

*А.А. МЕРЗЛИКИН, Д.С. САЛЬНИКОВ, А.Н. БИТЧЕНКО, канд. техн. наук,
Н.В. РУЖЕНЦЕВ, д-р техн. наук, А.И. ЦОПА, д-р техн. наук*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГОТОВНОСТИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КАНАЛА СВЯЗИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН

Введение

Появление технологий WiGig и нового стандарта беспроводной передачи информации IEEE 802.11ad в 2012 г. было продиктовано необходимостью значительного повышения скорости передачи мультимедийной информации и широким внедрением технологий высококачественного воспроизведения видеоинформации с высоким разрешением (HDTV, UHD). Использование диапазона 60 ГГц позволяло существенно расширить полосу пропускания канала связи до 2 ГГц. Высокие скорости передачи информации по технологии WiGig достигались внутри помещений на небольших расстояниях (в пределах 10 – 15 м), что было достаточно, например, для технологий виртуальной или дополненной реальности (VR/AR) [1, 2].

Однако сценарии развертывания систем связи следующего поколения 5G показывают [3, 4], что диапазон частот 60 ГГц предлагается использовать не только для развертывания персональных сетей WPAN (Wireless Personal Area Network), но и для создания малых сот SC (Small Cell), что позволит увеличить скорость информации в сегменте обслуживания мобильных абонентов в зоне плотной городской застройки и расширить возможности технологий интернета вещей IoT (Internet of Things), требующих подключения большого числа устройств к беспроводному каналу связи [5].

В отличие от сантиметрового диапазона волн, где в настоящий момент внедряются беспроводные сети 4G [6, 7], использование миллиметрового диапазона волн (ММ ДВ) обеспечивает более высокие скорости передачи информации за счет формирования узких сигнальных лучей, высокого усиления антенн при малой их апертуре и повышения помехозащищенности канала связи. Однако существенным недостатком при этом является большое затухание радиосигнала в атмосферных газах, гидрометеорах и некоторые другие виды дополнительных потерь [8, 9].

Международная организация ИТУ разработала и предложила рекомендации [10, 11] для расчета возможных ослаблений сигнала при применении современных систем связи в ММ ДВ в различных климатических зонах. Для уточнения статистических данных во многих странах, в том числе и в странах восточной Европы (Польша, Болгария Венгрия и др.), проводятся дополнительные исследования особенностей локального микроклимата и его влияния на эффективность развертывания и готовность каналов связи миллиметрового диапазона волн при длительной эксплуатации [12, 13].

Цель работы – уточнить методики расчетов и оценить параметры готовности и производительности каналов связи в миллиметровом диапазоне волн при развертывании сегментов сети связи 5G в различных климатических зонах Украины.

Основная часть

Один из возможных сценариев развертывания сети 5G в условиях плотной городской застройки представлен на рис. 1. В районе города одновременно работают и взаимодействуют между собой несколько малых сот SC: макросоты (Macro-Cell) – радиусом действия (1 – 2 км); микросоты (Micro-Cell) – радиусом действия (0,5 – 1 км); пикосоты (Pico-Cell) – радиусом действия (0,1 – 0,5 км).

Нелицензированный диапазон 60 ГГц, с большим затуханием сигнала в атмосфере, дает возможность повторно использовать выделенные для провайдера частотные каналы, а техно-

логии массивов MIMO для формирования узких лучей на базовых станциях (BS) и точках доступа (AP) существенно снижают внутрисистемные помехи. В этом случае задача частотного планирования для построения малых сот становится не такой актуальной.

