

УДК 621.396.218:614.89.086.5

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ НОВЫХ ПОКОЛЕНИЙ

В.И. МОРДАЧЁВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 6 января 2018

Аннотация. Приведены оценки необходимой излучаемой мощности абонентских станций перспективных систем мобильной связи при декларируемом расширении полос частот радиоканалов и увеличении скоростей передачи данных по этим каналам. Получены соотношения для оценки дальности высокоскоростной передачи данных в городской застройке при заданном уровне излучаемой мощности абонентских станций. Исследовано влияние внутрисетевой электромагнитной совместимости на характеристики обратного канала передачи данных в перспективных системах мобильной связи.

Ключевые слова: мобильная связь, электромагнитная обстановка, электромагнитная безопасность, спектральная эффективность, внутрисетевая электромагнитная совместимость.

Abstract. Estimations of required radiated power of user's stations of next-generation systems of mobile communications are resulted at declared expansion of frequency bands and data transfer rates of radiochannels of these systems. Expressions for an estimation of distances of high-rate mobile data transmission in urban area are received at the accepted levels of radiated power of user's stations. Influence of intranetwork electromagnetic compatibility on characteristics of backward channel in next-generation systems of mobile communications is investigated.

Keywords: mobile communications, electromagnetic environment, electromagnetic safety, spectral efficiency, intranetwork electromagnetic compatibility.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 113, No. 3, pp. 39-46

Electromagnetic safety of broadband systems of mobile communications of new generations

V.I. Mordachev

Введение

Быстрая эволюция систем сотовой (мобильной) радиосвязи в направлении резкого увеличения доли услуг и декларируемого увеличения скоростей и объемов передачи данных как по прямым (от базовой (БС) к абонентской (АС) станциям), так и по обратным (от АС к БС) каналам связи до 5–10 Гбит/с и более, сопровождающаяся увеличением ширины полосы радиоканала до 10–40 МГц (системы 4G: LTE [1, 2]) и до 20–160 МГц (системы 5G [3–5] при их интеграции с сетями WLAN [6]), несмотря на известные достижения в области повышения спектральной эффективности систем мобильной связи, в том числе за счет применения технологии MIMO, чревата катастрофическими последствиями с точки зрения электромагнитной экологии среды обитания и электромагнитной безопасности населения.

Электромагнитное излучение (ЭМИ) АС является источником опасности для здоровья населения. Принятый в настоящее время практический критерий экспериментальной оценки опасности ЭМИ АС, основанный на измерениях контролируемых уровней плотности потока энергии ЭМИ подвижных АС мобильной связи [7], позволяет считать безопасным мощность ЭМИ АС не более 50–55 мВт при максимальной мощности ЭМИ АС сотовой связи стандартов GSM, UMTS, LTE в пределах 0,1–0,25 Вт. Планируемое резкое увеличение скоростей передачи

информации по обратному каналу в системах 4G, 5G сопряжено с существенным увеличением необходимой мощности ЭМИ АС и, как следствие, недопустимым увеличением экологических рисков для населения.

Цель данной работы – оценка ожидаемых ограничений на характеристики мобильной (сотовой) связи новых поколений (4G, 5G) в условиях сохранения ограничений на мощность ЭМИ АС при декларируемом расширении полос частот радиоканалов и увеличении скоростей передачи данных по этим каналам.

Базовые модели и соотношения

В соответствии с фундаментальной теоремой Шеннона – Хартли [8] потенциальная пропускная способность C_P [бит/с] канала, означающая теоретическую верхнюю границу скорости передачи данных через аналоговый канал связи, подверженный аддитивному белому гауссовскому шуму мощности N , со средней мощностью сигнала S равна

$$C_P = \Delta F \cdot \log_2(1 + SNR), \quad SNR = S/N, \quad (1)$$

где ΔF – полоса пропускания канала, Гц; S – полная мощность сигнала в полосе ΔF , Вт; N – полная мощность шума в полосе ΔF , Вт; SNR – отношение «сигнал/шум» (signal-to-noise ratio) в канале связи.

