



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-126-8-117-124>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396.218:614.89.086.5

ЧАСТОТНОНЕЗАВИСИМЫЕ ПРЕДЕЛЫ ЗНАЧЕНИЙ СИСТЕМНЫХ ПАРАМЕТРОВ СОТОВОЙ СВЯЗИ ПРИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН В ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКЕ

МОРДАЧЕВ В.И.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Поступила в редакцию 16 октября 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Исследования выполнены с целью уточнения оценок ожидаемых ограничений на характеристики сотовой связи новых поколений (4G, 5G) при существующих ограничениях на излучаемую мощность абонентского радиооборудования, а также в условиях, когда границы городских сайтов лежат за пределами области свободного распространения радиоволн между абонентскими и базовыми станциями сотовых радиосетей. Исследования выполнены с использованием основных положений и ансамблевых моделей статистической теории электромагнитной обстановки, а также базовых положений и моделей теории информации, определяющих пропускную способность радиоканала в условиях помех. Получены частотно-независимые соотношения для оценки ряда системных параметров сотовой связи в условиях интерференционного распространения радиоволн в городских каньонах и присутствия внутрисистемных радиопомех: оценки требуемой эквивалентной изотропно излучаемой мощности (ЭИИМ) абонентских станций, предельной пропускной способности обратного радиоканала, предельной дальности качественной связи, а также допустимого уровня внутрисистемных радиопомех при заданных требованиях к дальности связи и скорости передачи информации по обратному радиоканалу с учетом принятых ограничений на ЭИИМ абонентского радиооборудования. Полученные соотношения позволяют оценить пределы возможных значений этих системных параметров современных и перспективных систем сотовой связи, а также обеспечивают возможность обоснования требований к качеству обеспечения внутрисистемной электромагнитной совместимости при требуемой скорости передачи информации в обратных радиоканалах сетей сотовой связи и имеющихся ограничений на ЭИИМ абонентских станций.

Ключевые слова: сотовая связь, электромагнитное излучение, системные характеристики, внутрисистемная электромагнитная совместимость.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев В.И. Частотнонезависимые пределы значений системных параметров сотовой связи при интерференционном распространении радиоволн в городской застройке. Доклады БГУИР. 2019; 7–8(126): 117–124.

FREQUENCY-INDEPENDENT LIMITS OF VALUES OF SYSTEM PARAMETERS OF CELLULAR COMMUNICATIONS AT MULTIPATH PROPAGATION OF RADIO WAVES IN URBAN AREA

VLADIMIR I. MORDACHEV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Submitted 16 October 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. The analysis was carried out in order to clarify the estimates of the expected restrictions on characteristics of new-generation mobile communications (4G, 5G) under the existing restrictions on radiated power of subscriber radio equipment, as well as in conditions where the boundaries of urban sites are outside of the area of free radio waves propagation (RWP) between subscriber and base stations. Analysis was performed using the basic principles and ensemble models of statistical theory of electromagnetic environment, as well as the basic principles of information theory that determines the radio channel capacity in presence of interference. Frequency-independent relationships have been obtained for estimating a number of system parameters of cellular communications under the conditions of multipath RWP in urban canyons and the presence of internal system interference: estimation the required equivalent isotropic radiated power (EIRP) of subscriber stations, the maximum data transmission capacity of the backward radio channel, the maximum distance of qualitative communication, and also the permissible level of internal radio interference at given requirements for communication range, and the information transfer rate of reverse radio channel taking into account the accepted restrictions on EIRP of subscriber radio equipment. The obtained relations allow us to estimate the limits of possible values of these system parameters of modern and future mobile communications; these relations also provide the opportunity to justify the quality requirements for ensuring the intra-system electromagnetic compatibility at the required data rate in backward radio channels of cellular networks and the existing restrictions on EIRP of subscriber stations.

Keywords: cellular communications, electromagnetic radiation, system parameters, intrasystem electromagnetic compatibility.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Mordachev V.I. Frequency-independent limits of values of system parameters of cellular communications at multipath propagation of radio waves in urban area. Doklady BGUIR. 2019; 7–8(126): 117-124.