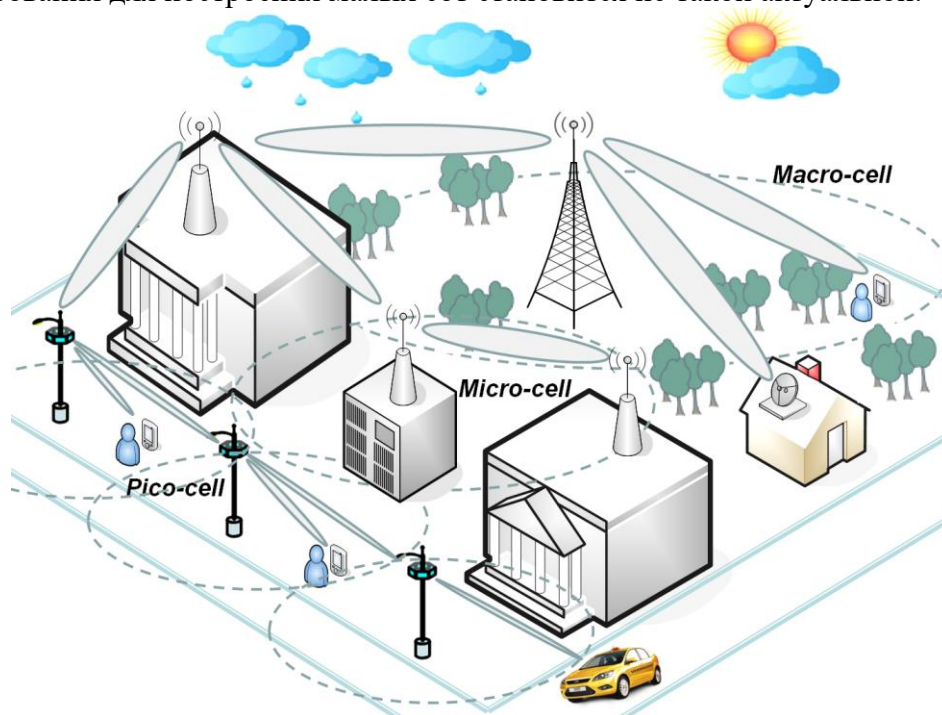


Рис. 1. Сценарий развертывания сетей 5G на основе малых сот (Small Cell)

Особенностью сценария является применение ММ ДВ, как для построения элементов транспортной сети (Backhaul link), так и линий абонентского доступа (Access link) для терминалов пользователей D (Device) и устройств IoT (рис. 2).

Частотный 60 ГГц признан нелицензионным, и его частотное распределение представлено в табл. 1 для различных регионов и стран мира [14].

Таблица 1

Параметр	Страны и регионы мира				
	Северная Америка	Япония	Южная Корея	Австралия	Евросоюз
Диапазон частот, ГГц	57-64	59-66	57-64	59,4-62,9	57-64
Полоса пропускания канала, ГГц	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16
Мощность передатчика, dBm	-	10	10	10	27
Эквивалентная изотропная мощность в антенне (EIRP), dBm	40 средняя 43 пиковая	57	57	51,8	40 средняя 43 пиковая

Одним из параметров, приведенных в табл. 1, указана эквивалентная изотропная мощность в антенне EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power), которая является интегральной энергетической характеристикой передатчика, учитывающей направленные свойства антенны. Формула (1) показывает, что маломощный радиопередатчик с направленной антенной может создавать в некотором направлении такой же уровень радиоизлучения, что и мощный радиопередатчик со слаборазнесенной антенной:

$$EIRP = P_{TX} + G_{TX} \quad [dBm] , \quad (1)$$

где P_{TX} – мощность передатчика, dBm; G_{TX} – коэффициент усиления передающей антенны dBi.

Для определения пропускной способности канала связи необходимо провести детальную оценку бюджета радиолинии длиной d , учитывающую мощность передатчика $EIRP$, ослабление сигнала 60 ГГц на трассе $PL(d)$, ослабление за счет наличия кислорода в атмосфере $O(d)$, влияние осадков в виде дождя $R(d)$ и усиление приемной антенны G_{RX} .

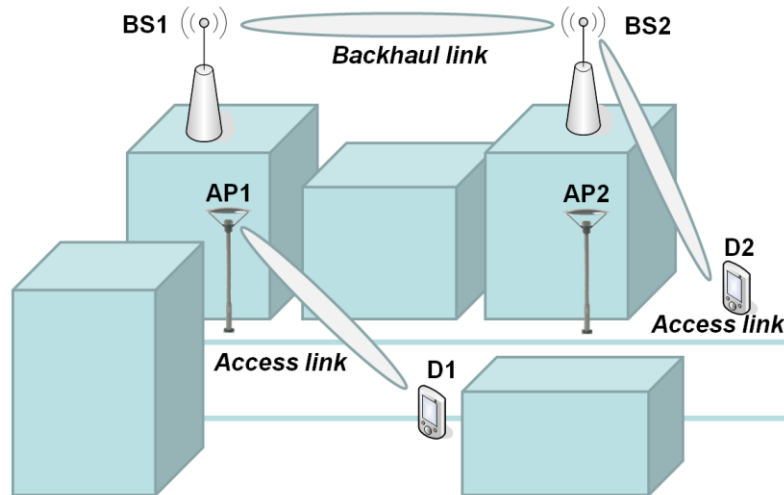


Рис. 2. Основные сценарии использования диапазона 60 ГГц для различных сегментов сети в условиях городской застройки

Уровень принимаемого сигнала в приемнике P_{RX} можно представить в виде

$$P_{dB}^{RX}(d) = P_{TX} + G_{TX} - PL(d) - O(d) - R(d) + G_{RX} \quad [dB]. \quad (2)$$

