME и ESD имеют вид [1]

$$ME = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |y_i - \hat{y}_i|,$$

$$ESD = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (|y_i - \hat{y}_i| - ME)^2},$$

где y_i – уровень сигнала, полученный с использованием эмпирических моделей, Вт; $\hat{y}_i$ – уровень сигнала, полученный с использованием модели X3D, Вт; M – количество положений АУ.

Анализ полученных оценок (в целом для расстояний 0,1–1,0 км между БС и АУ и при высотах подвеса антенн БС 30–50 м) свидетельствует о следующем:

- при использовании модели Эриксона наблюдается наибольшая разница (значение средней ошибки ME) между результатами оценок уровня сигнала, полученными с помощью данной модели и модели X3D. Эта разница составляет –63,7...–31,2 дБмВт. Применение этой эмпирической модели будет приводить, как правило, к завышенной оценке полезного сигнала и пессимистической оценке уровня внутрисетевой помехи на рассматриваемой городской территории;
- в случае применения моделей Окамура – Хата, COST231 – Хата, COST231 – Уолфиша – Икегами, Ибрагима – Парсонса наблюдается наименьшая разница между результатами оценок уровня сигнала, полученными с помощью этих моделей и модели X3D (разница составляет –99,2...–39,2 дБмВт);
- при сравнении результатов оценок уровней сигнала, полученных в случае использования модели Ли и модели X3D, разница составляет –77,2...–38,5 дБмВт. Когда применяется эта модель, то для рассматриваемой городской территории оценка уровней полезного сигнала, как правило, будет оптимистической, а при оценке уровней внутрисетевых помех – пессимистической.

Детальный анализ различий оценок уровней сигнала для диапазонов расстояний между БС и АУ 0,1–0,4; 0,4–0,7 и 0,7–1,0 км свидетельствует о следующем:

- в диапазоне расстояний 0,1–0,4 км при высоте подвеса антенн БС 30 м наблюдается существенная разница между результатами оценок уровней сигнала при использовании всех рассматриваемых эмпирических моделей и модели X3D. Эта разница составляет –57,7...–34,3 дБмВт. Увеличение высоты подвеса антенн БС до 40–50 м несущественно влияет на эту разницу (–56,6...–31,2 дБмВт);
- в диапазоне расстояний 0,4–0,7 км при высоте подвеса антенн БС 30 м наблюдается наименьшая разница между результатами оценок уровней сигнала при использовании моделей Окамура – Хата,

COST231 – Хата, COST231 – Уолфиша – Икегами, Ибрагима – Парсонса. Результаты оценок, полученные с помощью модели COST231 – Хата, в наибольшей степени совпадают с теми, которые обусловило применение модели X3D. Разница между результатами оценок находится в пределах $-79,6 \dots -57,7$ дБмВт. В данном случае при использовании этих эмпирических моделей уровни полезного сигнала будут близкими к медианному значению уровней сигнала, полученных с помощью модели X3D. При увеличении высоты подвеса антенн БС разница между результатами оценок уровней сигнала увеличивается до $-70,1 \dots -54,0$ дБмВт. В данном случае оценка уровней полезного сигнала с использованием этих эмпирических моделей будет пессимистической, а оценка уровней внутрисетевых помех – оптимистической;

- в диапазоне расстояний 0,7–1,0 км при высоте подвеса антенн БС 30 м наблюдается наименьшая разница между результатами оценок уровней сигнала также при применении моделей Окамура – Хата, COST231 – Хата, COST231 – Уолфиша – Икегами, Ибрагима – Парсонса. Результаты оценок, полученные с помощью модели Ибрагима – Парсонса, в наибольшей степени совпадают с результатами при использовании модели X3D. С помощью этих эмпирических моделей будут определены оптимистическая оценка уровней полезного сигнала и пессимистическая оценка уровней внутрисетевых помех в данном случае. Разница между результатами оценок уровней сигнала составляет $-99,2 \dots -72,8$ дБмВт. При увеличении высоты подвеса антенн БС до 40–50 м данная разница существенно возрастает до $-83,8 \dots -65,2$ дБмВт. В данном случае использование этих эмпирических моделей обуславливает уровни полезного сигнала, близкие к медианному значению уровней сигнала, полученных с помощью модели X3D.

