

Кременецкая Я. А., Жукова Е. Р., Градобоева Н. В., Любас Д. А., Саенко Б. В.

Государственный университет телекоммуникаций, Киев

ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИОКАНАЛА И ШУМОВ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

В статье проанализированы подходы к математическому моделированию мобильных систем в миллиметровом диапазоне волн на основе исследования фундаментальных физических аспектов, влияющих на значение шумов, потерь и усиления сигнала. Показано, что для моделирования энергетического бюджета радиоканалов в миллиметровом диапазоне необходимо учитывать не только поглощение миллиметровых волн в атмосфере и интерференционные помехи, но и шумы, усиления сигнала, связанные с методами генерации, излучения, особенностями распространения в городской застройке

Ключевые слова: миллиметровый диапазон, беспроводная связь, шумы, интерференционные помехи, энергетический бюджет радиопередачи, технология RoF, отношение сигнал/шум.

Kremenetska Ya. A., Zhukova O. R., Hradoboiyeva N. V., Liubas D. O., Saienko B. V.

State University of Telecommunications, Kiev

PHYSICAL ASPECTS OF THE RADIO CHANNEL AND NOISE MODELING IN THE MILLIMETER RANGE

The article analyzes the approaches to the mathematical modeling of mobile systems in millimeter wavelength range. For implementation of wireless communication concepts in the millimeter range, the use of photonic methods for the formation and transmission of signals through optical lines using the technology Radio over Fiber is considered. Considered the architecture of the mobile network using Radio over Fiber technology. The optical heterodyne noise used to generate radio signals is analyzed. The mathematical analysis of the radio link energy budget components in the millimeter range is conducted on the basis of the fundamental physical aspects study affecting the value of noise, loss and amplification of the signal. Comparison of signal to interference ratio, signal to noise ratio, the probability of transmitting information radio signals through reflected paths. From the analysis of the components of the radio link energy budget in the millimeter range, it follows that it is necessary to take into account in the models the interference noise as well as the noise associated with the generation method, signals emission, for example, in phased array antennas, and also to take into account the effects of molecular absorption (repeated radiation) in the atmosphere and the reflection effects of signals in the urban scenario. A quasi-optical model of cone-shaped radiation of an antenna is possibly more suitable for calculating noise disturbances and signal loss in multipath propagation models, taking into account multiple reflections and diffractions, as well as absorption in various media.

Keywords: millimeter wave band, wireless communication, noise regime, interference, radio link energy budget, RoF technology, signal to interference ratio, signal to noise ratio.

Кременецька Я. А., Жукова О. Р., Градобоева Н. В., Любас Д. О., Саєнко Б. В.

Державний університет телекомунікацій, Київ

ФІЗИЧНІ АСПЕКТИ МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОКАНАЛУ ТА ШУМІВ У МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ

У статті проаналізовано підходи до математичного моделювання мобільних систем в міліметровому діапазоні хвиль. Для реалізації концепцій безпроводового зв'язку в міліметровому діапазоні розглядається використання фотонних методів формування та передачі сигналів через

оптичні лінії з використанням технології *Radio over Fiber* (радіо по волокну). Розглянута архітектура мобільної мережі з використанням технології *Radio over Fiber*. Проаналізовано шуми оптичного гетеродинування, що використовується для формування радіосигналів. Проведено математичний аналіз складових енергетичного бюджету радіолінії в міліметровому діапазоні на основі дослідження фундаментальних фізичних аспектів, що впливають на значення шумів, втрат і підсилень сигналу. Проведено порівняння показників відношення сигнал/інтерференція (*signal to interference ratio*), відношення сигнал/шум (*signal to noise ratio*), ймовірності передачі інформаційних радіосигналів через відбиті шляхи. З проведеного аналізу складових енергетичного бюджету радіолінії в міліметровому діапазоні, слідує, що необхідно в моделях покриття враховувати як інтерференційні завади, так і шуми, пов'язані з методом генерації, випромінювання сигналів, наприклад, в фазованих антенних решітках, а також враховувати ефекти молекулярного поглинання (повторного випромінювання) в атмосфері і ефекти відбиття сигналів в міській забудові. Запропоновано квазіоптичну модель конусоподібного випромінювання антени, яка можливо, більш прийнятна для розрахунків шумових завад і втрат сигналу в багатопроменевих моделях поширення з урахуванням множинних відбивань та дифракцій, а також поглинання в різних середовищах.

