

МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ СЕТЕЙ СВЯЗИ 5 G

Введение

В последние десятилетия во всем мире стремительно развиваются инфокоммуникационные технологии, которые непосредственно влияют на развитие экономики, образования, науки, здравоохранения, культуры и образа жизни человека. По данным Международного Союза Электросвязи (МСЭ) уже в 2012 г. Интернетом пользовался каждый третий житель Земли, и число пользователей неуклонно растет. ИКТ и услуги на базе широкополосного доступа год от года становятся все более доступными для населения, в том числе и по стоимости.

Целью сетей связи пятого поколения является удовлетворение все возрастающих потребностей в мобильной связи [1 – 9]. Сети 5G играют ключевую роль в превращении городов в разумные города, что позволит гражданам и обществу в целом, получить социально-экономические выгоды, которые дает передовая цифровая экономика с интенсивным использованием данных [10].

Технология нового поколения 5G / IMT-2020, как и любая новая технология, привносит свои специфические особенности во все аспекты, касающиеся практики ее применения. Одним из таких особо важных аспектов является электромагнитная совместимость (ЭМС). На этапе подготовки к внедрению радиосетей технологии 5G, названной NewRadio (NR), необходимо заблаговременно позаботиться о принятии мер по эффективной оценке условий ЭМС для этих сетей на основе тщательного анализа особенностей технологии 5G, а правильно и точно оценив эти условия, – успешно обеспечить электромагнитную совместимость радиосредств новых сетей.

Объектом исследования является процесс распространения сигналов миллиметрового диапазона, используемых в технологии нового поколения 5G.

Предмет исследования составляют модели распространения сигналов миллиметрового диапазона, используемых в технологии нового поколения 5G.

Цель работы – разработка модели распространения сигналов миллиметрового диапазона, используемых в технологии нового поколения 5G сети связи 5G.

Постановка задачи

Для внедрения 5G Кабинет министров утвердил план использования радиочастотного ресурса Украины до 2025 г. Эти изменения позволят пользователям получать более стабильные и высокие скорости передачи информации.

МСЭ с 1995 г. стал международным координатором работ по электросвязи, направленных на создание глобального информационного общества. Создав Регламент радиосвязи [11] и разделив поверхность Земли на три региона, МСЭ организовал определенный порядок в частотном пользовании. Однако частотный ресурс принадлежит всему человечеству, исключительно активно используется и по сей день, частотные диапазоны ниже 5 ГГц практически перегружены. Присвоение радиочастот и радиочастотных каналов для радиоэлектронных средств в этих диапазонах осуществляется по технологиям частотно-территориального планирования [12 – 14] с обязательным расчетом ЭМС радиосредств. Поэтому одно из основных направлений по созданию нового поколения мобильной связи 5G – это освоение частотных диапазонов выше 5 ГГц, пока еще недостаточно используемых. Относительно свободные участки спектра есть пока на сверхвысоких частотах, например, на границе диапазонов X и C не занята полоса частот около 1,5 ГГц. Но меньше всего освоен миллиметровый диапазон

(ММД) волн, поэтому именно в этом диапазоне возможно развитие стандарта 5G со скоростями передачи данных от 1 до 10 Гбит/с. Диапазон миллиметровых волн используется пока не очень активно и изучен не полностью. Поэтому представляет интерес исследование возможностей мобильной связи в этом диапазоне волн.

Основная часть

Ключевыми решениями и технологическими компонентами [1 – 4] сети радиодоступа 5G NR являются:

- 1) использование новых форм сигнала, получивших название Non-Orthogonal Waveform и дающих выигрыш в спектральной эффективности по отношению к OFDM;
- 2) применение полного дуплекса FD – одновременной передачи и приема в общей полосе частот, преимущественно в коротких соединениях "точка-точка" (D2D, V2V);
- 3) применение многомерных антенн ММО, в которых эффективно реализуется режим динамического формирования направленных лучей для передачи (3D / Beamforming), что позволяет увеличить энергетический выигрыш в ожидаемых высоких диапазонах частот и улучшить покрытие и спектральную эффективность в ультраплотных малых сотах;
- 4) применение малых сот Small Cell со сверхплотным распределением (один приемопередатчик на каждого пользователя), разгрузка макросотами сети с разделением сред передачи команд управления и пользовательского трафика между макро- и Small-сотах в различных полосах частот (концепция "PhantomCell»).