Проведенный выше сравнительный анализ свидетельствует о том, что результаты оценок уровней сигнала, полученные с использованием эмпирических моделей PPB COST231 – Хата и Ибрагима – Парсонса, в наименьшей степени отличаются от результатов, которые обеспечивает применение модели X3D на рассматриваемом участке городской застройки для расстояний между БС и АУ 0,4–1,0 км при высотах подвеса антенн БС 30–40 м. Следует отметить, что эти эмпирические модели разработаны на основе результатов измерений уровня сигнала от БС при PPB к АУ на расстояния более 1 км в различных городах (Токио, Лондон), характеристики застройки которых отличаются от характеристик рассматриваемого участка городской застройки г. Минска. Результаты оценок уровней сигнала с использованием многолучевой модели PPB X3D для расстояний между БС и АУ менее 1 км получены для территорий городской застройки с высотой зданий 6–20 м при высотах подвеса антенн БС, в основном превышающих высоту зданий. Вследствие малых различий между оценками уровней сигнала, обусловленных применением эмпирических моделей PPB COST231 – Хата и Ибрагима – Парсонса и многолучевой модели PPB X3D, модели COST231 – Хата и Ибрагима – Парсонса могут быть рекомендованы для диагностики внутрисистемной ЭМС и оценки электромагнитной безопасности сетей сотовой связи с микросотовой структурой в малоэтажной городской застройке рассмотренного типа для расстояний между БС и АУ 0,4–1,0 км.

Полученные в настоящей работе результаты хорошо согласуются с [14], в которой проведено сравнение оценок уровней сигнала при PPB для расстояний между БС и АУ менее 1 км, определенных с помощью эмпирических моделей PPB (Окамура – Хата, COST231 – Хата, Ибрагима – Парсонса) и моделей PPB для микросот. В качестве моделей PPB для микросот были использованы оптимизированная модель COST231 – Хата [15] и модель [16]. Среднее значение разницы между результатами оценки уровней сигнала, полученных с помощью эмпирических моделей и моделей для микросот, составляет примерно 2–10 дБ, что дополнительно подтверждает возможность применения моделей Окамура – Хата, COST231 – Хата, Ибрагима – Парсонса для расстояний между БС и АУ менее 1 км.

Заключение

Отмечается наибольшее совпадение результатов оценок уровней сигнала с использованием модели X3D на рассматриваемой территории городской застройки и моделей PPB Окамура – Хата, COST231 – Хата, COST231 – Уолфиша – Икегами, Ибрагима – Парсонса. Модели Окамура – Хата, COST231 – Хата, Ибрагима – Парсонса могут быть применены для расстояний между БС и АУ 0,4–1,0 км.

Моделирование показало, что для рассматриваемой территории городской застройки возможно использование моделей Окамура – Хата, Ибрагима – Парсонса при частоте 1800 МГц для оценки уровня полезного сигнала и уровня внутрисетевых помех.

Результаты оценок уровней сигнала с применением эмпирических моделей условий PPB Окамура – Хата, COST231 – Хата, COST231 – Уолфиша – Икегами, Ибрагима – Парсонса, наиболее близкие к результатам оценок с использованием модели X3D, могут быть получены при высотах подвеса антенн БС 30–40 м для рассматриваемой территории городской застройки при микросотовой структуре сети.

Для оценки электромагнитного фона [17], электромагнитной безопасности сетей сотовой связи, и диагностики внутрисистемной ЭМС (оценки уровней внутрисетевых помех) при обеспечении высокого качества связи в сотовых радиосетях могут быть рекомендованы модели COST231 – Хата и Ибрагима – Парсонса, поскольку результаты оценок уровня сигнала с их использованием в наибольшей степени совпадают с результатами, полученными с помощью модели Х3D.