Ключові слова: міліметровий діапазон, безпроводовий зв'язок, шуми, інтерференційні завади, енергетичний бюджет радіолінії, технологія *RoF*, відношення сигнал/інтерференція, відношення сигнал/шум.

Введение. Для увеличения пропускной способности телекоммуникационных систем, обслуживающих мобильные сети 5G и другие беспроводные технологии, включая и нано-сети, предполагается в ближайшем будущем использование миллиметрового диапазона (ММД). Однако применение такого диапазона значительно отличается, например, от дециметрового диапазона по физическим особенностям распространения, методам формирования сигналов, характеристикам генерирующих устройств. Как отмечено в [1], проблема моделирования канала 5G заключается в обеспечении фундаментальной физической основы, которая являлась бы гибкой и точной, особенно в миллиметровом диапазоне.

Общеизвестно, что основным фактором, влияющим на выбор методов модуляции, кодирования и достижения максимальной скорости передачи данных, является значение отношение сигнал/помехи плюс шум (англ. SINR, *signal-to-interference-plus-noise ratio*). Для ММД основными механизмами распространения являются поглощение в атмосфере, отражения, в меньшей степени – дифракция, поэтому подходы к моделированию радиоканалов, помех и шумов для ММД могут существенно отличаться от подходов к моделированию каналов на более низких частотах. Например, в диапазоне 100 МГц до 6 ГГц основным фактором для расчета энергетического покрытия городского сценария является дифракция волн. Созданы модели канала, учитывающие различную дифракцию, в зависимости от геометрии (типичности) застройки городов [2].

В ММД поглощение и низкое проявление дифракционных особенностей волн ММД приводят к использованию малых ячеек – для 60 ГГц (окно поглощения ММД) радиусом до 10 метров, для мобильных систем (28, 73 ГГц) до 150 – 200 м, для наносетей в ММД (включая терагерцовый диапазон) – несколько десятков миллиметров [1, 3, 4]. Также для ММД волн характерна возможность узконаправленной передачи энергии – от нескольких градусов до долей одного градуса, что дает возможность повышения энергоэффективности таких систем и компенсации высокого поглощения в атмосфере.

Методы формирования сигналов в ММД еще исследуются [5, 6]. При малой длине волны ММД важны шумовые и динамические характеристики излучательных устройств. Для генерации ММВ перспективными являются методы оптического гетеродинирования, т.е. преобразования в фотодиоде оптических доменов в электрические сигналы миллиметрового диапазона [5, 6]. Такой способ рассматривается перспективным как для генерации сигналов ММД, так и для модуляции, а также для конвертирования миллиметровых сигналов в оптические, мультиплексирования, передачи по оптоволоконным линиям связи на большие расстояния, например, для объединения базовых станций и дата-центров. Оптоэлектронные

методы также применяются для формирования диаграмм направленности фазированных антенных решеток (ФАР) [5, 7].

Исследование шумов, потерь и задержки сигнала является основополагающими для ММД. В отличие от классического подхода для систем, работающих в дециметровом диапазоне, где в качестве шума определяется только тепловой шум, необходимо учитывать зависимость выходной мощности от шума и динамический диапазон помех.

К тому же, возможно, весомыми по компонентам в энергетическом бюджете радиоканала ММД могут быть шум молекулярного поглощения [4] и рассеяние вследствие отражений (как диффузных, так и зеркальных) [8, 9].