Радиочастоты для сетей 5G – это одна из главных компонент, оказывает существенное влияние на ЭМС [6, 9, 12].

На Всемирной конференции радиосвязи ВКР-15 были определены новые диапазоны радиочастот для 5G, в том числе диапазоны сантиметровых и миллиметровых волн [12]. В целом этот радиочастотный спектр размещен в трех областях: ниже 1 ГГц, от 1 ГГц до 6 ГГц и выше 6 ГГц (до 100 ГГц).

В качестве главных особенностей этого спектра, с точки зрения ЭМС, можно выделить следующее: возможность использования широкой непрерывной полосы канала (суммарно до 1 – 2 ГГц), малые зоны обслуживания (дальность излучения) в малых (Small) и ультрамалых (UltraSmall) сотах; возможность использования малогабаритных многоэлементных антенн ММО с узкими лучами как в базовых станциях, так и в абонентских устройствах; различный характер потерь при распространении сигнала, в частности значительное влияние на уровень потерь дополнительных ранее неизвестных в сотовой связи факторов (газы – кислород, водяной пар и др.) [15, 17].

Описание радиоинтерфейсов [1, 6, 9, 12, 15, 17] сетей 5G представлено в табл.1.

Таблица 1

Описание радиоинтерфейсов сетей 5G

Параметр	NR ниже 6 ГГц	NR выше 6 ГГц
Ширина канала	5 МГц, 10 МГц, 5 МГц, 20 МГц, 25 МГц, 30 МГц, 40 МГц, 50 МГц, 60 МГц, 80 МГц 100 МГц.	50 МГц, 100 МГц, 200 МГц и 400 МГц.
Диапазоны	Отдельные полосы 450-3800 МГц, 3800-4200 МГц и 4400-5000 МГц	26,5-29,5 ГГц, 24,25-27,5 ГГц 37-40 ГГц
Задержка (на уровне радиоинтерфейса)	4 мс (Фаза 1) 1 мс (Фаза 2)	4 мс (Фаза 1) 1 мс (Фаза 2)
Пиковые скорости	2 Гбит/с и выше	До 20 Гбит/с

Анализ главных особенностей радиоинтерфейса 5G [1, 6, 9, 12, 15, 17, 18] позволяет указать на ожидаемые особенности процедур оценки условий ЭМС для этих сетей. Эти особенности главным образом касаются учета суммарной помехи от сети при ее особой архитектуре и динамике изменений, выбора новых моделей потерь (моделей канала) при пространст-

венно-распределенном излучении многомерных антенн ММО и разнородной среде распространения сигнала, а также учета спектральных свойств новых форм сигнала и характера излучения при новых неортогональных методах радиодоступа.

Главными недостатками сигналов миллиметрового диапазона (ММД) являются:

- 1) сильное затухание миллиметровых волн при распространении;
- 2) уровень сигнала существенно зависит от влияния гидрометеоров (капли дождя, снег, град, туман) и от присутствия в атмосфере твердых неоднородностей (листья деревьев, стаи птиц, пыль);
- 3) высокая степень влияния на уровень сигнала препятствий, которые закрывают трассу;
- 4) наличие зон сильного ослабления сигнала на некоторых частотах из-за ослабления сигналов ММД молекулами кислорода и парами воды.