Библиографические ссылки

1. Dalela C., Prasad M. V. S. N., Dalela P. K. Tuning of COST-231 Hata model for radio wave propagation predictions // *Comput. Sci. & Inf. Technol. (CS & IT)*. 2012. Vol. 10. P. 255–267.
2. Jadhav A. N., Kale S. S. Suburban area path loss propagation prediction and optimisation using Hata model at 2375 MHz // *Int. J. Adv. Res. in Comput. and Commun. Eng.* 2014. Vol. 3, issue 1. P. 5004–5008.
3. Mohammed S. H. Al Salameh, Muneer M. Al-Zu'bi. Prediction of radiowave propagation for wireless cellular networks in Jordan // *Knowledge and Smart Technology (KST) : VII Int. conf. (Chonburi, 28–31 January, 2015)*. Chonburi, 2015. P. 149–154. DOI: 10.1109/KST.2015.7051452.
4. Acar T., Çalışkan F., Aydin E. Comparison of computer-based propagation models with experimental data collected in an urban area at 1800 MHz // *Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON) : IEEE XVI Annu. (Cocoa Beach, 13–15 April, 2015)*. Cocoa Beach, 2015. P. 1–6. DOI: 10.1109/WAMICON.2015.7120381.
5. Chebil J., Ali K. Lwas, Md. Rafiqul Islam, et al. Comparison of empirical propagation path loss models for mobile communications in suburban area of Kuala Lumpur // *Mechatronics (ICOM) : IV Int. conf. (Kuala Lumpur, 17–19 May, 2011)*. Kuala Lumpur, 2011. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICOM.2011.5937144.
6. Domingues A., Ciaiado D., Gonçalves C., et al. Testing the COST231-WI propagation model in the city of Lisbon. Tech. Rep. COST231 TD(96). European Cooperation in Field of Science and Technical Research. 1996.
7. Wireless InSite: Site-specific Radio Propagation Prediction Software : Ref. Man. Version 3.0.0, REMCOM. November, 2016.
8. Recommendation ITU-R P. 1411-9. Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz. Geneva, 2017.
9. Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio service // *IEEE Trans. on vehicular technol.* 1980. Vol. 29, issue 3. P. 317–325. DOI: 10.1109/T-VT.1980.23859.
10. COST Action 231. Digital mobile radio towards future generation systems. Final report. 1999.
11. John S. Seybold. Introduction to RF propagation. Hoboken : Wiley, 2005.
12. Siwiak K. Radiowave propagation and antennas for personal Communications. Norwood : Artech House, 1998.
13. Jimoh A. A., Surajudeen-Bakinde N. T., Faruk N., et al. Clutter height variation effects on frequency dependent path loss models at UHF bands in build-up areas // *Sci., Technol. and arts res. j.* 2015. Vol. 4. P. 138–147.
14. Svistunov A. Validation of Empirical Radiowave Propagation Models for Diagnostics of Intrasystem EMC and Electromagnetic Safety of Microcellular Radio Networks // *EMC Europe 2017 : proc. 2017 Int. Symp. Electromagn. Compat. (Angers, 4–8 Sept., 2017)*. Angers, 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/EMCEurope.2017.8094673.
15. Banimelhem O., Muneer M. Al-Zu'bi, Mohammad S. Al Salameh. Hata Path Loss Model Tuning for Cellular Networks in Irbid City // *Computer and Information Technology : IEEE Int. conf. (Liverpool, 26–28 Oct., 2015)*. Liverpool, 2015. P. 1646–1650. DOI: 10.1109/CIT/IUCC/DASC/PICOM.2015.248.
16. Kitao K., Ichitsubo S. Path loss prediction formula for microcell in 400 MHz to 8 GHz band // *Electron. lett.* 2004. Vol. 40. P. 685–687. DOI: 10.1049/el:20040475.
17. Mordachev V. Electromagnetic Background Created by Base and Mobile Radio Equipment of Cellular Communications // *EMC Europe 2016 : proc. 2016 Int. Symp. Electromagn. Compat. (Wroclaw, 5–9 Sept., 2016)*. Wroclaw, 2016. P. 590–595. DOI: 10.1109/EMCEurope.2016.7739157.