Для радиоканала: если спектр радиосигнала мощностью S_R близок к прямоугольному, его ширина соответствует ширине ΔF_R полосы пропускания радиоканала и его спектральную плотность мощности $S_0 \approx S_R/\Delta F_R$ [Вт/Гц] в полосе ΔF_R в первом приближении можно считать постоянной, то при постоянной спектральной плотности мощности шума $N_0 \approx N/\Delta F_R$ [Вт/Гц] (что справедливо для собственного шума приемника, а также может быть принято справедливым в начальном приближении для спектральной плотности N_{INT} внутрисетевых помех в радиоканалах сотовой связи 2G, 3G, 4G, 5G ... и в частотных каналах систем беспроводного широкополосного доступа Wi-Fi, WiMAX) выражение для потенциальной пропускной способности радиоканала может быть приведено к следующему виду:

$$C_P \approx \Delta F_R \cdot \log_2(1 + CNR), \quad CNR = S_0/N_0, \quad S_{EP} = C_P/\Delta F_R \approx \log_2(1 + CNR), \quad (2)$$

где S_{EP} [бит/с/Гц] – потенциальная спектральная эффективность передачи информации в канале связи, CNR – отношение «сигнал/шум» в радиоканале (carrier-to-noise ratio).

Далее, из (2) определим минимальную мощность полезного сигнала P_{DSN} в радиоканале (на входе радиоприемника), при которой обеспечивается пропускная способность C_P канала, если шум в канале представляет собой внутренний тепловой шум приемника:

$$P_{DSN} = \Delta F_R N_0 (2^{S_{EP}} - 1). \quad (3)$$

Реальная скорость C_R передачи информации в канале связи в m раз меньше потенциальной пропускной способности канала C_P ; во столько же раз реальная спектральная эффективность S_{ER} передачи информации в канале меньше потенциальной:

$$C_P = m C_R, \quad S_{ER} = S_{EP}/m. \quad (4)$$

В современных системах связи различием ширины ΔF_N шумовой полосы частот канала и его стандартной полосы частот ΔF_R можно пренебречь: $\Delta F_N \approx \Delta F_R$. Спектральная плотность мощности теплового шума в канале определяется известным соотношением [9]:

$$N_0 = k T_0 K_N, \quad (5)$$

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).

Таким образом, минимальная мощность полезного сигнала P_{DSN} , передаваемого со спектральной эффективностью $S_{ER} = S_{EP}/m$ по радиоканалу с тепловым шумом спектральной плотностью N_0 , будет равна

$$P_{DSN} = S_0 \cdot \Delta F_R = \Delta F_R k T_0 K_N (2^{m S_{ER}} - 1). \quad (6)$$

Если предметом исследований является система сотовой связи, в которой шум в радиоканале определяется уровнем внутрисетевой помехи $P_{INT} = N \cdot K_{CC}$, где коэффициент $K_{CC} \approx N_{INT}/N_0$ характеризует создаваемое превышение уровнем внутрисетевой помехи уровня теплового шума ($K_{CC} \geq 3 \div 5$), то в предположении, что свойства внутрисетевой помехи близки

к свойствам гауссовского шума и различиями влияния внутрисетевой помехи и теплового шума одинаковой мощности на пропускную способность радиоканала можно пренебречь, можно записать соотношение для минимальной мощности полезного сигнала P_{DSIN} в радиоканале с тепловым шумом и внутрисетевой помехой (реальной чувствительности радиоприема):

$$P_{DSIN} = (K_{CC} + 1)P_{SDN} = N_{\Sigma} \Delta F_R (2^{mS_{ER}} - 1), \quad N_{\Sigma} = (K_{CC} + 1)kT_0 K_N = \text{const}. \quad (7)$$

Очевидно, что множитель m позволяет характеризовать как соотношение потенциальной и реально достижимой спектральной эффективности радиоканала, так и вклад технологии MIMO в повышение спектральной эффективности передачи информации по радиоканалу; в последнем случае m может быть меньше 1.

В порядке проверки рассмотрим радиоканал GSM, в котором принимаются 8 каналов трафика с их временным разделением в радиоприемнике. Для этого радиоканала ($\Delta F_R = 200$ кГц, $C_R = 2^{18} = 262144$ бит/с, $SNR_R = 9$ дБ) при $K_N = 5$, $T_0 = 290$ К, $K_{CC} = 0$ (учитывается только собственный шум приемника) получим: $P_{SDN} = \Delta F_R \cdot k \cdot T_0 \cdot K_N \cdot SNR_R = 2 \cdot 10^5 \cdot 1,38 \cdot 10^{23} \cdot 290 \cdot 5 \cdot 8 \approx 3,2 \cdot 10^{-14} = -135$ дБВт = -105 дБм. Это значение соответствует значениям чувствительности радиоприема АС и БС GSM (-104...-105 дБм), приведенным в [10]. В приведенной ниже табл. 2 случаю $\Delta F_R = 200$ кГц, $K_{CC} = 0$ соответствует значение $P_{DSIN} = -129$ дБВт, т. е. на 6 дБ больше. Это объясняется тем, что расчеты сделаны для значения $CNR = 15$ дБ (что соответствует значению $S_{EP} = 5$), что на 6 дБ больше использованного в проверочных расчетах порогового значения $CNR = 9$ дБ. Далее, используя (5), оценим уровень собственного шума радиоприемника GSM, приведенного ко входу: $P_N = \Delta F_R \cdot k \cdot T_0 \cdot K_N = 2 \cdot 10^5 \cdot 1,38 \cdot 10^{23} \cdot 290 \cdot 5 \approx 4 \cdot 10^{-15} = -144$ дБВт = -114 дБм. Полученное значение P_N на величину $CNR = 9$ дБ меньше полученной выше величины P_{SDN} . При этом значению $CNR = 9$ дБ соответствует потенциальная спектральная эффективность $S_{EP} = 3,16$ (что следует из (2), (3)). Реальная спектральная эффективность передачи информации в радиоканале GSM равна $S_{ER} = C_R / \Delta F_R = 1,31$, так что коэффициент неидеальности $m = S_{EP} / S_{ER} \approx 2,4$.