Введение

Резкое увеличение скоростей и объемов передачи данных по радиоканалам перспективных систем мобильной (сотовой) связи, несмотря на известные достижения в области повышения спектральной эффективности этих систем за счет совершенствования методов модуляции/демодуляции и кодирования/декодирования, а также за счет применения технологии MIMO, может быть причиной существенного усложнения электромагнитной обстановки, ухудшения электромагнитной экологии среды обитания и электромагнитной безопасности населения.

Данная проблема может быть существенно ослаблена за счет развития инфраструктуры этих систем с реализацией их полноценной иерархической структуры, обеспечивающей существенное уменьшение дальности радиосвязи при реализации высокоскоростной передачи данных. Последнее возможно только в условиях существенного уменьшения размеров сайтов в сотовых радиосетях за счет уменьшения максимальной дальности радиосвязи в городских сайтах до 200–300 м и менее и использования на нижнем иерархическом уровне сетевой структуры пикосайтов с дальностью связи до 50 м, что согласуется с [1–3]. Однако это связано с весьма существенными затратами, вследствие чего развитие инфраструктуры сетей 4G (LTE), как правило, отстает от развития их абонентской базы и увеличения объемов сетевого трафика,

что приводит к ухудшению электромагнитной экологии в местах с высокой плотностью населения и снижению безопасности использования сотовой связи. Поэтому актуальным является обоснование ограничений на системные параметры сетей 4G/5G, позволяющих сформулировать требования к характеристикам и темпам совершенствования инфраструктуры этих сетей для обеспечения их безопасности и экологичности в процессе их развития.

Важнейшим параметром этих сетей является предельная дальность связи по обратному радиоканалу при его различных характеристиках в условиях ограничений на ЭИИМ абонентских станций (АС) сотовой связи. В [4, 5] выполнен анализ этой проблемы в предположении, что предельная дальность высокоскоростной передачи данных по обратному каналу соизмерима с радиусом области свободного распространения радиоволн (РРВ) между базовыми станциями (БС) и АС. Однако последующий анализ проблемы выявил целесообразность расширения полученных результатов на область интерференционного РРВ, характерного для РРВ в городских каньонах, образуемых в условиях плотной городской застройки параллельными рядами зданий, при наблюдаемом снижении высот подвеса антенн БС в целях снижения уровней внутрисетевых помех за счет экранирующего действия зданий, при котором вклад от РРВ над их крышами оказывается незначительным.

Цель данной работы – оценка ожидаемых ограничений на характеристики сотовой связи новых поколений (4G, 5G) при существующих ограничениях на ЭИИМ АС, а также применительно к условиям, когда границы городских сайтов (микросайтов по классификации [1–3]) лежат за пределами области свободного РРВ между АС и БС.

Исходные модели и соотношения

При интерференционном (многолучевом) РРВ в каньонах городской застройки, характерном при расстояниях между БС и АС, превышающих размеры R_{BP} области свободного РРВ (или так называемого «breakpoint distance»), в [1] рекомендована «вилочная» оценка потерь при РРВ L_t в этих условиях с использованием следующих соотношений:

$$L_t = L_{to} = \frac{16\pi^2 d^4}{\lambda^2 G_{BS} R_{BP}^2}, \quad L_t = L_{tp} = \frac{1600\pi^2 d^4}{\lambda^2 G_{BS} R_{BP}^2}, \quad L_t = L_{tm} = \frac{64\pi^2 d^4}{\lambda^2 G_{BS} R_{BP}^2}; \quad (1.1)$$

$$d \geq R_{BP}, \quad R_{BP} = \frac{4H_{eBS}H_{eMS}}{\lambda}, \quad (1.2)$$

где d – расстояние между АС и БС, м; λ – длина волны, м; G_{BS} – коэффициент усиления антенны БС, ед.; R_{BP} – условная граница области значений расстояния между БС и АС (breakpoint distance), за пределами которой затухание существенно возрастает за счет многолучевости; H_{eBS} и H_{eMS} – значения эквивалентной высоты антенн БС и АС соответственно над подстилающей (отражающей радиоволны) поверхностью (земной, стен зданий и т. п.), м; L_{to} соответствует нижней границе возможных значений (оптимистической оценке) потерь для АС, удаленных от БС на расстояния $d \geq R_{BP}$, L_{tp} соответствует верхней границе возможных значений (пессимистической оценке) этих потерь, взятой с запасом 20 дБ на замирания; L_{tm} – медианное значение потерь при РРВ между БС и АС в рассматриваемых условиях.