Как и во всех линиях связи и радиоэлектронных системах, в линиях связи ММД распространяющиеся радиоволны имеют сложную, случайно-детерминированную структуру и подчиняются законам электродинамики, а параметры радиоволн описываются уравнениями Максвелла [19]. Однако такое представление является достаточно сложным, что может привести к усложнению модели, а следовательно, к трудностям работы с ней, к увеличению погрешностей расчетов. Поэтому в качестве модели распространения сигналов в радиолиниях воспользуемся известной моделью, основанной на уравнении передачи [20]:

$$P_{np} = P_{nep} + G_{nep} + G_{np} - \eta_{nep} - \eta_{np} - W, \quad (1)$$

где P_{np} – мощность принимаемого сигнала (дБ); P_{nep} – мощность передатчика; G_{nep}, G_{np} – соответственно коэффициенты усиления передающей и приемной антенн; η_{np}, η_{nep} – коэффициенты полезного действия приемного и передающего фидеров; W – потери (ослабление) электромагнитного поля (дБ).

Задачи, связанные с распространением радиоволн в приземной зоне, сложны, поскольку поле около антенны радиоприемника как абонентской станции, так и базовой станции представляет собой суперпозицию сигналов из-за их многолучевого распространения в условиях данной местности. Проблема усложняется влиянием на условия распространения радиоволн передвижения объектов, рассеивающих радиоволны и перемещения самих абонентов в зоне неравномерного поля. Уровень сигнала может изменяться от пиковых значений, превышающих средний уровень на несколько единиц и даже десятков децибел, до десятков децибел ниже среднего в зонах сильного замирания [21].

Для расчета ослабления сигналов при анализе ЭМС и проектировании мобильных сетей связи от 1 до 4G наиболее широко применяется моделирование, основанное на результатах статистической обработки экспериментальных исследований распространения сигналов вдоль земной поверхности. Такие исследования проводились во многих странах мира для различных условий местности. Некоторые из этих моделей являются общепризнанными и рекомендованы МСЭ для использования при проектировании мобильных сетей связи.

Можно выделить два основных типа моделей. Первый тип, где в качестве основных параметров, характеризующих местность и условия распространения сигналов, являются высоты расположения антенн и высоты неровностей местности [22 – 24]. Второй тип – модели ослабления сигналов в статистически однородной среде, где рельеф местности обычно не учитывается [22]. Первый тип модели, хотя и является точным, более пригоден для анализа стационарных систем связи, так как при изменении местоположения абонента будут и изменяться получаемые результаты исследований и при наборе статистики при моделировании в результате получатся средние значения. Кроме того, первый тип модели требует большего числа входных априорных данных и большего времени на проведение исследований. Математические модели распространения радиоволн, построенные на основе экспериментальных данных и описывающие поле в статистически однородной среде (городская территория, пригород, сельская местность, открытое пространство), являются общепризнанными, о чем свидетельствуют Рекомендации ИТУ и СЕРТ, и могут быть использованы для расчета зон по-

крытия мобильных сетей связи и оценки их ЭМС. Кроме того, целесообразно выделить в особую категорию модели распространения в пределах зданий. Рекомендуется придерживаться следующего соответствия между типами моделей ослабления и характеристиками среды, в которой используется мобильная сеть связи [22 – 24]:

1. Отдельное помещение, офис внутри здания.
2. Открытое пространство – открытые участки без насаждений.
3. Плотная городская застройка – плотная застройка в основном высокими зданиями выше 20 этажей с малой площадью зеленых насаждений.
4. Городская застройка – многоэтажная административная и жилая застройка, индустриальные районы с зелеными насаждениями.
5. Пригород – одиночные дома, административные здания высотой 1 – 3 этажа. Большие площади зеленых насаждений, парковые зоны с отдельными группами зданий плотной застройки.
6. Сельская местность – открытое пространство с несколькими зданиями, фермы, кустарниковые насаждения, шоссе.

В общем виде ослабление сигнала (помехи) W определяется выражением

$$W = W_{PЭС} + W_{cp}, \quad (2)$$

где $W_{PЭС}$ – ослабление помехи, определяемое характеристиками радиоэлектронного средства (РЭС), при расчете ослабления полезного сигнала можно считать $W_{PЭС} = 0$;

W_{cp} – ослабление сигнала (помехи), определяемое условиями среды распространения радиоволн.