Много работ посвящено математическому моделированию интерференционных помех и вероятности блокировки в каналах миллиметрового диапазона для мобильных систем на основе стохастической геометрии. Однако в них не учитываются шумы, связанные с методом формирования сигнала, шумы молекулярного поглощения, шумы и усиления сигнала, связанные с явлениями отражений, дифракции, рассеяния сигнала ММД. В данной работе проанализированы значения величин, перечисленных шумов (усилений) сигнала, их вклад в SIR (signal-to-interference ratio) и SNR (signal-to-noise ratio).

1. Квазиоптическая модель радиоканала. Энергетический потенциал радиолинии прямой видимости в радиотехнике принято описывать классическим уравнением Фрииса:

$$P_{RX}/P_{TX} = G_{TX} G_{RX} (\lambda/4\pi d)^2,$$

где P_{TX} , P_{RX} – мощности передающей и принимающей антенн соответственно; G_{TX} и G_{RX} – усиление передающей и принимающей антенн соответственно; λ – длина волны передаваемого сигнала; d – расстояние между передатчиком и приемником; $(\lambda/4\pi d)^2$ – потери в "свободном пространстве".

Приближенные к уравнению Фрииса математические эмпирические модели радиоканалов используют на данный момент различные исследовательские группы (5GCM, мм MAGIC, METIS, 3GPPTR 38.901, ...) для реализации мобильных телекоммуникаций в полосе 0,5-100 ГГц [1]. При выводе уравнения Фрииса использовалось частотно зависимое выражение для эффективной площади антенны:

$$A_{\text{eff}} = D\lambda^2/4\pi = Dc^2/4\pi f_c^2,$$

где D – коэффициент направленного действия антенны.

Узконаправленное излучение в ММД формируется с использованием фазированной антенной решетки (ФАР) с большим количеством излучающих элементов. Коэффициент направленного действия ФАР (коэффициент усиления) зависит от количества излучающих элементов ($D \approx 2Nd/\lambda$).

В [10] отмечено, что выразить зависимость значения A_{eff} сложно, так как это связано с большим количеством переменных, сложной геометрией излучающих элементов ФАР, в качестве которых используются рупорные ТЕМ антенны. К тому же, в системах 5G предполагается адаптивное формирование луча по мощности, направлению, углу раскрытия и д.т. [1]. Для мобильных система связь в ММД на первых порах предполагается только от базовой станции к пользователю, т.е. в прямом канале.

Поэтому, для анализа энергетического бюджета радиосистем ММД возможно предпочтительна квазиоптическая модель конусообразного излучения антенны, которая типична для расчета оптических открытых систем (рис. 1):

$$P_{TX} = P_{RX} \frac{4\pi d^2 L_{\text{atm}}(f_c, d)}{D_{TX} A_{RX}}, \quad (1)$$

где $L_{atm}(f_c, d)$ – коэффициент затухания сигнала в атмосфере в зависимости от частоты несущей f_c ; $D_{TX} = 4\pi/\Omega = 2/(1 - \cos(\alpha/2))$ – коэффициент направленного действия излучающей антенны; α – угол раскрытия антенны; A_{RX} – эффективная площадь приемной антенны.

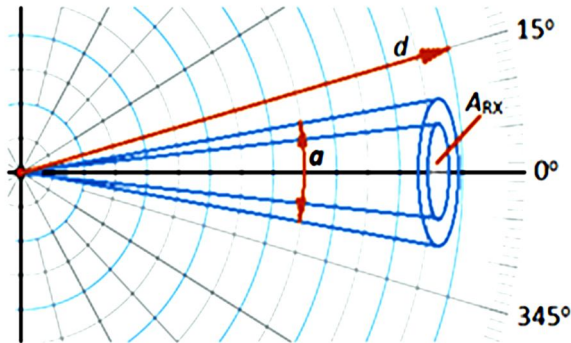


Рис. 1. Квазиоптическая модель конусообразного излучения антенны.