В условиях городской застройки для представленных на рис. 2 сегментов радиосети можно использовать две основные модели для расчета ослабления сигнала 60 ГГц $PL(d)$ на трассе: модель прямой видимости (LOS) и модель уличного каньона ($Street Canyon$) [15, 16]:

$$PL(d)_{LOS} = 32,5 + 20\log_{10}(f) + 10n\log_{10}(d/1000) \quad [dB], \quad (3)$$

$$PL(d)_{SC} = 82,02 + 10n\log_{10}(d/d_0) \Big|_{d_0=5} \quad [dB], \quad (4)$$

где f – частота сигнала в ГГц; n – коэффициент, зависящий от условий распространения сигнала (2...6) [15]: $n = 2$ для сценария LOS ; $n = 3 - 5$ для сценария $Street Canyon$; d – расстояние между передающей и приемной антеннами, м; d_0 – эталонное расстояние, $d_0 = 5$ м.

В табл. 2 представлены величины коэффициента n для различных условий распространения.

Таблица 2

Условия распространения	n
Свободное пространство	2
Открытое пространство в городе	2,7-3,5
Пространство в городе с плотной застройкой	3-5
Внутри зданий LOS	1,76-1,8
Внутри зданий NLOS	4-6

При расчете бюджета радиолинии ММ ДВ длиной более 100 м необходимо учитывать затухание в атмосферных газах (то есть поглощение в атмосферном кислороде O_2) и затухание в зависимости от интенсивности осадков.

Уровень поглощения в атмосферном кислороде необходимо учитывать на радиотрассах длиной более 400 м, на частоте 60 ГГц составляет $O(d) = 16 \text{ dB/km}$ [10]. Для расстояния между передающей и приемной антеннами в метровой шкале $O(d) = 16 \cdot d/1000 \text{ [dB/m]}$.

Факторы затухания в дождях $R(d)$ зависят от дождевой климатической зоны и регистрируются Международным союзом электросвязи (ITU) [9]. Территория Украины расположена в трех климатических зонах по интенсивности осадков (рис. 3, а).

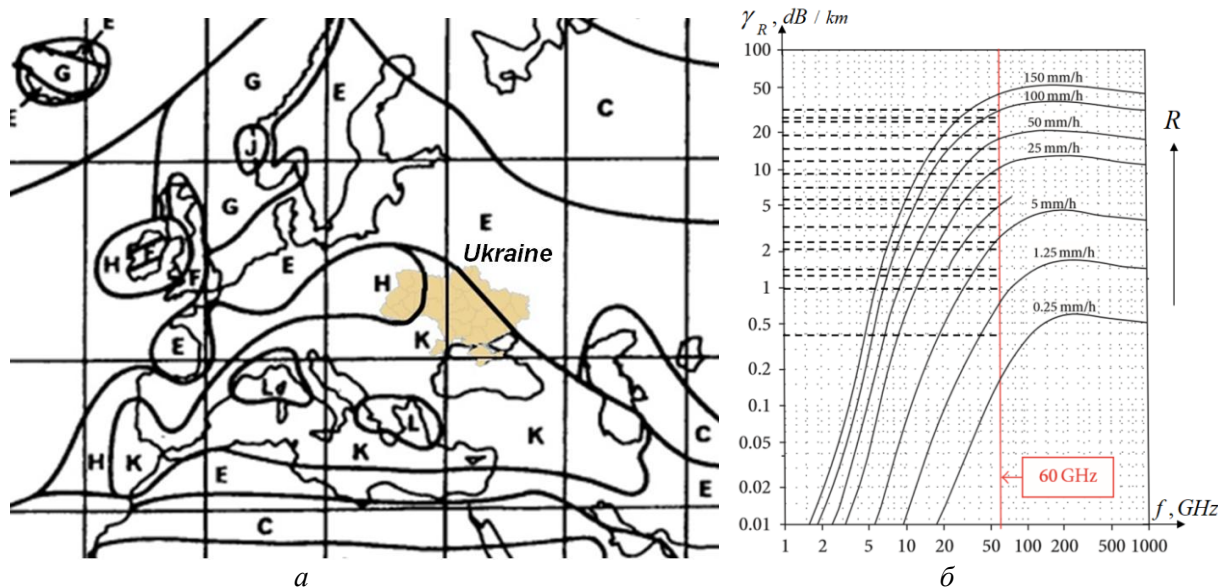


Рис. 3. Расположение Украины в трех климатических зонах ITU (а) и зависимость погонного затухания γ_R от частоты сигнала и интенсивности осадков R (б)

Данные ITU интенсивности осадков по климатическим зонам представлены в табл. 3.

$$R(d) = \gamma_R \cdot d/1000 \text{ [dB/m]}. \quad (5)$$

Величину погонного затухания сигнала 60 ГГц в дожде γ_R , в зависимости от интенсивности осадков R [мм/час], можно определить, используя графики, представленные на рис. 3, б [9, 17]. На графике пунктиром показаны уровни затухания γ_R [дБ/км] в дожде.