Параметр ослабления энергии помехи $W_{PЭС}$ определяется следующими составляющими, [22 – 24]:

$$W_{PЭС} = W_{PЭС}^{(1)}(\Delta f) + W_{PЭС}^{(2)} + W_{PЭС}^{(3)} + W_{PЭС}^{(4)} + W_{PЭС}^{(5)}, \quad (3)$$

где $W_{PЭС}^{(1)}(\Delta f)$ – ослабление помехи, определяемое избирательностью приемника по основному каналу $S_{np}(\Delta f)$, шириной спектра основного и внеполосного излучения передатчика и частотным разносом между каналами излучения и приема, дБ; $W_{PЭС}^{(2)}$ – ослабление помехи за счет побочного излучения. Значения $W_{PЭС}^{(2)}$ определяются в результате проведения эксперимента. При отсутствии экспериментальных данных по значениям плотностей потоков мощности ослабление сигнала за счет побочного излучения принимается равным относительному уровню боковых излучений. Уровень боковых излучений определяется коэффициентом подавления по боковым излучениям. Для РЭС мобильных сетей связи он обычно составляет 60 дБ;

$W_{PЭС}^{(3)}$ – ослабление помехи за счет приема по побочным каналам, определяется избирательностью приемника по побочным каналам приема;

$W_{PЭС}^{(4)}$ – ослабление помехи при полных частотных несовпадениях помехи с основным и побочными каналами приема. При этом помеха является продуктом нелинейностей радиоприемного тракта;

$W_{PЭС}^{(5)}$ – ослабление помехи, вызванное различием в поляризации возбуждающего поля и антенны приемника, определяется соотношением

$$W_{PЭС}^{(5)} = 10 \cdot \lg(\gamma_{ij}), \quad (4)$$

где γ_{ij} – поправочный коэффициент, который учитывает расхождения поляризаций полезной радиоволны i -го РЭС с радиоволной помехи j -го РЭС.

В условиях использования сети связи в отдельном помещении или здании ослабление сигнала W_{cp} , определяемое условиями среды распространения, рассчитывается согласно выражению

$$W_{cp} = W_{св} + W_{дон}^{(1)} + W_{дон}^{(2)} + W_{дон}^{(3)} + W_{дон}^{(4)} + W_{дон}^{(5)} + W_{дон}^{(6)}, \quad (5)$$

где $W_{св}$ – ослабление в свободном пространстве (дБ)

$$W_{св} = 92,4 + 20 \lg(f) + 20 \lg(d), \quad (6)$$

где d – расстояние между передатчиком и приемником, f – частота;

$W_{дон}^{(1)}$ – дополнительное ослабление, вызванное влиянием стен и перекрытий этажей:

$$W_{дон}^{(1)} = W_{0c} \cdot N_{cm} \left(\frac{N_{cm}+2}{N_{cm}+1} - c \right) + W_{0э} \cdot N_э \left(\frac{N_э+2}{N_э+1} - c \right), \quad (7)$$

где W_{0c} – ослабление за счет влияния стены или межэтажного перекрытия. Обычно [22 – 24] для стены $W_{0c} = 8,38$ дБ и $c = 0,51$, межэтажного перекрытия $W_{0э} = 18,3$ дБ и $c = 0,46$, N_{cm} – количество стен; $N_э$ – количество межэтажных перекрытий;

$W_{дон}^{(2)}$ – дополнительные потери энергии сигнала при заполнении пространства различными предметами [22 – 24]:

$$W_{дон}^{(2)} = \delta \cdot d, \quad (8)$$

где δ – коэффициент погонного ослабления, учитывающий заполнение пространства предметами. Для почти пустого пространства $\delta = 0,2$ дБ/м, для переполненного пространства $\delta = 0,6$ дБ/м;

$W_{дон}^{(3)}$ – дополнительное ослабление, вызванное потерей энергии радиоволн при распространении через дожди,

$$W_{дон}^{(3)} = kdK_d Y^a \quad (9)$$

где k – коэффициент, определяющий наличие или отсутствие осадков, Y – интенсивность осадков, мм/ч, K_d – параметр, зависящий от частоты, температуры, поляризации дБч/м², a – безразмерный параметр, зависящий от частоты, температуры, поляризации.