Результаты анализа

Приведенные выше соотношения позволяют обратить внимание на следующее:

- увеличение скорости передачи информации по радиоканалу за счет расширения его полосы частот увеличивает уровень собственного шума, приведенного ко входу приемника, что снижает реальную чувствительность радиоприема и при сохранении прежней дальности передачи информации увеличивает необходимую эквивалентную изотропно излучаемую мощность (ЭИИМ) радиопередатчика;

- расширение полос частот радиоканалов до 10–20 МГц и более в условиях выделения для мобильной связи отдельных относительно узких полос частот резко снижает число используемых частотных каналов и возможности снижения уровней внутрисетевых помех за счет частотно-территориального планирования; в результате следует ожидать, что в (7) значение параметра K_{CC} , характеризующего внутрисетевую ЭМС сетей 4G&5G, будет не ниже, чем в сетях 2G, 3G, что, в свою очередь, также связано с ухудшением реальной чувствительности радиоприема и увеличением необходимой ЭИИМ передатчиков;

- увеличение спектральной эффективности радиоканала в целях увеличения его пропускной способности возможно как за счет совершенствования методов модуляции/демодуляции и кодирования/декодирования, а также применения технологии MIMO (что обеспечивается на стадии разработки системы), так и за счет прямого увеличения значения отношения «радиосигнал/(шум + радиопомеха)» $CNIR = P_{SDIN} / (N + P_{INT})$ (carrier-to-noise-plus-interference ratio) операторами связи при планировании и эксплуатации сети. Это увеличение связано с ограничением уровней внутрисетевых помех при существенном росте минимального уровня полезного сигнала за счет увеличения ЭИИМ радиопередатчиков.

Ниже в табл. 1 приведены результаты расчетов, иллюстрирующие количественную связь между $CNIR$, S_{EP} и C_P . Расчетные значения минимально необходимой мощности полезного сигнала P_{DSIN} при $0 \leq K_{CC} \leq 1000$, $m = 1$, $K_N = 5$ для ряда типовых значений ширины

полосы частот канала сотовой связи, наглядно иллюстрирующие рост эквивалентного уровня шума в радиоканале сотовой связи с расширением его полосы частот, приведены в табл. 2.

Декларируемое увеличение спектральной эффективности в радиоканалах LTE за счет технологии MIMO в 2–8 раз [1, 2] позволяет сделать заключение, что на современном этапе развития мобильной связи применение указанной технологии позволяет лишь фактически скомпенсировать неидеальность процессов модуляции/демодуляции и кодирования-декодирования (в радиоканалах сотовой связи без использования технологии MIMO $m \approx 2 \dots 10$ [11]); в этом случае значение m снижается до значения, близкого к единице. Поэтому дальнейший анализ будет выполнен для $m = 1$ в предположении, что скорость передачи данных C в радиоканале сотовой связи близка к потенциальной в определении (1): $C \approx C_P$:

$$P_{SDIN} = N_{\Sigma} C_P (2^{S_{EP}} - 1) / S_{EP}, \quad N_{\Sigma} = (K_{CC} + 1) k T_0 N_N = const. \quad (8)$$

Таким образом, при заданной потенциальной спектральной эффективности, прямо связанной с величиной $CNIR$, максимальная скорость передачи данных в рассматриваемом радиоканале определяется шириной полосы частот канала и суммарным уровнем собственного шума и внутрисетевых помех в этом канале. Расчетные данные пороговой чувствительности P_{SDIN} радиоприема для $m = 1$, $SNR = 15$ дБ ($S_{EP} = 5$) при различных K_{CC} приведены в табл. 3.