Интенсивность осадков, наличие облаков и другие локальные метеорологические факторы атмосферы в ММ ДВ существенно влияют на способность системы связи обеспечивать передачу информации с заданными показателями качества. Коэффициент готовности канала связи AR (availability ratio) определяется как отношение времени, когда канал связи находится в состоянии готовности к периоду наблюдения, которое, как правило, берется равным одному году (365,25 дней, 8766 часов). Коэффициент неготовности NR (unavailability ratio $NR=1-AR$) – определяется как доля времени, в течение которого тракт (соединение) находится в состоянии неготовности за период наблюдения. Период времени неготовности начинает отсчитываться с момента появления последовательности из десяти секунд со значительным количеством ошибок [14].

В табл. 3 указаны численные значения уровней затухания γ_R в дожде, для трех климатических зон E (г. Харьков), H (г. Львов), K (г. Киев) при различных показателях готовности линии радиосвязи AR.

Для завершения формирования параметров бюджета радиолинии примем величину усиления приемной антенны G_{RX} равной коэффициенту усиления передающей антенны G_{TX} .

Тогда

$$G_{RX} = G_{TX} = EIRP - P_{TX} = 43 - 27 = 16 \quad [dBi] \quad (6)$$

Выражения (1) – (6) позволяют рассчитать бюджет радиолинии в зависимости от расстояния d_{TX-RX} для различных климатических зон, сценариев развертывания, процента готовности линии связи AR .

Таблица 3

Время простоя NR , %	Готовность линии AR , %	Данные интенсивности осадков по климатическим зонам и погонного затухания на частоте 60 ГГц					
		Зона E		Зона H		Зона K	
		R mm/h	γ_R dB/km	R mm/h	γ_R dB/km	R mm/h	γ_R dB/km
1,0	99,0	0,6	0,4	2,0	1,2	1,5	1,0
0,3	99,7	2,4	1,4	4,0	2,0	4,2	2,2
0,1	99,9	6,0	3,5	10,0	4,9	12,0	7,0
0,03	99,97	12,0	7,0	18,0	8,0	23,0	9,1
0,01	99,99	22,0	9,0	32,0	12,0	42,0	15,0
0,003	99,997	41,0	14,9	55,0	23,0	70,0	26,0
0,001	99,999	70,0	26,0	83,0	29,0	100,0	32,0

Предельную пропускную способность канала связи в зависимости от расстояния d_{TX-RX} между передатчиком и приемником, полосы пропускания и соотношения сигнал/шум, можно оценить исходя из формулы К. Шеннона [20]:

$$C(d) = BW_{60GHz} \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_W^{RX}(d)}{N_W} \right) \quad [бит/сек], \quad (7)$$

где BW – ширина полосы пропускания (Гц) для диапазона 60 ГГц ($BW = 2.16 \cdot 10^9$ Гц); $P_W^{RX}(d)$ – мощность принимаемого сигнала на входе приемника (Вт) на расстоянии d от передатчика ($P_W^{RX}(d) = 10^{(P_{dB}^{RX}(d)/10)}$); N_W – мощность шума в Вт $N_W = 10^{(N_{dB}/10)}$.

Мощность шума N зависит от различных факторов: диапазона частот, полосы пропускания канала радиосвязи и шумов реализации конкретной системы связи стандарта IEEE 802.11ad [20, 21].

$$N_{dB} = k_B T_c + 10 \log_{10}(BW_{60GHz}) + L_I + n_F \quad [дБ], \quad (8)$$

где $k_B T_e$ – спектральная плотность мощности шума ($k_B T_e = -174$ дБ/Гц); BW – ширина полосы пропускания (Гц) для диапазона 60 ГГц; L_I – затухание при реализации аппаратуры стандарта IEEE 802.11ad ($L_I = 10$ дБ); n_F – коэффициент шума аппаратуры стандарта IEEE 802.11ad ($n_F = 5$ дБ).

Тогда для аппаратуры связи стандарта IEEE 802.11ad получаем

$$N_{dB} = -65.6555 \quad [дБ] \quad \text{и} \quad N_{dB} = 2.72 \cdot 10^{-10} \quad [W]$$

На рис. 4 и 5 приведены зависимости предельной скорости передачи информации от длины радиолинии системы связи 60 ГГц в режиме точка-точка (Backhaul link) и в режиме абонентского доступа (Access link) для трех климатических зон Украины.