В табл. 2 приведены значения погонного затухания сигнала в дождях в зависимости от интенсивности осадков и частоты.

Таблица 2

Погонное затухание в дождях

Частота, ГГц	Процент времени года	Интенсивность осадков	Погонное затухание сигнала в дождях, дБ/км
30	1	0,6	0,1
	0,3	2,4	0,43
	0,1	6	1,08
	0,03	12	2,18
	0,01	22	4,02
60	1	0,6	0,63
	0,3	2,4	1,84
	0,1	6	3,73
	0,03	12	6,35
	0,01	22	10,12
90	1	0,6	0,7
	0,3	2,4	1,99
	0,1	6	3,98
	0,03	12	6,7
	0,01	22	10,6

$W_{don}^{(4)}$ – дополнительное ослабление, вызванное потерей энергии радиоволн из-за тумана:

$$W_{don}^{(4)} = kdl_T V_T,$$

l_T – удельный погонный коэффициент ослабления сигнала ММД в тумане, V_T – коэффициент содержания воды в атмосфере, который определяется по оптической видимости, Удельный погонный коэффициент ослабления сигнала ММД в тумане приведен в табл.3.

Таблица 3

Удельный погонный коэффициент ослабления сигнала ММД в тумане

f_0 , ГГц	30	43	60	150
l_T , дБ м ³ /гкм	0,438	0,876	1,65	7,14

Коэффициент содержания воды в атмосфере приведен в табл.4.

Таблица 4

Коэффициент содержания воды в атмосфере

Оптическая видимость, м	30	50	80	200
V_T , г/м ³	2	1	0,5	0,2

$W_{don}^{(5)}$ – дополнительное ослабление сигнала при распространении через листья деревьев,

$$W_{don}^{(5)} = 0,2 f^{0,3} r^{0,6},$$

где r - глубина слоя перекрывающего листья, м.

Случайная компонента дополнительного ослабления

$$W_{don}^{(6)} = W_{cl}^{(m)} + W_{cl}^{(b)}, \quad (10)$$

где $W_{cl}^{(m)}$, $W_{cl}^{(b)}$ отображают соответственно медленные и быстрые случайные замирания.

В расчетных задачах по энергетике радиолиний малых расстояний быстрыми замираниями обычно пренебрегают, ибо они характерны для достаточно протяженных, ($d > 30 - 50$ км), преимущественно закрытых, или полузакрытых радиотрасс. Для офисных радиолиний или радиолиний в пределах микрорайона принято считать $W_{cl}^{(b)}(t) \rightarrow 0$. Медленные замирания $W_{cl}^{(m)}$ составляют 10 – 16 дБ. Медленные замирания подчиняются случайному логарифмически-нормальному закону, тогда [20]

$$W_{cl}^{(m)} \{u(t)\} = \rho W_{cl}^{(m)} \{u(t - \Delta t)\} + \sqrt{1 - \rho^2} \cdot N(0, \sigma), \quad (11)$$

где ρ – коэффициент корреляции между двумя сечениями случайного процесса изменения $W_{cl}^{(m)} \{u(t)\}$, разнесенных на интервал Δt .

В условиях использования мобильных сетей связи вне здания считают, что основными механизмами распространения радиоволн (РРВ) являются: дифракция, рефракция, распространение в свободном пространстве и вдоль земной поверхности. Данные механизмы могут действовать совместно или в различной комбинации, в зависимости от физико-географических условий. Имеется ряд рекомендаций ИТУ, которые позволяют учитывать те или иные механизмы РРВ: ИТУ-R PN.525 – Расчет ослабления в свободном пространстве [23], ИТУ-R PN.526 – Распространение радиоволн с учетом дифракции [24].