Таблица 1. Значения потенциальных спектральной эффективности и пропускной способности радиоканала при различных значениях $CNIR$

$CNIR$, дБ	S_{EP} , ед.	Пропускная способность радиоканала C_P , Мбит/с					
		$\Delta F_R = 5$ МГц	$\Delta F_R = 10$ МГц	$\Delta F_R = 20$ МГц	$\Delta F_R = 40$ МГц	$\Delta F_R = 80$ МГц	$\Delta F = 160$ МГц
10	3,46	17,3	34,6	69,2	138	277	554
20	6,66	33,3	66,6	133	266	533	1066
30	9,97	50,0	100	199	399	798	1595
40	13,3	66,5	133	256	532	1063	2126
50	16,6	83,0	166	332	664	1329	2658
60	19,9	99,6	199	398	797	1594	3188

Таблица 2. Расчетные значения минимально необходимой мощности полезного сигнала в радиоканале при различных уровнях внутрисетевых помех и $m = 1$, $CNIR = 15$ дБ ($S_{EP} = 5$)

ΔF_R , МГц	P_{SDIN} , дБВт				
	$K_{CC} = 0$	$K_{CC} = 1$	$K_{CC} = 10$	$K_{CC} = 100$	$K_{CC} = 1000$
0,025	-138,0	-135,0	-127,6	-118,0	-108,0
0,2	-129,0	-126,0	-118,6	-109,0	-99,0
5,0	-115,0	-112,0	-104,6	-95,0	-85,0
20	-109,0	-106,0	-98,6	-89,0	-79,0
80	-103,0	-100,0	-92,6	-83,0	-73,0

Таблица 3. Расчетные значения пороговой чувствительности радиоприема при различной скорости передачи данных и различных соотношениях уровней внутрисетевых помех и собственного шума радиоприемника

C , Мбит/с	P_{SDIN} , дБВт				
	$K_{CC} = 0$	$K_{CC} = 1$	$K_{CC} = 10$	$K_{CC} = 100$	$K_{CC} = 1000$
0,032	-143,9	-140,9	-133,5	-123,8	-113,9
0,512	-131,8	-128,8	-121,4	-111,8	-101,8
2	-125,8	-122,8	-115,4	-105,8	-95,8
32	-113,8	-110,8	-103,3	-93,7	-83,8
512	-101,7	-98,7	-91,3	-81,7	-71,7

Требуемая минимальная мощность P_{MSR} ненаправленного ЭМИ АС с близким к единице коэффициентом усиления антенны, при котором обеспечивается необходимая скорость передачи данных по обратному каналу, связана с затуханием L_t при распространении радиоволн (РРВ) от АС к БС следующим образом:

$$P_{MSR} = L_t P_{SDIN} = N_{\Sigma} C_P L_t (2^{S_{EP}} - 1) / S_{EP}, \quad N_{\Sigma} = (K_{CC} + 1) k T_0 K_N = const. \quad (9)$$

В этом соотношении необходимо использовать пессимистическую оценку затухания L_t , учитывающую влияние городской застройки и необходимость обеспечения высокого качества связи, в частности, использовать следующую пессимистическую модель условий РРВ (формула (3) в [12]), учитывающую многолучевость РРВ в этих условиях:

$$L_t = \begin{cases} 1600\pi^2 d^{2.5} / (\lambda^2 G_{BS} R_{BP}^{0.5}), & d \leq R_{BP}; \\ 1600\pi^2 d^4 / (\lambda^2 G_{BS} R_{BP}^2), & d > R_{BP}; \end{cases} \quad R_{BP} = 4H_{eBS}H_{eMS} / \lambda, \quad (10)$$

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 антенны над подстилающей поверхностью (земной, стен зданий и т. п.) для БС и АС соответственно, м.

Используя модель (10), можно получить соотношение для оценки максимально допустимого размера соты (максимальной дальности связи) R_{MAX} в городской застройке для заданного уровня ЭИИМ P_{MS} АС:

$$R_{MAX} = \begin{cases} \left(\frac{P_{MS} S_{EP} \lambda^2 G_{BS} R_{BP}^{0.5}}{1600\pi^2 (K_{CC} + 1) k T_0 K_N C_P (2^{S_{EP}} - 1)} \right)^{0.4}, & R_{MAX} \leq R_{BP}; \\ \left(\frac{P_{MS} S_{EP} \lambda^2 G_{BS} R_{BP}^2}{1600\pi^2 (K_{CC} + 1) k T_0 K_N C_P (2^{S_{EP}} - 1)} \right)^{0.25}, & R_{MAX} > R_{BP}. \end{cases} \quad (11)$$