Для узконаправленного излучения и передачи на малые расстояния, например, для наносетей, возможно формулу (1) выразить через поверхностную плотность потока энергии излучения:

$$E_{TX} = E_{RX} \frac{4\pi d^2 L_{atm}(f_c, d)}{D_{TX}} \quad (2)$$

Боковые лепестки диаграммы направленности антенны также можно учитывать квазиоптической моделью (1) или (2), как и затухание в различных средах. Квазиоптические модели (1) и (2), где не используется частотнозависимый параметр затухания в "свободном пространстве"

$(\lambda/4\pi d)^2$, возможно, более приемлемы для расчетов интерференционных помех и потерь сигнала в многолучевых моделях распространения, особенно с учетом геометрии застройки [11].

2. Шумы и потери в канале ММД. В энергетическом бюджете канала необходимо учитывать потери и шумы, которые влияют на выбор способов кодирования, модуляции и т.д. Термины потерь и шумов часто не различаются, поскольку их влияние на систему одинаково [12].

Для анализа бюджета радиосистем необходимо определить минимально допустимую мощность сигнала в приемнике, т.е. чувствительность приемника:

$$P_{RX-sens} = P_S (N_{int} + N_{TX} + N_{RX}) / N, \quad (3)$$

где P_S/N обозначает отношение мощности несущей к мощности шума, необходимое для демодуляции; N_{TX} – мощность шума источника сигнала, которая включает в себя не только тепловой шум, но и другие компоненты, связанные с методом генерации сигнала; N_{RX} – потери мощности сигнала в приемнике; N_{int} – мощность интерференционных помех, которая включает: $N_{int} = N_K + N_M + N_{NLOS}$, где N_K – интерференционные помехи от других каналов связи; N_M – шум молекулярного поглощения; N_{NLOS} – изменения уровня сигнала, связанные с дифракцией и отражениями от объектов городской застройки.

Возможно, также необходимо учитывать рассеяние за счет диффузных (или множественных) отражений, молекулярного рассеяния и рассеяния на турбулентностях атмосферы. Источники шумов N_M и N_{NLOS} могут быть как внутри канала, так и в других каналах связи. Сигнал можно восстановить должным образом, если его мощность на расстоянии d от передающей антенны превышает чувствительность приемника, то есть когда $P_{RX} - P_{RX-sens} \geq 0$. Отношение сигнал/помехи плюс шум (англ. SINR, signal-to-interference-plus-noise ratio), определяющее качество принимаемого сигнала, принимает форму:

$$SINR = \frac{P_{RX}}{(N_{int} + N_{TX} + N_{RX})}, \quad (4)$$

или с использованием (1):

$$SINR = \frac{P_{TX} D_{TX} A_{RX}}{4\pi d^2 (N_{int} + N_{TX} + N_{RX}) L_{atm}}.$$

3. Шум молекулярного поглощения. Излучательная способность среды, в которой распространяются радиоволны ММД и терагерцового диапазона (0,1-1 ТГц) рассматривается как источник шума [4]. В приближение к закону Бугера-Ламберта-Бера мощность шума молекулярного поглощения можно записать:

$$N_M(f_c, d) = P_{TX} \frac{D_{TX} A_{RX}}{4\pi d^2} (1 - e^{-\gamma(f)d}),$$

где $\gamma(f)$ – обобщенный коэффициент поглощения среды, значение которого можно найти, например, из базы данных HITRAN [13].