References

1. Dalela C., Prasad M. V. S. N., Dalela P. K. Tuning of COST-231 Hata model for radio wave propagation predictions. *Comput. Sci. & Inf. Technol. (CS & IT)*. 2012. Vol. 10. P. 255–267.
2. Jadhav A. N., Kale S. S. Suburban area path loss propagation prediction and optimisation using Hata model at 2375 MHz. *Int. J. Adv. Res. in Comput. and Commun. Eng.* 2014. Vol. 3, issue 1. P. 5004–5008.
3. Mohammed S. H. Al Salameh, Muneer M. Al-Zu'bi. Prediction of radiowave propagation for wireless cellular networks in Jordan. *Knowledge and Smart Technology (KST) : VII Int. conf. (Chonburi, 28–31 January, 2015)*. Chonburi, 2015. P. 149–154. DOI: 10.1109/KST.2015.7051452.
4. Acar T., Çalışkan F., Aydin E. Comparison of computer-based propagation models with experimental data collected in an urban area at 1800 MHz. *Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON) : IEEE XVI Annu. (Cocoa Beach, 13–15 April, 2015)*. Cocoa Beach, 2015. P. 1–6. DOI: 10.1109/WAMICON.2015.7120381.
5. Chebil J., Ali K. Lwas, Md. Rafiqul Islam, et al. Comparison of empirical propagation path loss models for mobile communications in suburban area of Kuala Lumpur. *Mechatronics (ICOM) : IV Int. conf. (Kuala Lumpur, 17–19 May, 2011)*. Kuala Lumpur, 2011. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICOM.2011.5937144.
6. Domingues A., Ciaiado D., Gonçalves C., et al. Testing the COST231-WI propagation model in the city of Lisbon. Tech. Rep. COST231 TD(96). European Cooperation in Field of Science and Technical Research. 1996.
7. Wireless InSite: Site-specific Radio Propagation Prediction Software : Ref. Man. Version 3.0.0, REMCOM. November, 2016.
8. Recommendation ITU-R P. 1411-9. Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz. Geneva, 2017.
9. Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio service. *IEEE Trans. on vehicular technol.* 1980. Vol. 29, issue 3. P. 317–325. DOI: 10.1109/T-VT.1980.23859.

10. COST Action 231. Digital mobile radio towards future generation systems. Final report. 1999.
11. John S. Seybold. Introduction to RF propagation. Hoboken : Wiley, 2005.
12. Siwiak K. Radiowave propagation and antennas for personal Communications. Norwood : Artech House, 1998.
13. Jimoh A. A., Surajudeen-Bakinde N. T., Faruk N., et al. Clutter height variation effects on frequency dependent path loss models at UHF bands in build-up areas. *Sci., Technol. and arts res. j.* 2015. Vol. 4. P. 138–147.
14. Svistunov A. Validation of Empirical Radiowave Propagation Models for Diagnostics of Intrasystem EMC and Electromagnetic Safety of Microcellular Radio Networks. *EMC Europe 2017* : proc. 2017 Int. Symp. Electromagn. Compat. (Angers, 4–8 Sept., 2017). Angers, 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/EMCEurope.2017.8094673.
15. Banimelhem O., Muneer M. Al-Zu'bi, Mohammad S. Al Salameh. Hata Path Loss Model Tuning for Cellular Networks in Irbid City. *Computer and Information Technology* : IEEE Int. conf. (Liverpool, 26–28 Oct., 2015). Liverpool, 2015. P. 1646–1650. DOI: 10.1109/CIT/IUCC/DASC/PICOM.2015.248.
16. Kitao K., Ichitsubo S. Path loss prediction formula for microcell in 400 MHz to 8 GHz band. *Electron. lett.* 2004. Vol. 40. P. 685–687. DOI: 10.1049/el:20040475.
17. Mordachev V. Electromagnetic Background Created by Base and Mobile Radio Equipment of Cellular Communications. *EMC Europe 2016* : proc. 2016 Int. Symp. Electromagn. Compat. (Wroclaw, 5–9 Sept., 2016). Wroclaw, 2016. P. 590–595. DOI: 10.1109/EMCEurope.2016.7739157.

Статья поступила в редакцию 27.11.2017.
Received by editorial board 27.11.2017.