На рис. 1 приведены расчетные зависимости $P_{MSR}(d)$ для значений $K_{CC} = 0$ (линия 1), $K_{CC} = 1$ (линия 2), $K_{CC} = 10$ (линия 3), $K_{CC} = 100$ (линия 4) и $K_{CC} = 1000$ (линия 5), полученные для $C_P = 1$ Гбит/с, $S_{EP} = 5$, $K_N = 5$, $T_0 = 293$ К, $G_{BS} = 50$ (17 дБ), а также в предположении, что эквивалентные высоты антенн БС и АС по отношению к отражающей поверхности (отражение от стен зданий) составляют $H_{eBS} = 5$ м, $H_{eMS} = 1,5$ м ($R_{BP} = 200$ м); $\lambda = 0,15$ м (2 ГГц). На рис. 2 приведены те же зависимости, но для скорости передачи данных в обратном канале $C_P = 10$ Гбит/с. С учетом того, что в современных сотовых радиосетях ЭИИМ АС ограничена на уровне 100–250 мВт, а уровень внутрисетевых помех существенно превышает уровень собственного шума радиоприемника, что соответствует $K_{CC} = 10 \dots 1000$, из приведенных графиков следует вывод:

– декларируемые для систем 5G скорости передачи данных от АС к БС до 5 Гбит/с при безопасных уровнях мощности ЭМИ АС могут быть реализованы только на малые расстояния (не более 10–20 м, так как в БС пикосайтов коэффициенты усиления антенн существенно меньше, чем в БС мини- и макросайтов);

– передача данных в обратном канале БС, обслуживающих сайты радиусом несколько сотен метров (микросайты в определении [12]), с подобными скоростями требует ЭИИМ АС от единиц до десятков ватт, что существенно выходит за рамки приемлемого с точки зрения электромагнитной безопасности и электромагнитной экологии, и требует использования внешних точек доступа с направленными антеннами, вынесенными за пределы помещений.

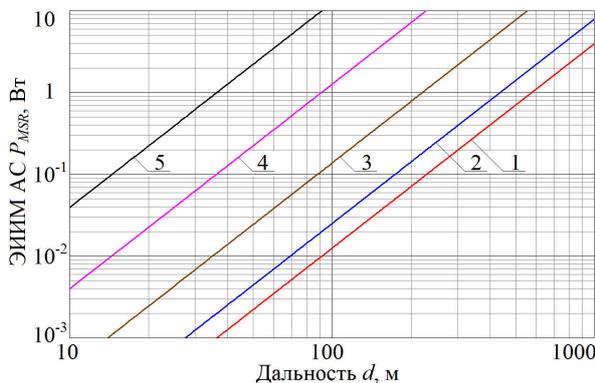


Рис. 1. Зависимости $P_{MSR}(d)$ для $C_P = 1$ Гбит/с, полученные для различных значений K_{CC} при $S_{EP} = 5$, $K_N = 5$, $T_0 = 293$ К, $G_{BS} = 50$, $R_{BP} = 200$ м ($H_{eBS} = 5$ м, $H_{eMS} = 1,5$ м) для $\lambda = 0,15$ м (2 ГГц)

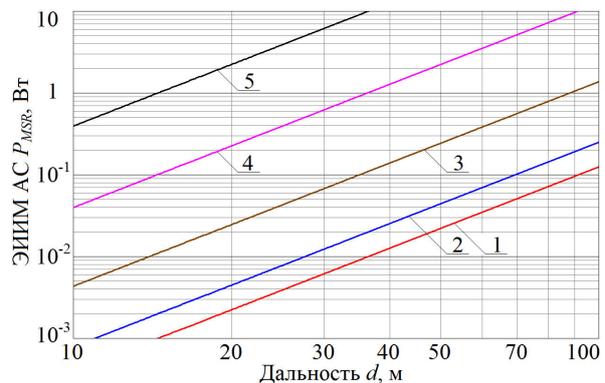


Рис. 2. Зависимости $P_{MSR}(d)$ для $C_P = 10$ Гбит/с, полученные для различных значений K_{CC} при $S_{EP} = 5$, $K_N = 5$, $T_0 = 293$ К, $G_{BS} = 50$, $R_{BP} = 200$ м ($H_{eBS} = 5$ м, $H_{eMS} = 1,5$ м) для $\lambda = 0,15$ м (2 ГГц)

На рис. 3 приведены расчетные зависимости $P_{MSR}(d)$ для значений $C_P = 1$ Мбит/с (линия 1), $C_P = 10$ Мбит/с (линия 2), $C_P = 100$ Мбит/с (линия 3), $C_P = 1$ Гбит/с (линия 4) и $C_P = 10$ Гбит/с

(линия 5), полученные для $K_{CC} = 10$ (внутрисетевая помеха превышает собственный шум приемника на 10 дБ) при прочих параметрах (9), (10), аналогичных принятым при расчете кривых на рис. 1 и рис. 2. Эти зависимости убедительно свидетельствуют о том, что передача данных по обратному каналу даже в микросайтах радиусом несколько сотен метров со скоростями порядка 1–10 Мбит/с, характерными для систем UMTS и систем LTE на ранних стадиях развития инфраструктуры возможна только при высоком качестве частотно-территориального планирования сетей, обеспечивающего ограничение внутрисетевых помех на уровне $K_{CC} \leq 10$ дБ.