Электромагнитное излучение, поглощаемое молекулами в среде, как показано в работах [14], повторно излучается не в фазе приблизительно на тех же частотах излучения, которое было поглощено. Однако, в работе [15] показано, что поглощение молекулами водяного пара терагерцового излучения вводит цветной шум. На данный момент природа шума поглощения молекул еще изучается. Возможно, в основе поглощения/излучения лежат комбинация различных физических явлений, например, вынужденного, спонтанного, повторного излучений. Авторы статей [14, 15] предполагают, что молекулярный шум поглощения является основным фактором, определяющим отношение SNR для окон прозрачности терагерцового диапазона, и таким образом основным фактором дистанционного ограничения, особенно для плотных сетей. Однако остаются неопределенными время релаксации молекулярного шума, время задержки, связанное с переизлучением энергии, спектральный состав и т.д. Временные характеристики(свойства) поглощения/излучения в конечном счете определяют количество энергии, полученное приемником. Поэтому для терагерцового диапазона предлагаются импульсные методы модуляции и кодирования информации [15].

4. Моделирование интерференционных помех в сотовых сетях ММД на основе стохастической геометрии. Мощность интерференционных помех от других каналов связи в произвольно расположенном опорном приемнике в соответствии с [16] можно выразить:

$$N_K = \sum_{i=1}^K P_{TX} h_i G(\theta_i, \psi_i) l_i^{-a},$$

где g_i – передаваемая мощность; h_i – коэффициент затухания в канале (для моделирования мелкомасштабно замирания используют переменную Nakagami); l_i – расстояние между передатчиком и приемником в i -ом интерферирующем канале соответственно; K – количество активных источников помех.

Расположение беспроводных узлов (базовых станций, пользователей, элементов блокировки сигнала) для ММД в основном моделируется пространственным Пуассоновским точечным процессом [16, 17]. Для одномерной модели потери учитываются по закону $l(r) = r^{-a}$. Для каналов прямой видимой видимости LOS (line-of-sight) значение коэффициента a обычно выбирается равным двум, для каналов вне прямой видимости NLOS (non-line-of-sight), когда приемник принимает сигнал через отражение, $a=3, 3.5, \dots 5$.

Тогда отношение сигнала/ шум+интерференционный шум определяется как

$$SINR = \frac{P_{TX} G_0 l_0^{-a}}{\sum_{i=1}^K P_{TX} h_i G(\theta_i, \psi_i) l_i^{-a} + \sigma^2},$$

где индекс 0 соответствует опорному приемнику и передатчику.

Значение сигнал/интерференционный шум соответственно:

$$SIR = \frac{G_0 I_0^{-a}}{\sum_{i=1}^K h_i G(\theta_i, \psi_i) I_i^{-a}}.$$

Потери в радиоканале ММД также учитываются СИ моделью:

$$L^{\text{CI}}(f_c, d_{3D})[\text{dB}] = \text{FSPL}(f_c, 1 \text{ м}) + 10n \log_{10}(d_{3D}) + \chi_{\sigma}^{\text{CI}},$$

где $\chi_{\sigma}^{\text{CI}}$ – представляет собой потери из-за затенения, которое моделируется как нулевая средняя гауссовская случайная величина со стандартным отклонением в дБ; n – показатель потери пути, найденный путем сведения к минимуму ошибки от измеренных данных до (2); $d_{3D} > 1 \text{ м}$; $\text{FSPL}(f_c, 1 \text{ м})$ – потери в свободном пространстве на расстоянии в 1 м.

Вероятность нахождения интерферирующих узлов внутри области A для однородного пространственного точечного процесса Пуассона находится выражением [17]:

$$P\{n \in R\} = \frac{(\lambda A)^K}{K!} e^{-\lambda A}, \quad K \geq 0,$$

где λ – плотность интерферирующих узлов K , R – радиус области A круговой формы.

Для расчетов также вводятся параметры спектральной эффективности для системы ALOHA или TDMA (способы доступа, предлагаемые для мобильных систем в ММД), плотности потенциальных источников помех, передатчиков (звеньев), препятствий на единицу площади и т.д.

5. Усиления, шумы сигнала ММД, связанные с явлениями отражений и дифракции.