Если в качестве предельной минимальной скорости передачи информации по каналу связи взять 2 Гбит/с (эта скорость передачи необходима для трансляции видео в реальном

масштабе времени), то можно определить максимальный радиус зоны обслуживания для базовых станций (Backhaul link) и мобильных абонентов сети (Access link) в зависимости от климатической зоны Украины. Радиус действия для ячеек микросоты (Micro-Cell): 950 м (зона К); 1000 м (зона Н) и 1050 м (зона Е). Радиус действия для ячеек пикосоты (Pico-Cell): 180 м (зона К); 185 м (зона Н) и 190 м (зона Е).

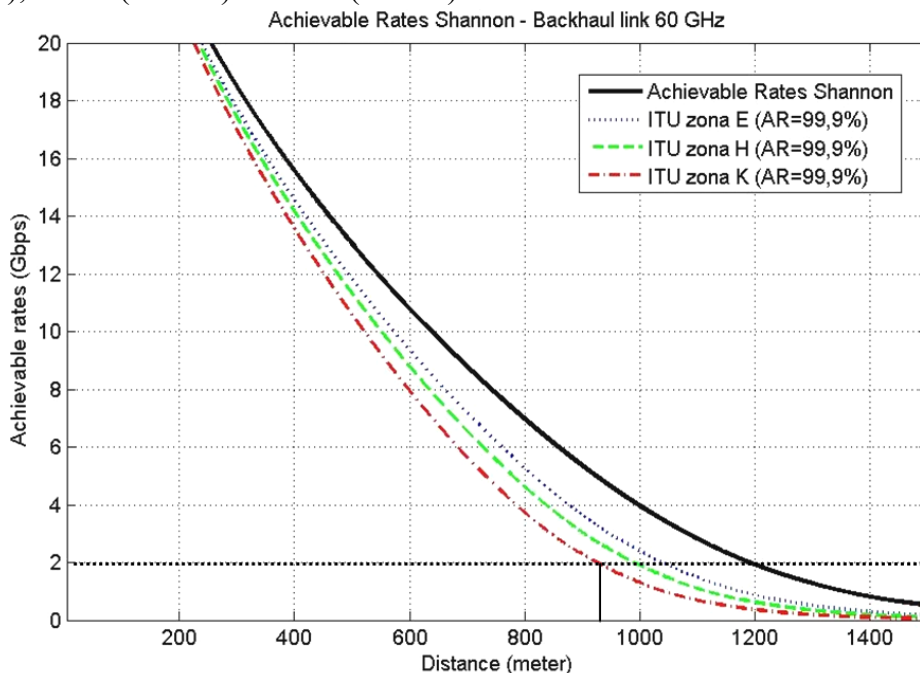


Рис. 4. Зависимость предельной скорости передачи информации от длины радиоканала в режиме «точка-точка» (Backhaul link) 60 ГГц для трех климатических зон Украины

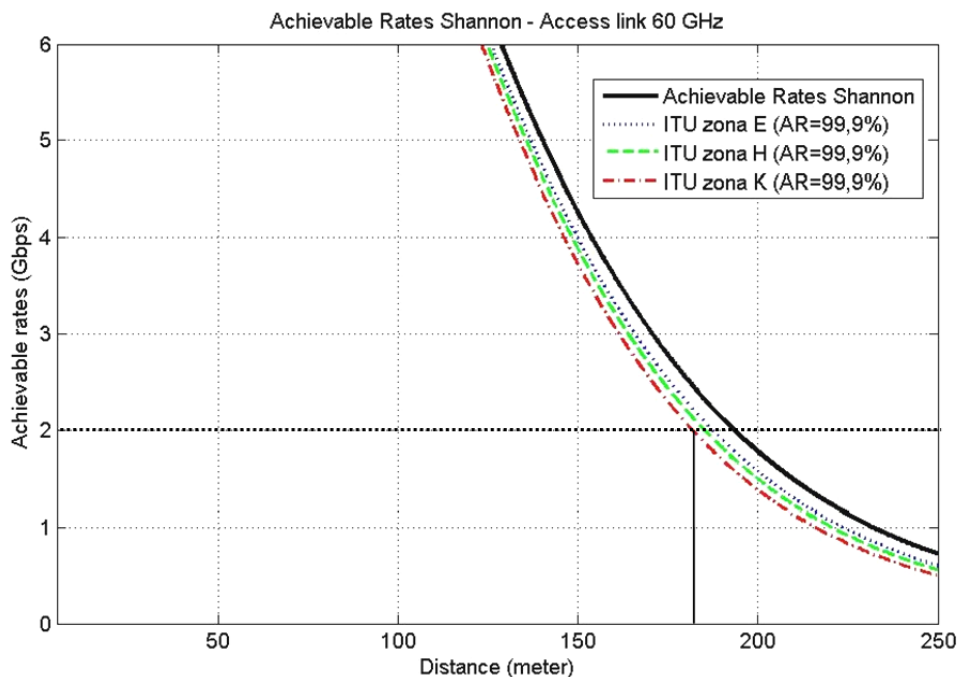


Рис. 5. Зависимость предельной скорости передачи информации от длины радиоканала в режиме абонентского доступа (Access link) 60 ГГц для трех климатических зон Украины