На рис. 4 приведены расчетные зависимости $P_{MSR}(d)$ для ряда используемых и обсуждаемых для использования системами мобильной связи диапазонов 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), полученные для $C_P = 1$ Гбит/с и $K_{CC} = 10$ при прочих параметрах (9), (10), аналогичных принятым при расчете кривых на рис. 1–3. На рис. 5 приведены те же зависимости, но для $H_{eBS} = 30$ м, что существенно расширяет границы применимости верхней ветви модели (10) условий РРВ для каждой из рассматриваемых полос частот. Приведенные на этих рисунках зависимости убедительно свидетельствуют о том, что:

- декларируемые для перспективных широкополосных систем мобильной связи скорости передачи данных по обратному каналу могут быть реализованы на сотни метров (в микросайтах) с безопасными уровнями ЭИИМ АС только в нижней части дециметрового диапазона волн, где выделение для передачи данных с такой скоростью полос частот требуемой ширины практически невозможно в связи с интенсивным использованием этой части радиочастотного спектра другими радиослужбами;

- использование для этих целей в перспективных системах мобильной связи 4 и 5 поколений полос частот в верхней части дециметрового диапазона и в сантиметровом диапазоне также требует ЭИИМ АС от единиц до десятков ватт, что существенно выходит за рамки приемлемого с точки зрения электромагнитной безопасности и электромагнитной экологии и требует использования внешних точек доступа с направленными антеннами, вынесенными за пределы помещений.

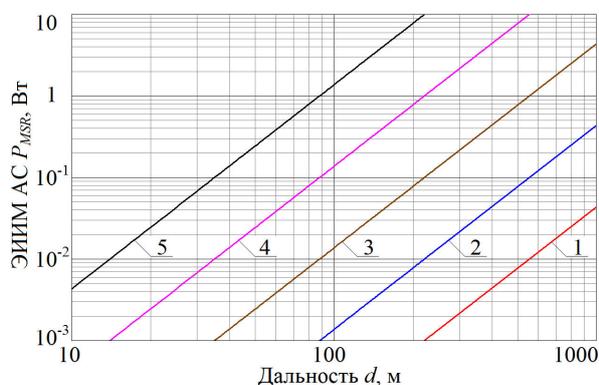


Рис. 3. Зависимости $P_{MSR}(d)$ для $K_{CC} = 10$, полученные для различных значений C_P при $S_{EP} = 5$, $K_N = 5$, $T_0 = 293$ К, $G_{BS} = 50$, $R_{BP} = 200$ м ($H_{eBS} = 5$ м, $H_{eMS} = 1,5$ м) для $\lambda = 0,15$ м (2 ГГц)

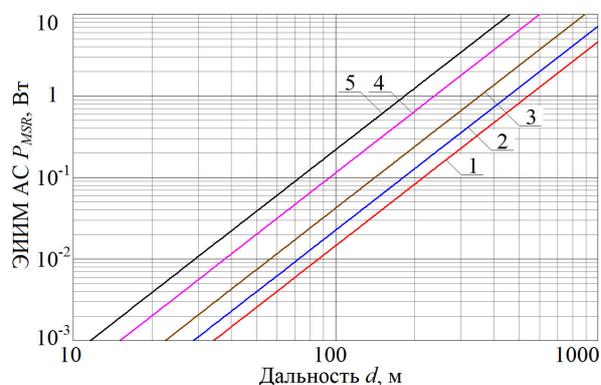


Рис. 4. Зависимости $P_{MSR}(d)$ для $H_{eBS} = 5$ м, $H_{MS} = 1,5$ м, полученные для различных длин волн при $C_P = 1$ Гбит/с, $K_{CC} = 10$, $S_{EP} = 5$, $K_N = 5$, $T_0 = 293$ К, $G_{BS} = 50$