Требуемая минимальная ЭИИМ АС P_{MSR} (с близким к единице коэффициентом усиления антенны), при которой обеспечивается необходимая скорость передачи данных по обратному радиоканалу БС, для которого характерны близкие к потенциальной пропускная способность C_P , бит/с, и спектральная эффективность передачи информации S_{EP} , бит/с/Гц, связана с затуханием L_t , ед., при РРВ от АС к БС следующим образом [4, 5]:

$$P_{MSR} = N_{\Sigma} C_P L_t \frac{2^{S_{EP}} - 1}{S_{EP}}, \quad N_{\Sigma} = (K_{CC} + 1) P_{IN}, \quad K_{CC} = \frac{P_{INI}}{P_{IN}}, \quad P_{IN} = kT_0 K_N, \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град.; K_N – коэффициент шума радиоприемника, ед.; T_0 – температура окружающей среды, град ($T_0 = 290$ К); K_{CC} – коэффициент, характеризующий создаваемое в радиосети превышение уровнем внутрисетевой помехи

уровня теплового шума и представляющий собой отношение уровней внутрисетевой помехи и собственного шума приемника, ед. ($K_{CC} \geq 3 \div 5$).

Соотношение (2) может быть использовано для оценок системных характеристик современных (2G, 3G, 4G) и перспективных (5G) технологий сотовой связи, поскольку ожидаемое увеличение спектральной эффективности в радиоканалах 4G (LTE) и 5G за счет технологии MIMO в 2–8 раз [3 и др.] позволяет сделать заключение [4, 5], что применение этой технологии позволяет лишь фактически скомпенсировать неидеальность процессов модуляции/демодуляции и кодирования-декодирования. Поэтому оценка ожидаемых ограничений на характеристики сотовой связи в условиях интерференционного РРВ может выполняться в предположении, что скорость передачи данных в радиоканалах перспективных систем сотовой связи близка к потенциальной.

Подстановка одного из значений (1.1) в соотношение (2) позволяет:

– связать необходимое значение P_{MSR} , необходимое для обеспечения качественной связи на расстоянии d , либо оценить предельную дальность d высококачественной связи при заданной ЭИИМ P_{MSR} (подстановкой L_{ip});

– оценить расстояние радиовидимости d АС с ЭИИМ P_{MSR} при благоприятных (оптимистических) условиях РРВ из точки подвеса (фазового центра) приемной антенны БС (подстановкой L_{io});

– реализовать процедуру оценивания совокупного уровня внутрисетевых помех на территории сайта как суммы медианных значений интенсивности электромагнитных полей от БС соседних сайтов (использованием соотношения для медианных потерь L_{im}).

Результаты анализа

В результате указанных подстановок получены следующие соотношения для верхней границы L_{ip} значений затухания при РРВ в каньонах городской застройки и для верхней границы P_{MSRp} значений требуемой ЭИИМ АС, при которой в данных условиях РРВ ($d \geq R_{BP}$) обеспечивается необходимая скорость передачи данных по обратному радиоканалу БС:

$$L_{ip} = \frac{100\pi^2 d^4}{G_{BS} H_{eBS}^2 H_{eMS}^2}, \quad d > R_{BP}; \quad (3.1)$$

$$P_{MSRp} = \frac{100\pi^2 d^4 C_P (K_{CC} + 1) kT_0 K_N (2^{S_{EP}} - 1)}{G_{BS} H_{eBS}^2 H_{eMS}^2 S_{EP}}, \quad d > R_{BP}. \quad (3.2)$$

Обращением (3.2) могут также быть получены следующие аналитические зависимости:

– соотношение для граничной дальности d_{max} качественной (вследствие присутствия в (3.1) поправки 20 дБ на замирания) радиосвязи при заданной ЭИИМ АС P_{MSR} :

$$d_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_{MSR} G_{BS} H_{eBS}^2 H_{eMS}^2 S_{EP}}{100\pi^2 C_P (K_{CC} + 1) kT_0 K_N (2^{S_{EP}} - 1)}}, \quad d_{max} > R_{BP}; \quad (3.3)$$

– зависимость предельной пропускной способности радиоканала C_{max} от дальности связи d при ограниченной ЭИИМ АС P_{MSR} :

$$C_{max} = \frac{P_{MSR} G_{BS} H_{eBS}^2 H_{eMS}^2 S_{EP}}{100\pi^2 d^4 (K_{CC} + 1) kT_0 K_N (2^{S_{EP}} - 1)}, \quad d > R_{BP}; \quad (3.4)$$