В рекомендациях ИТУ по учету потерь при РРВ для частот свыше 1 ГГц предлагается использовать полуэмпирическую модель, изложенную в рекомендации ИТУ-R P.1146 [25]. Эта модель позволяет рассчитывать напряженность поля в точке приема в диапазоне частот 1 – 3 ГГц для стационарных и мобильных систем связи. Недостатком этой модели является то,

что она не позволяет рассчитывать потери при РРВ, если высоты передающей и приемной антенн выше 30 м. В этих случаях рекомендуется использовать модель, изложенную в рекомендации ITU-R P.452-8 [26].

Уровень сигнала на входе приемника в диапазоне 0,03 – 3 ГГц, особенно в случае использования мобильных абонентских станций, зависит от многих факторов: типа местности, высоты зданий и плотности застройки города, высот приемной и передающих антенн, наличия растительности и многих других факторов. Поэтому при расчете получают медианное значение напряженности поля в точке приема с определенной вероятностью. Таким образом, вывод о наличии или отсутствии помехи также имеет вероятностный характер.

Выводы

Технология нового поколения 5G / IMT-2020, как и любая новая технология, приносит свои специфические особенности во все аспекты, касающиеся практики ее применения. Одним из таких особо важных аспектов является ЭМС. На этапе подготовки к внедрению радиосетей технологии 5G необходимо заблаговременно позаботиться о принятии мер по эффективной оценке условий ЭМС для этих сетей на основе тщательного анализа особенностей технологии 5G, а правильно и точно оценив эти условия – успешно обеспечить электромагнитную совместимость радиосредств новых сетей.

На Всемирной конференции радиосвязи ВКР-15 были определены новые диапазоны радиочастот для 5G, в том числе диапазоны сантиметровых и миллиметровых волн. В целом этот радиочастотный спектр размещен в трех областях: ниже 1 ГГц, от 1 до 6 ГГц и выше 6 ГГц (до 100 ГГц). В качестве главных особенностей этого спектра, с точки зрения ЭМС, можно выделить следующие: различный характер потерь при распространении сигнала, в частности значительное влияние на уровень потерь дополнительных ранее неизвестных в сотовой связи факторов (газы – кислород, водяной пар и др.).

Разработанная математическая модель распространения сигналов сетей связи 5 G учитывает:

- ослабление сигналов в свободном пространстве,
- ослабление сигналов, вызванное влиянием стен и перекрытий этажей,
- потери энергии сигнала при заполнении пространства различными предметами,
- ослабление сигналов, вызванное потерей энергии радиоволн при распространении через дожди,
- ослабление сигналов, вызванное потерей энергии радиоволн из-за тумана,
- ослабление сигналов при распространении через листья деревьев, медленные и быстрые случайные замирания.

Список литературы:

1. 3GPP TR 22.891. Feasibility Study on New Services and Markets Technology Enablers. Ver. 14.2.0, Sep. 2016.
2. 3GPP TR 38.913. Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies. Ver. 14.3.0, June 2017.
3. 3GPP TS 28.554. Management and orchestration; 5G end to end Key Performance Indicators (KPI). Ver. 2.0.0, release 15, Sep 2018.
4. 5G PPP Architecture Working Group white paper. View on 5G Architecture. July 2016.
5. Abuarqoub A. Behaviour Profiling in Healthcare Applications Using the Internet of Things Technology / Abuarqoub A., Hammoudeh M. H. // Proceedings of Fourth International Conference on Advances in Information Processing and Communication Technology. 2016. P. 1-4. DOI:<https://doi.org/10.15224/978-1-63248-099-6-25>
6. Agiwal M. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey / Agiwal M., Roy A., Saxena N // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. №18(3). P. 1617-1655. DOI:<https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2532458>
7. Aijaz A. Realizing the Tactile Internet: Haptic Communications over Next Generation 5G Cellular Networks / A.Aijaz, M.Dohler, A.H.Aghvami, V.Friderikos, Frodigh M. // IEEE Wireless Comm. 2017. 24(2). P. 82-89. DOI:<https://doi.org/10.1109/MWC.2016.1500157RP>