На рис. 6 приведены расчетные зависимости $P_{MSR}(C_P)$ для различной дальности передачи информации по обратному каналу: $d = 10$ м (красная линия 1), $d = 30$ м (линия 2), $d = 100$ м (линия 3), $d = 300$ м (линия 4) и $d = 1000$ м (линия 5), полученные для $K_{CC} = 10$, $\lambda = 0,15$ при прочих параметрах (9), (10), аналогичных принятым при расчете кривых на рис. 1–3. Эти зависимости подтверждают ранее сделанные выводы, убедительно свидетельствуя о том, что безопасная реализация декларируемых сверхвысокоскоростных обратных каналов от мобильных АС в перспективных системах сотовой (мобильной) связи, имеющих микросайты радиусом в сотни метров, невозможна. Приемлемый с точки зрения современных гигиенических ограничений уровень электромагнитной безопасности этих систем и уровень

электромагнитной экологии городских территорий возможен только за счет существенных инвестиций в инфраструктуру сетей 4G и 5G, отказе от высокоскоростной передачи данных от отдельных АС на расстояния более нескольких десятков метров при системной скорости передачи данных по обратному каналу на декларируемом уровне 5–10 Гбит/с, т. е. фактически реализации таких скоростей передачи данных по обратному каналу только с точками доступа прямой видимости внутри помещений либо от точек доступа вне зданий к внешней БС.

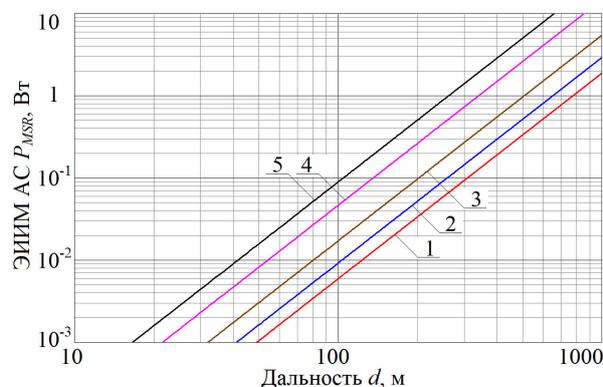


Рис. 5. Зависимости $P_{MSR}(d)$ для $H_{eBS} = 30$ м, $H_{MS} = 1,5$ м, полученные для различных длин волн при $C_P = 1$ Гбит/с, $K_{CC} = 10$, $S_{EP} = 5$, $K_N = 5$, $T_0 = 293$ К, $G_{BS} = 50$

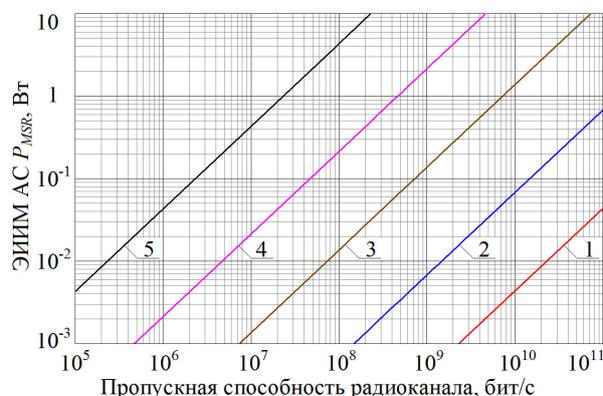


Рис. 6. Зависимости $P_{MSR}(C_P)$ для $K_{CC} = 10$, полученные для различной дальности d связи по обратному каналу при $S_{EP} = 5$, $K_N = 5$, $T_0 = 293$ К, $G_{BS} = 50$, $R_{BP} = 200$ м, $\lambda = 0,15$ м

Заключение

1. При ожидаемой ширине полос частот радиоканалов систем 4G, 5G и принятых ограничениях на ЭИИМ АС предельно возможная скорость передачи данных от АС к БС в этих системах ограничена на уровне 10–100 Мбит/с. Скорости передачи данных по обратному каналу БС 1–10 Гбит/с в отдельных радиоприемах «АС–БС» нереальны и реализуемы только для всей совокупности радиоприемов, образующих обратный канал передачи данных к БС.

2. Передача данных от АС к БС в перспективных сетях мобильной связи на скоростях порядка 10–100 Мбит/с с высоким качеством при относительно безопасных уровнях ЭИИМ АС возможна только на расстояниях не более 100–200 м. Увеличение дальности связи при максимальных скоростях, декларируемых для передачи данных по обратному каналу в сетях 4G и 5G, требует чрезвычайно значительного увеличения ЭИИМ АС – до уровней, представляющих существенную опасность здоровью как абонента, так и окружающих людей. Поскольку ЭИИМ АС, по крайней мере в сетях 3G–4G, ограничена уровнем 24 дБм (0,25 Вт) [1], увеличение дальности передачи данных по обратному каналу в этих сетях возможно только за счет соответствующего снижения качества связи и скорости передачи данных.