– зависимости предельно допустимого относительного уровня внутрисетевой помехи K_{CCp} от дальности радиосвязи с ЭИИМ АС P_{MSR} , при котором обеспечивается заданная пропускная способность радиоканала C_P :

$$K_{CCp} = \frac{P_{MSR} G_{BS} H_{eBS}^2 H_{eMS}^2 S_{EP}}{100\pi^2 d^4 C_P kT_0 K_N (2^{S_{EP}} - 1)} - 1, \quad d > R_{BP}. \quad (3.5)$$

В силу того, что в модель (3.1) интерференционных условий РРВ введена дополнительная поправка 20 дБ на замирания, полученные соотношения (3.2)–(3.5) обеспечивают пессимистическую оценку системных параметров сотовой радиосети с высокими уровнями полезного сигнала АС, обеспечивающими достаточно высокое качество связи.

Применительно к другим видам оценок, выполняемых при анализе межсистемной электромагнитной совместимости (ЭМС) сотовых радиосетей, интерес представляют следующие соотношения:

– соотношения для нижней границы L_{lo} значений затухания при РРВ в каньонах городской застройки и нижней границы P_{MSRo} значений требуемой ЭИИМ АС, при которой в этих условиях РРВ обеспечивается пропускная способность C_P обратного радиоканала БС:

$$L_{lo} = \frac{\pi^2 d^4}{G_{BS} H_{eBS}^2 H_{eMS}^2}, \quad d > R_{BP}; \quad (4.1)$$

$$P_{MSRo} = \frac{\pi^2 d^4 C_P (K_{CC} + 1) k T_0 K_N (2^{S_{EP}} - 1)}{G_{BS} H_{eBS}^2 H_{eMS}^2 S_{EP}}, \quad d > R_{BP}; \quad (4.2)$$

– соотношения для медианных значений L_{tm} затухания при РРВ в каньонах городской застройки и медианных значений P_{MSRm} требуемой ЭИИМ АС, при которой в этих условиях РРВ обеспечивается пропускная способность C_P обратного радиоканала БС:

$$L_{tm} = \frac{4\pi^2 d^4}{G_{BS} H_{eBS}^2 H_{eMS}^2}, \quad d > R_{BP}; \quad (5.1)$$

$$P_{MSRm} = \frac{4\pi^2 d^4 C_P (K_{CC} + 1) k T_0 K_N (2^{S_{EP}} - 1)}{G_{BS} H_{eBS}^2 H_{eMS}^2 S_{EP}}, \quad d > R_{BP}. \quad (5.2)$$

Очень важным обстоятельством является независимость приведенных выше соотношений от частоты (за исключением границ $d \geq R_{BP}$, $d_{max} \geq R_{BP}$ их областей определения), что позволяет определить ряд базовых зависимостей и ограничений, справедливых для всех диапазонов частот сотовой связи.

На рис. 1–6 приведены семейства кривых (2), (3.2), (3.4), (3.5), полученных расчетным путем для $S_{EP} = 5$, $K_N = 5$, $T_0 = 293$ К, $G_{BS} = 50$, $H_{MS} = 1,5$ м.

На рис. 1 приведены характерные расчетные зависимости $P_{MSR}(d)$, полученные с использованием (2) и пессимистической модели РРВ [1] в городских каньонах, включающей модель (3.1) для области интерференционного РРВ ($d \geq R_{BP}$) и модель РРВ в свободном пространстве с запасом 20 дБ на замирания для внутренней области ($d < R_{BP}$). Эти зависимости получены для ряда используемых и обсуждаемых для использования системами сотовой связи полос частот: для $\lambda = 0,67$ м (450 МГц, линия 1), $\lambda = 0,5$ м (600 МГц, линия 2), $\lambda = 0,33$ м (900 МГц, линия 3), $\lambda = 0,17$ м (1,8 ГГц, линия 4) и $\lambda = 0,11$ м (2,7 ГГц, линия 5); они рассчитаны для $C_P = 100$ Мбит/с, $K_{CC} = 10$ и $H_{eBS} = 10$ м. Нетрудно убедиться в наличии частотнонезависимой асимптоты, ограничивающей возможности уменьшения необходимых уровней ЭИИМ АС при $d \geq R_{BP}$ за счет увеличения длины волны. Эта асимптота обозначена пунктирной линией и представляет собой зависимость $P_{MSRp}(d)$, рассчитанную с использованием (3.2) для тех же значений C_P , K_{CC} , S_{EP} , K_N , T_0 , G_{BS} , H_{eBS} , H_{MS} . Частотнозависимым является лишь положение $d = R_{BP}$ точек пересечения ветвей, соответствующих свободному и интерференционному РРВ.