8. Aijaz A. Shaping 5G for the Tactile Internet / Aijaz A.; Simsek M.; Dohler M. and Fettweis G. // 5G Mobile Communications. Springer International Publishing, pp.677-691, 2017. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-319-34208-5_25
9. Aijaz A. Towards 5G-enabled tactile internet: Radio resource allocation for haptic communications // Proceedings of the 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Doha, Qatar, 3-6 April 2016. P. 1-6. DOI:<https://doi.org/10.1109/WCNC.2016.7564661>
10. Бородин А. С. Сети связи пятого поколения как основа цифровой экономики / А.С. Бородин, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2017. №5. С. 47-51.
11. Radio Regulations. Ed. ITU. In 4 vol. 2016.
12. Resolution COM 6/20 (WRC-15) Studies on frequency-related matters for International Mobile Telecommunications identification including possible additional allocations to the mobile services on a primary basis in portion(s) of the frequency range between 24.25 and 86 GHz for the future development of International Mobile Telecommunications for 2020 and beyond.
13. Бабков В.Ю. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование / В.Ю. Бабков, М.А. Вознюк, П.А. Михайлов. Москва : Горячая линия – Телеком, 2007. 224 с.
14. Тихвинский В.О. Технологии 5G – базис мобильной инфраструктуры цифровой экономики // Электросвязь. 2018. № 3. С. 49–55.
15. Куракова Т.П. Имитация радиоканалов миллиметрового диапазона поколения 5G : дис. ... канд. техн. наук ; ФГУП НИИР/http://diss.vlsu.ru/uploads/media/Dissertacija_Kurakovoi.pdf.
16. Kurakova T. How ITU can help develop future networks/ T. Kurakova, M.Valdburger // ITU News. 2013. № 1. P. 38-41. DOI:<https://doi.org/10.1525/aft.2013.41.3.38>
17. Молчанов Д.А. Разработка подходов, методов исследования и моделей обеспечения показателей качества обслуживания в беспроводных сетях пятого поколения : дис. ... д-ра техн. наук ; Рос. ун-т дружбы народов. Москва, 2019. 306 с.
18. Кременецька Я.А. Аналіз обмежувачих та компенсуючих факторів при розрахунку енергетичної ефективності радіосистем в міліметровому діапазоні / Я.А. Кременецька, С.Ю. Марков, Н.В. Градобоева, Є.М. Харченко // Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2019. №1. С. 12-21. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vduikt_2019_1_4 . DOI: 10.31673/2412-4338.2019.011221
19. Griffiths D. J. Introduction to Electrodynamics. 4th ed. Pearson. Boston, 2013. P. 347.
20. Williams, T. EMC for Product Designers // Elsevier Science & Technology, 2016. P. 513.
21. Коляденко Ю.Ю. Математическая модель взаимодействия элементов системы абонентского радиодоступа // Праці УНДІРТ. Теоретичний та науково-практичний журнал радіозв'язку, радіомовлення і телебачення. 2004. №1 (37). С. 31-35.
22. Recommendation ITU-R PN.452.
23. Recommendation ITU-R PN.525.
24. Recommendation ITU-R PN.526.
25. Recommendation ITU-R P.1146.
26. Recommendation ITU-R PN.452-8.

Поступила в редколлегию 05.03.2021

Сведения об авторах:

Коляденко Юлия Юрьевна – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры инфокоммуникационной инженерии имени В.В. Поповского, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина; e-mail: yuliia.koliadenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0247-2736>

Чурсанов Никита Александрович – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант кафедры инфокоммуникационной инженерии имени В.В. Поповского, Украина; e-mail: mykyta.chursanov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3568-2633>