3. Мобильный Интернет со скоростями 1–10 Мбит/с в обратном канале в макросайтах на дальностях до 0,5–1,0 км может быть относительно безопасен для здоровья абонента только при использовании на открытой местности в прямой видимости БС и при высоком качестве частотно-территориального планирования сети, обеспечивающего низкий уровень внутрисетевых помех ($K_{CC} \leq 10$). Мобильный Интернет как с этими, так и с более высокими скоростями в помещениях, при расположении БС вне помещений, с существующей в настоящее время пространственной плотностью 3–5 БС/км² в городской застройке требует опасно высоких уровней ЭИИМ АС, поскольку в отличие от АС в режиме телефонии, в режиме передачи данных АС использует максимальный уровень ЭИИМ для достижения максимально возможной скорости передачи данных.

4. Относительно безопасный мобильный Интернет с высокой скоростью передачи данных в обратном канале, декларируемой для сетей мобильной связи 4G–5G – это Интернет минимальных расстояний между БС и АС. Он может быть безопасным только при использовании пико-БС при дальностях связи от нескольких метров до нескольких десятков метров, т. е. при размещении этих БС в помещениях. Однако в этих условиях становится возможной замена беспроводного доступа в сеть проводным доступом,

что существенно улучшает экологические характеристики этих помещений. Последнее представляется достаточно актуальным в связи с планируемым существенным расширением сфер применения беспроводного широкополосного доступа в рамках систем мобильной связи 5G и концепций «Умный дом», «Интернет вещей» и т. п.

5. Увеличение скорости передачи информации по радиоканалу за счет расширения его полосы частот и увеличения его спектральной эффективности сопровождается увеличением как уровня собственного шума, приведенного ко входу приемника, так и требуемого отношения *CNIR*. Это весьма существенно увеличивает необходимый уровень ЭИИМ и АС, и БС, либо, принимая во внимание существующие гигиенические ограничения, влечет уменьшение на порядок дальности надежной связи по радиоканалам сотовой (мобильной) связи в условиях города, и, как следствие, необходимость реализации ее многоуровневой иерархии с акцентом на массовое использование пико-БС (точек доступа) в помещениях и пикосот в местах локального скопления АС в городской застройке (как внутри так и вне помещений). При этом относительная узость отдельных полос частот, выделяемых и планируемых к выделению для реализации перспективных технологий мобильной связи [2], определяет ограниченность возможностей организации полноценной однородной кластерной структуры частотных планов, частотного разнесения радиоканалов соседних секторов БС и т. п. и является негативным фактором, побуждающим операторов к увеличению спектральной эффективности радиоканалов за счет увеличения *CNIR* и, как следствие, к увеличению ЭИИМ АС и БС.

Автор выражает признательность доценту Э.Б. Липковичу за ряд замечаний и предложений, способствовавших совершенствованию данной статьи.

Список литературы / References

1. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced // Report ITU-R M.2135-1 (12/2009).
2. LTE-Advanced (3GPP Rel.12), Technology Introduction, White Paper. lma252_wp_lte_rel12_2e.pdf [Electronic resource]. – URL: www.rohde-schwarz.com (access date: 06.01.2018).
3. Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile GSMA Intelligence [Electronic resource]. – URL: www.gsmintelligence.com (access date: 06.01.2018).
4. Fundamentals of 5G Mobile Networks / Edited by J. Rodriguez. John Wiley & Sons, 2015. 293 p.
5. Ericsson Mobility Report [Electronic resource]. – URL: www.ericsson.com (access date: 06.01.2018).
6. 802.11ac Technology Introduction. White Paper. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, March 2012 [Electronic resource]. – URL: www.rohde-schwarz.com (access date: 06.01.2018).
7. Hygienic requirements to location and operation of the equipment of mobile communications. Appendix 2 // Hygienic Regulations No. 2.1.8/2.2.4.1190-03, 2003.
8. Shannon C.E. Communication in the presence of noise // Proc. of the IRE. 1949. Vol. 37, № 1. P. 10–21.
9. Rohde U.L., Whitaker J.C., Bucher T.T.N. Communications Receivers: Principles and Design. McGraw-Hill, 1996. 61 p.
10. ETS EN 300 910, V8.5.1. Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+). Radio Transmission and Reception (GSM 05.05 version 8.5.1 Release 1999).
11. Tikhvinsky V., Terentiev S., Minaev I. Comparative analysis of spectral efficiency of UMTS and LTE systems [Electronic resource]. – URL: refdb.ru/look/1684753.html (access date: 06.01.2018).
12. 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.1411-8.

Сведения об авторе

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

Адрес для корреспонденции

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

Information about the author

Mordachev V.I., PhD, associate professor, leading researcher of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

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
Mordachev Vladimir Ivanovich