Для оценки реальной пропускной способности канала связи на основе существующих систем необходимо обратиться к стандарту IEEE 802.11ad [21], где указаны рекомендуемые модуляционные схемы MCS_i (Modulation and Coding Scheme) для трех основных режимов работы оборудования: с использованием одной несущей SC (Single carrier), ортогонального

частотного мультиплексирования OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) и режима с низким энергопотреблением LPSC (Low-Power SC).

Для каждого из режимов работы в стандарте предложены различные индексы модуляции, приведены величины чувствительности приемника $P_{RX}^{MCS_i}$ и максимальная достижимая при этом скорость передачи информации DR (Data rate).

В табл. 4 представлены данные о чувствительности приемника для режима работы с использованием одной несущей SC [21]. Этот режим является обязательным для всех фирм производителей оборудования.

Таблица 4

Схема MCS_i для режима SC	Чувствительность приемника RX $P_{RX}^{MCS_i}$, dBm	Вид модуляции	Скорость кода	Скорость передачи данных DR, Мбит/с
MCS0	-78 dBm	DBPSK	3/4	27,500
MCS1	-68 dBm	$\pi/2$ BPSK	1/2	385,00
MCS2	-66 dBm	$\pi/2$ BPSK	1/2	770,00
MCS3	-65 dBm	$\pi/2$ BPSK	5/8	962,50
MCS4	-64 dBm	$\pi/2$ BPSK	3/4	1155,00
MCS5	-62 dBm	$\pi/2$ BPSK	13/16	1251,25
MCS6	-63 dBm	$\pi/2$ QPSK	1/2	1540,00
MCS7	-62 dBm	$\pi/2$ QPSK	5/8	1925,00
MCS8	-61 dBm	$\pi/2$ QPSK	3/4	2310,00
MCS9	-59 dBm	$\pi/2$ QPSK	7/8	2502,50
MCS10	-55 dBm	$\pi/2$ 16QAM	1/2	3080,00
MCS11	-54 dBm	$\pi/2$ 16QAM	5/8	3850,00
MCS12	-53 dBm	$\pi/2$ 16QAM	3/4	4620,00

Если рассчитанная мощность принятого сигнала P_{dB}^{RX} выше, чем чувствительность приемника $P_{RX}^{MCS_i}$ с индексом модуляции MCS_i и ниже чувствительности приемника $P_{RX}^{MCS_{i+1}}$ с индексом модуляции MCS_{i+1} , то процессор радиомодема IEEE 802.11ad устанавливает индекс модуляции MCS_i :

$$P_{RX}^{MCS_i} < P_{dB}^{RX}(d) \leq P_{RX}^{MCS_{i+1}} \quad [dBm]. \quad (7)$$

Поэтому, если расстояние линии беспроводной связи возрастает, то $P_{dB}^{RX}(d)$ становится ниже из-за затухания сигнала (то есть потери в среде распространения, кислорода и дождя), то индекс поддерживаемых MCS_i также становится ниже и это приводит к снижению скорости передачи данных по каналу радиосвязи.

Конкретное значение порогов переключения $P_{RX}^{MCS_i}$ зависит от целевой функции алгоритма адаптации системы радиосвязи: поддержание постоянной мощности передатчика на базовой станции, поддержание максимальной скорости передачи информации или поддержание требуемого качества канала связи.

На рис. 6 и 7 приведены зависимости скорости передачи информации от длины радиолинии системы связи стандарта IEEE 802.11ad 60 ГГц в режиме точка-точка (Backhaul link) и в режиме абонентского доступа (Access link).

Если в качестве предельной минимальной скорости передачи информации по каналу связи взять 1 Гбит/с системы связи стандарта IEEE 802.11ad 60 ГГц, то можно определить максимальный радиус зоны обслуживания для базовых станций (Backhaul link) и мобильных абонентов сети (Access link). Радиус действия для ячеек микросоты составит – 600 м; а радиус действия для ячеек пикосоты – 85 м.