На рис. 2 для аналогичных условий приведены расчетные зависимости $P_{MSRp}(d)$ для ряда значений эквивалентной высоты антенн БС над отражающей поверхностью: для $H_{eBS} = 5$ м (линия 1), $H_{eBS} = 10$ м (линия 2; эта кривая присутствует также на рис. 1 в качестве асимптоты), $H_{eBS} = 20$ м (линия 3), $H_{eBS} = 40$ м (линия 4), $H_{eBS} = 80$ м (линия 5).

На рис. 3 приведено семейство расчетных асимптотических зависимостей необходимой ЭИИМ АС для области $d \geq R_{BP}$ (3.2) от требуемой пропускной способности радиоканала C_P для различных уровней внутрисетевых помех: для $K_{CC} = 0$ (линия 1), $K_{CC} = 1$ (линия 2), $K_{CC} = 10$ (линия 3), $K_{CC} = 100$ (линия 4) и $K_{CC} = 1000$ (линия 5); они рассчитаны для $d = R_{BP} = 400$ м, $\lambda = 0,15$ м и $H_{eBS} = 10$ м. На рис. 4 приведено полученное для этих же условий семейство асимптотических зависимостей необходимой ЭИИМ АС для области $d \geq R_{BP}$ от относительного уровня внутрисетевых помех K_{CC} при различной пропускной способности радиоканала: для $C_P = 10^4$ (линия 1), $C_P = 10^5$ (линия 2), $C_P = 10^6$ (линия 3), $C_P = 10^7$ (линия 4), $C_P = 10^8$ (линия 5) и $C_P = 10^9$ (линия 6).

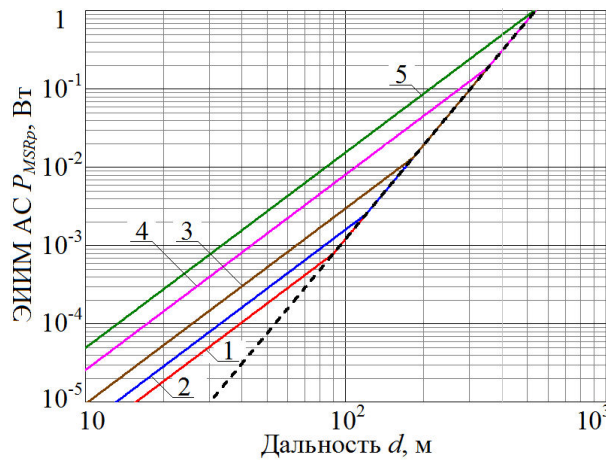


Рис. 1. Зависимости $P_{MSRp}(d)$ при свободном ($d < R_{BP}$) и интерференционном РРВ ($d \geq R_{BP}$) для различных диапазонов частот ($C_P = 100$ Мбит/с, $K_{CC} = 10$, $H_{eBS} = 10$ м)

Fig. 1. Dependencies $P_{MSRp}(d)$ for free-space RWP ($d < R_{BP}$) and for $d \geq R_{BP}$ for different frequency ranges ($C_P = 100$ Mbit/s, $K_{CC} = 10$, $H_{eBS} = 10$ м)