Для ММД телекоммуникаций 5G предполагаются малые размеры сот (10-150 м и меньше) из-за потребности в быстром обмене мультимедийными данными, например, между D2D-коммуникациями, сильного поглощения волн ММД, распространение волн ММД в области прямой видимости LOS, узконаправленная передача сигнала. Также для систем в ММД анализируется влияние отражений и дифракций на усиление сигнала для областей LOS и NLOS. Проведенные измерения коэффициентов отражения от строительных материалов на частоте 28 ГГц [18] показывают значения до 0,896.

При рассмотрении многолучевой модели энергетического потенциала в городской застройке, образованной в результате отражений, дифракций, поглощения лучей, для угла раскрытия передающей антенны α и эффективной площади принимающей антенны A_{RX} (не зависящей от несущей частоты), мощность сигнала на входе приемной антенны можно представить как [9]:

$$P_{\text{RX}} = \frac{P_{\text{TX}} D_{\text{TX}}(\alpha) A_{\text{RX}}}{4\pi r^2} \times \sum_j \left(\prod_m p_m(\theta_j) \frac{|\Gamma_m(\theta_{mj})|^2}{\rho_m} \prod_n p_n(\theta_j) |\Gamma_n(\theta_{nj})|^2 \prod_l p_l(\theta_j) \frac{|D(\theta_{lj})|^2}{\rho_l} \right),$$

где P_{TX} – мощность передающей антенны; $\rho_m, \rho_l > 1$ – коэффициенты, определяющие избыток пути лучей при отражении и дифракции; $p(\theta_j)$ – вероятность соответствующего процесса для определенных условий; Γ , T , D – коэффициенты отражения, пропускания и дифракции соответственно.

Вследствие узконаправленности излучения антенн миллиметрового диапазона и малой дальности передачи (для мобильных систем), m , n и l должны принимать определенные значения, зависящие от геометрии застройки.

6. Фотонные методы формирования сигналов и источники шумов. Для реализации концепций беспроводной связи в ММД предполагается использовать фотонные методы формирования и передачи сигналов ММД по оптическим линиям. Фотонные методы генерации миллиметровых сигналов более фундаментально изучены по сравнению с электронными методами, а также имеют лучшие шумовые и динамические характеристики [6]. Фотонные методы формирования и передачи сигналов с использованием технологии RoF (Radio over Fiber) позволяют: перестраивать частоту с определенным шагом; работают в очень широкой полосе частот, например, 10 ГГц; передают радиосигналы через оптическое волокно на большие расстояния (километры) до удаленной базовой станции или дата-центра (рис. 2, 3), а также мультиплексировать каналы с использованием технологии WDM.

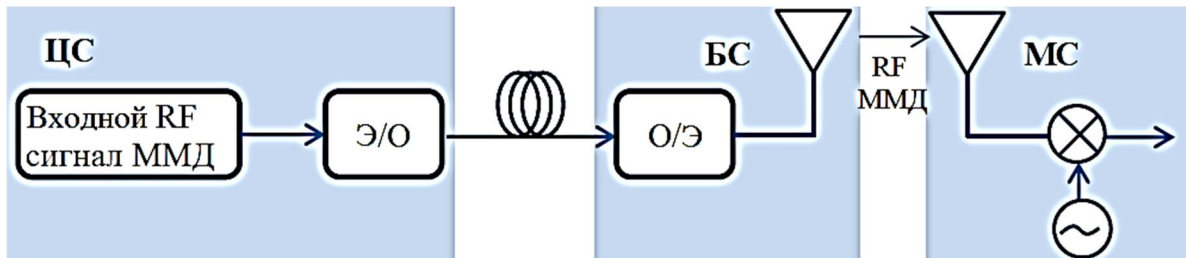


Рис.2. Структура канала для мобильной системы ММД с использованием технологии RoF; ЦС – центральная станция, БС–базовая станция, МС –– мобильная станция, О/Э – оптоэлектронный преобразователь, RF – радиочастотный сигнал ММД