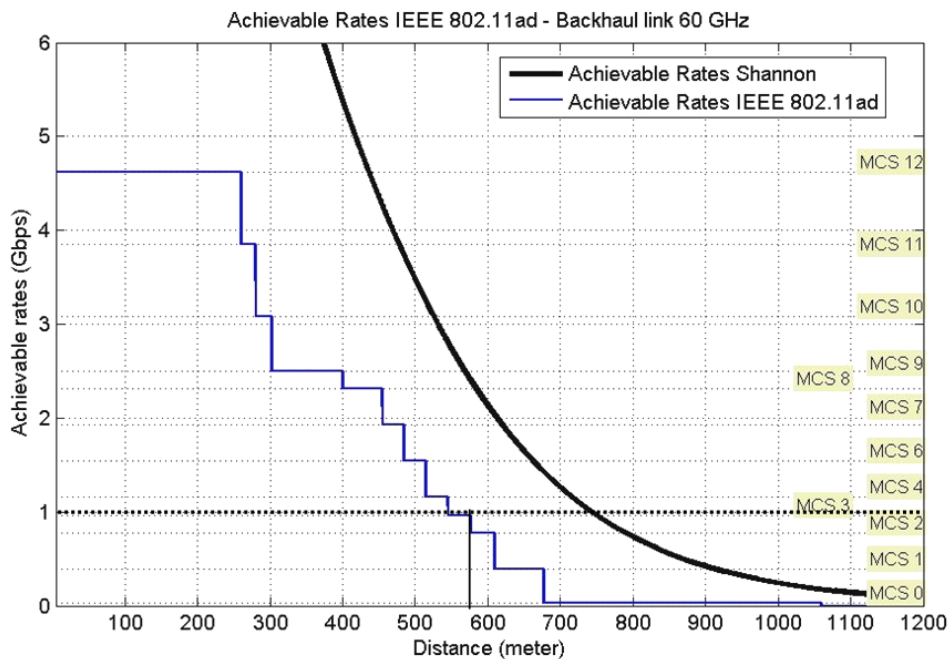


Рис. 6. Зависимость скорости передачи информации от длины радиолинии системы связи стандарта IEEE 802.11ad 60 ГГц в режиме точка-точка (Backhaul link)

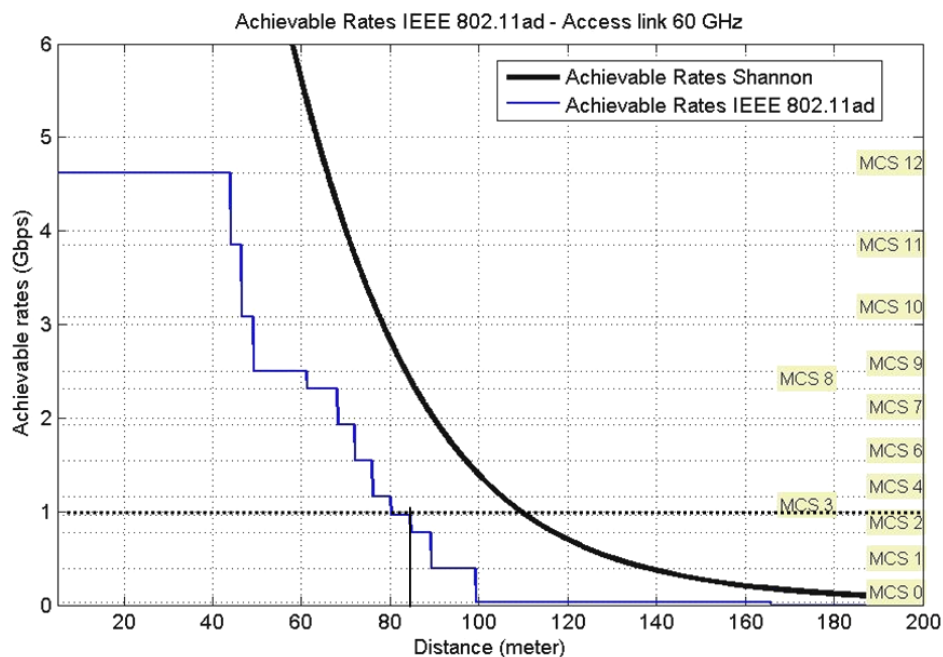


Рис. 7. Зависимость скорости передачи информации от длины радиолинии системы связи стандарта IEEE 802.11ad 60 ГГц в режиме абонентского доступа (Access link)

Выводы

1. В настоящее время количество мобильных пользователей значительно возросло, и они хотят более надежного обслуживания и высокой скорости передачи данных. Сети 5G в миллиметровом диапазоне волн могут обеспечить более высокую скорость передачи данных.
2. Передача сигналов ММ ДВ выше 10 ГГц уязвима к осадкам. Дождь, снег, мокрый снег, частицы льда и град могут ослаблять и рассеивать микроволновые сигналы и, следовательно, приводить к снижению доступности с точки зрения качества системы.
3. В работе представлена модель и практические результаты оценки бюджета линии связи, на основе которого определены достижимые расстояния между передатчиком и приемником для различных климатических зон Украины.