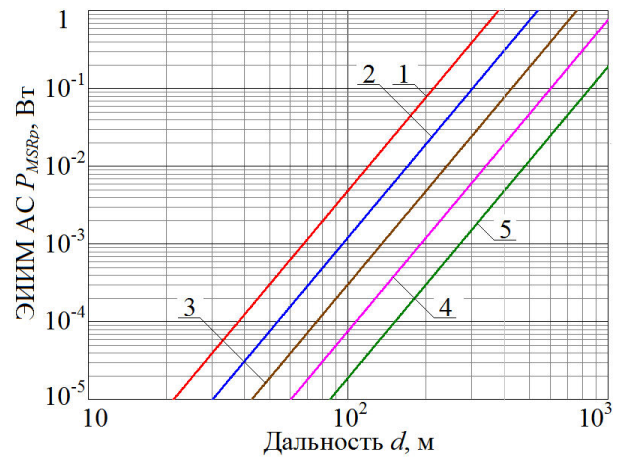


Рис. 2. Асимптоты $P_{MSRp}(d)$ для $d \geq R_{BP}$ (интерференционное РРВ) при различных высотах антенн БС над отражающей поверхностью ($C_P = 100$ Мбит/с, $K_{CC} = 10$)

Fig. 2. Asymptotes $P_{MSRp}(d)$ for $d \geq R_{BP}$ at different heights of BS antennas above the reflective surface ($C_P = 100$ Mbit/s, $K_{CC} = 10$)

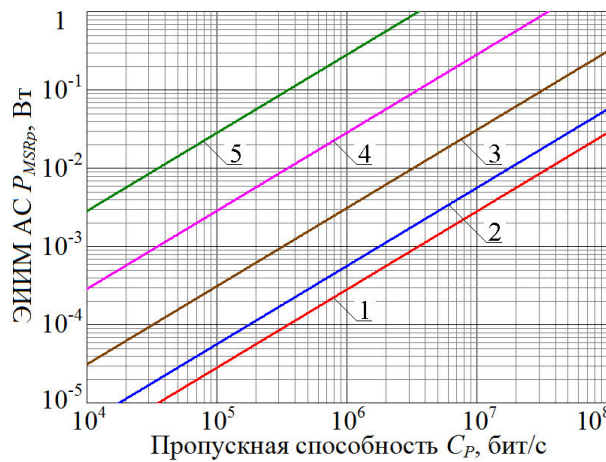


Рис. 3. Асимптоты $P_{MSRp}(C_P)$ при $d \geq R_{BP}$ для различных уровней внутрисетевых помех ($d = R_{BP} = 400$ м, $\lambda = 0,15$ м)

Fig. 3. Asymptotes $P_{MSRp}(C_P)$ for $d \geq R_{BP}$ at different levels of intranetwork interference ($d = R_{BP} = 400$ м, $\lambda = 0,15$ м)

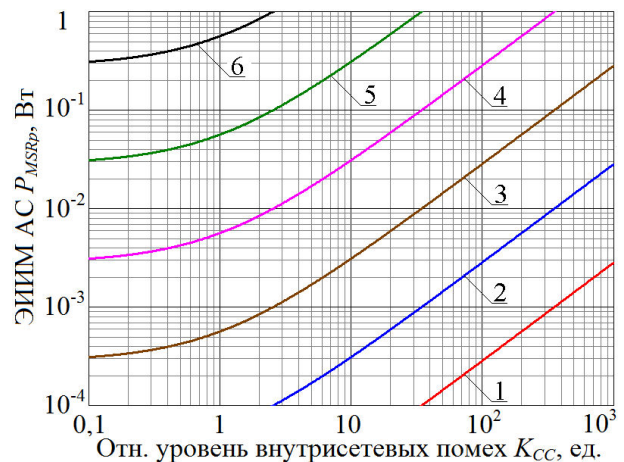


Рис. 4. Асимптоты $P_{MSRp}(K_{CC})$ при $d \geq R_{BP}$ для различной пропускной способности радиоканала ($d = R_{BP} = 400$ м, $\lambda = 0,15$ м)

Fig. 4. Asymptotes $P_{MSRp}(K_{CC})$ for $d \geq R_{BP}$ at different radio channel data rates ($d = R_{BP} = 400$ м, $\lambda = 0,15$ м)

Принимая во внимание, что уровни ЭИИМ АС, удовлетворяющие спецификациям современных и перспективных систем сотовой связи [6–8], ограничены значением 20–23 дБм (0,1–0,2 Вт), можно сделать следующие заключения, уточняющие выводы [4, 5]:

– на дальностях 200–400 м, примерно соответствующих радиусам микросот в городской застройке [1–3], каналы передачи речевой информации, имеющие относительно невысокую пропускную способность 10^4 – 10^5 бит/с, при соответствующих условиях допускают наличие в них высоких относительных уровней внутрисетевых помех ($K_{CC} \approx 100 \dots 1000$) без выхода на опасные уровни ЭИИМ АС;

– в этих же условиях электромагнитная безопасность АС по обратному радиоканалу высокоскоростной передачи данных со скоростями 10^8 – 10^9 бит/с требует существенного снижения относительного уровня внутрисетевых помех ($K_{CCp} \approx 3 \dots 30$) за счет резкого повышения качества обеспечения внутрисетевой ЭМС.