4. Проведены теоретическая оценка достижимых скоростей передачи информации, основанная на пропускной способности канала связи по Шеннону, и оценка практически достижимых скоростей передачи данных для различных сегментов сети передачи информации для аппаратуры стандарта IEEE 802.11ad, использующей различные схемы модуляции и кодирования (MCS).

Список литературы:

1. Nitsche T., Cordeiro C., Flores A. B., Knightly E. W., Perahia E. and Widmer J. C. IEEE 802.11ad: directional 60 GHz communication for multi-Gigabit-per-second Wi-Fi // IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52. № 12. P. 132–141.
2. Быстров Р.П., Петров А.В., Соколов А.В. Миллиметровые волны в системах связи // Журнал радиоэлектроники. 2000. №5.
3. Agapi Mesodiakaki, Andreas Kessler, Enrica Zola, Matthias Fern Dahl, Tao Cai. Energy efficient line-of-sight millimeter wave small cell backhaul: 60, 70, 80 or 140 GHz // IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol. 66, nr 2. P. 1810-1821.
4. Sooyoung Hur, Taejoon Kim, David J Love, James V Krogmeier, Timothy A. Thomas, and Amitava Ghosh. 2013. Millimeter Wave Beamforming for Wireless. Backhaul and Access in Small Cell Networks // IEEE Transactions on Communications 61, 10 (2013), 4391 – 4403.
5. Shu Sun, George R. MacCartney Jr., Rappaport Theodore S. Millimeter-Wave Distance-Dependent Large-Scale Propagation Measurements and Path Loss Models for Outdoor and Indoor 5G Systems // 10th European Conference on Antennas and Propagation – Davos, Switzerland. April 2016. P. 1-5.
6. Tsopa O.I., Strelnitskiy A.A. and Shokalo V.M. Approximate Model for Estimation of Efficiency and Noise Immunity of Branched Street and Corridor Wi-Fi and WiMAX Communication Channels // Telecommunication and Radio Engineering. Begell House, 2009. Vol. 68(17). P. 1511-1528.
7. Tsopa O.I., Strelnitskiy A.A., Strelnitskiy A.E. and Shokalo V.M. Prediction model of energy security for the systems of subscriber radio access with branched street and corridor communications channels // Radioelectronics and Communications Systems. Allerton Press, Inc., 2011. Vol. 54, no. 2. P. 61-67.
8. Мерзлякин А.А., Цопа А.И. Оценка условий распространения сигнала миллиметрового диапазона волн. // Материалы 6-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2017). Харьков, 2017. С. 90-91.
9. Tsopa A. I. Methodical maintenance of radiometric measurements of atmosphere at millimeter waves range / V. V. Pavlikov, N. V. Ruzhentsev, D. S. Salnikov, A. I. Tsopa, A. O. Merzlikin // Proc. of XIV International Conf. Modern problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science /TCSET'2018/. Lviv-Slavsko, 2018. P. 1-4.
10. ITU-R Rec. P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods.
11. ITU-R Rec. P.676-6, Approximate estimation of gaseous attenuation in the frequency range 1 – 350 GHz.
12. Boncho G. Bonev, Kliment N. Angelov and Emil S. Altimirski Study on Radio Link Availability in Millimeter Wave Range // World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol:5 2011. P.626-629.
13. Ákos Faragó, Péter Kántor, János Z. Bitó Rain Effects on 5G millimeter Wave ad-hoc Mesh Networks. Investigated with Different Rain Models // Periodica Polytechnica: Electrical Engineering and Computer Science. 2016. 60(1). P. 44-50,
14. Molisch A. F. Wireless Communications. 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley-IEEE, 2011.
15. Seybold J., Introduction to RF propagation, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.
16. Kim J. Millimeter Wave Radio Propagation Characteristics / Chapter Book: Opportunities in 5G Networks: A Research and Development Perspective. CRC Press, 2016. 577 p.
17. Rec. ITU-RP.1411-7. Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radio communication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100GHz.
18. ITU-T Rec. G.827. Availability parameters and objectives for path elements of international constant bit-rate digital paths at or above the primary rate (1996).
19. ITU-T Rec. Y.1540. IP Packet Transfer and Availability Performance Parameters (2002).
20. Freeman R. L. Radio System Design for Telecommunications, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.
21. IEEE Std. 802.11ad-2012. IEEE Standard for Information technology. Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks-Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band.