На рис. 5 приведено семейство расчетных асимптотических зависимостей (3.4) предельно возможной пропускной способности радиоканала от ЭИИМ АС $C_{\max}(P_{MSR})$ для области $d \geq R_{BP}$ для различной дальности связи: для $d = 200$ м (линия 1), $d = 400$ м (линия 2), $d = 800$ м (линия 3) и $d = 1600$ м (линия 4); они рассчитаны для $\lambda = 0,15$ м и $K_{CC} = 10$ м. На рис. 6 приведено полученное для этих же условий семейство «обращенных» асимптотических зависимостей (3.5) для области $d \geq R_{BP}$ предельно допустимого относительного уровня внутрисетевой помехи $K_{CCp}(C_{\max})$ от требуемой пропускной способности радиоканала для различной дальности связи: для $d = 200$ м (линия 1), $d = 400$ м (линия 2), $d = 800$ м (линия 3) и $d = 1600$ м (линия 4).

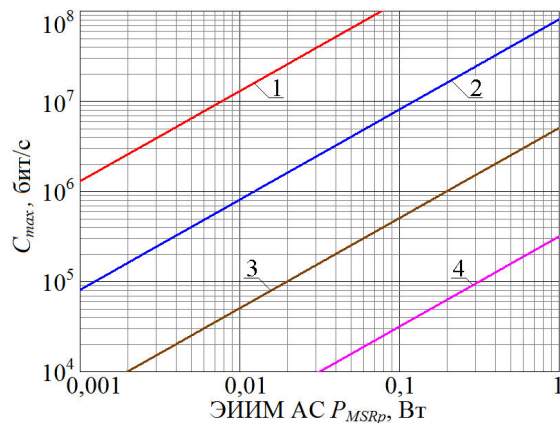


Рис. 5. Асимптоты $C_{\max}(P_{MSR})$ при $d \geq R_{BP}$ для различной дальности связи ($R_{BP} = 200$ м, $K_{CC} = 10$)
Fig. 5. Asymptotes $C_{\max}(P_{MSR})$ for $d \geq R_{BP}$ at different operating distance ($R_{BP} = 200$ м, $K_{CC} = 10$)

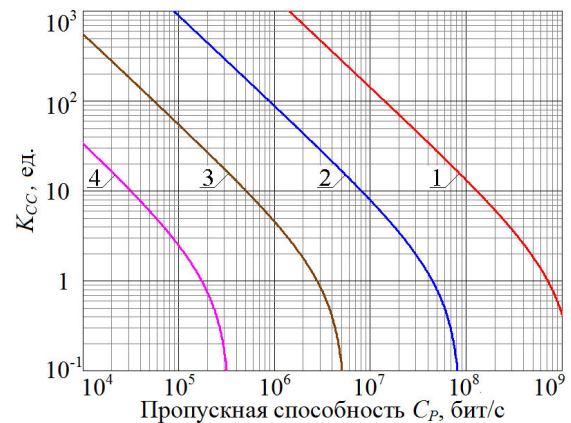


Рис. 6. Асимптоты $K_{CC}(C_p)$ при $d \geq R_{BP}$ для различной дальности связи ($P_{MSR} = 0,1$ Вт, $R_{BP} = 200$ м)
Fig. 4. Asymptotes $K_{CC}(C_p)$ for $d \geq R_{BP}$ at different operating distance ($P_{MSR} = 0.1$ W, $R_{BP} = 200$ м)

Принимая во внимание, что плотность БС сотовой связи может составлять до 10 микро-БС/км² и более в условиях города, до 1–3 БС/км² в условиях пригорода и до 0,1–0,2 БС/км² в условиях сельской местности [1–3], из анализа кривых, представленных на рис. 5, 6, можно сделать следующие выводы:

– в условиях города при максимальной дальности связи не более 200–400 м при принятых в [6–8] ограничениях на ЭИИМ АС высокое качество обеспечения внутрисистемной ЭМС ($K_{CC} \leq 10$) позволяет достичь скоростей передачи информации от АС к БС, декларируемых в [9] для систем 4G/5G;

– в условиях пригорода и сельской местности, где радиусы сайтов увеличиваются до 1–2 км, даже высокое качество обеспечения внутрисистемной ЭМС при принятых в [6–8] уровнях ЭИИМ АС не обеспечит скорость передачи данных от АС к БС выше 10^5 – 10^6 бит/с; в этих условиях существенное увеличение этой скорости возможно только за счет реализации иерархической структуры сотовой радиосети с использованием пико-БС в местах наиболее вероятного расположения АС – в специально организуемых локальных зонах обслуживания в зданиях, на объектах инфраструктуры, в средствах транспорта и т. п.;

– качество обеспечения внутрисистемной ЭМС, определяемое качеством частотно-пространственного планирования радиосетей сотовой связи и объемом используемого ими радиочастотного ресурса, имеет первостепенное значение с точки зрения обеспечения требуемого уровня важнейших системных характеристик современной и перспективной

сотовой связи, таких как ожидаемые высокие скорости передачи данных от АС к БС на дальностях, соответствующих размерам сайтов сотовых радиосетей в различных условиях (город, пригород, сельская местность), в условиях принятых ограничений на ЭИИМ АС.

Заключение

В данной работе приведены частотно-независимые асимптотические соотношения (3.2)–(3.5) для ряда системных параметров сотовой связи (L_{ip} , P_{MSRP} , d_{max} , C_{max} , K_{CCP}) в условиях многолучевого (интерференционного) РРВ в городских каньонах. Эти условия РРВ могут быть характерны для связи с АС, находящимися вблизи границ сайтов на удаленности $d \geq R_{BP}$ от БС. Существование этих асимптот обусловлено компенсацией частотной зависимости соотношений (1.1) при подстановке в них R_{BP} в форме (1.2). Полученные с использованием пессимистической ветви L_{ip} модели (1.1) затухания при РРВ в городских каньонах, использование которой в силу присутствия в (3.1) поправки 20 дБ на замирания соответствует условиям высокого качества связи, они оказываются адекватными для всех полос частот сотовой связи, для которых справедлива модель (1.1), (1.2).

Полученные соотношения (3.2)–(3.5) позволяют оценить пределы возможных значений системных параметров L_{ip} , P_{MSRP} , d_{max} , C_{max} , K_{CCP} современных и перспективных систем сотовой связи, а также обеспечивают возможность обоснования требований к качеству обеспечения внутрисистемной ЭМС исходя из имеющихся ограничений на ЭИИМ АС и требуемой скорости передачи информации в обратных радиоканалах сетей сотовой связи.

Список литературы / References

1. 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. Rec. ITU-R P.1411-9.
2. Methodology for the calculation of IMT-2000 terrestrial spectrum requirements. Rec. ITU-R M.1390 1.
3. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced. Report ITU-R M.2135-1.
4. Mordachev V. Electromagnetic safety of broadband systems of mobile communications of new generations. Doklady BGUIR. 2018;113(3):39-46 (in Russian).
5. Mordachev V. Restrictions on Wideband Systems of Mobile Communications of New Generations at Declared Expansion of Data Transfer Rates. Proc. of the 2018 Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2018), Amsterdam, The Netherlands, August 27-30, 2018;202-207.
6. ETSI EN 300 910, V8.5.1 (2001-11). Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+). Radio Transmission and Reception (GSM 05.05 version 8.5.1 Release 1999).
7. 3GPP TS 25.101 V15.2.0 (2018-03). 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; User Equipment (UE) radio transmission and reception (FDD) (Release 15).
8. ETSI TS 136 101 V14.3.0 (2017-04). LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 14.3.0 Release 14).
9. IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Rec. ITU-R M.2083-0.

Сведения об авторах

Мордачев В.И., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Mordachev V.I., PhD, associate professor, leading researcher, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-89-94;
e-mail: mordachev@bsuir.by, www.emc.bsuir.by
Мордачев Владимир Иванович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian State University of Informatics
and Radioelectronics
tel. +375-17-293-89-94;
e-mail: mordachev@bsuir.by, www.emc.bsuir.by
Mordachev Vladimir Ivanovich