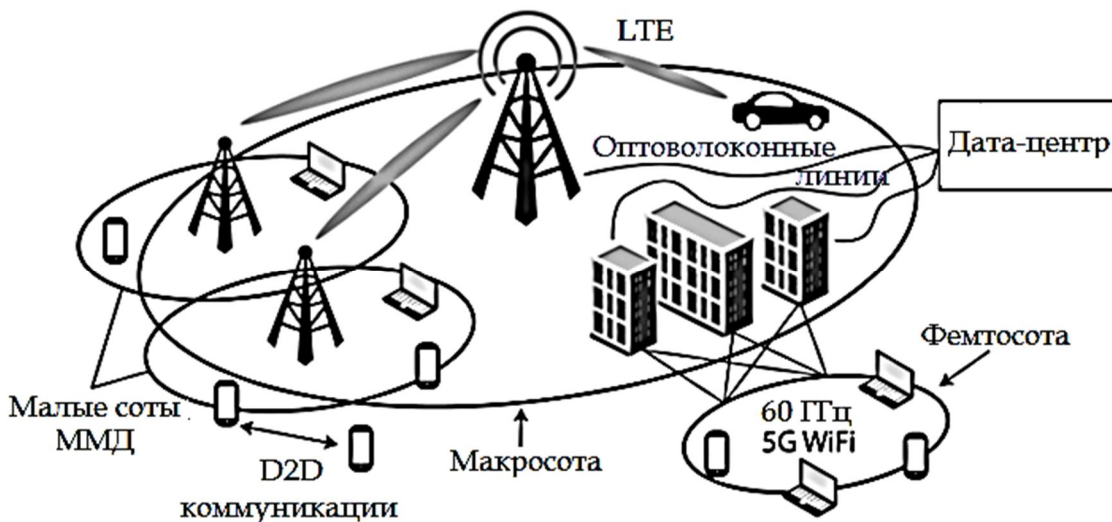


Рис. 3. Архитектура мобильной сети с использованием технологии RoF

Источники шумов, генерируемых с использованием технологией RoF рассматривают как гауссовские случайные процессы с нулевым средним, которые можно суммировать как источники тока, поскольку они образуются при оптоэлектронном преобразовании в фотодиоде [5]:

$$\sigma_{\text{noise}}^2 = \sigma_{\text{thermal}}^2 + \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{RIN}}^2 + \sigma_{\text{sig-ASE}}^2 + \sigma_{\text{ASE-ASE}}^2,$$

σ_{RIN} – флуктуации оптической интенсивности лазера; $\sigma_{\text{sig-ASE}}$ – шум оптического усилителя, в котором наряду с шумом усиленного сигнала также усиливается шум $\sigma_{\text{ASE-ASE}}$ спонтанного излучения (ASE), который генерируется внутри самого усилителя; σ_{thermal} – тепловой шум, вызванный случайным движением носителей в проводнике, что приводит к случайным

колебаниям генерируемого тока; σ_{shot} – дробовой шум, представляющий случайные колебания сигнала, вызванные дискретностью величины заряда.

Тогда отношение сигнал-шум на выходе фотодиода может быть записано следующим образом:

$$SNR_{\text{PD,out}} = \frac{S}{\sigma_{\text{noise}}^2} = \frac{P_{\text{opt}}^2 R_L}{B_{\text{el}} \left(\frac{4k_B T}{R_L \mathfrak{R}^2} + 2q \frac{P_{\text{opt}}}{\mathfrak{R}} + 10 \frac{\text{RIN}^{\text{dB}}}{10} P_{\text{opt}}^2 + 2G_{\text{opt}}^2 P_{\text{opt}} NF_{\text{opt}} h\nu_{\text{opt}} + (G_{\text{opt}} NF_{\text{opt}} h\nu_{\text{opt}})^2 B_{\text{opt}} \right)}, \quad (5)$$

где k_B – постоянная Больцмана; T – температура; B_{el} – ширина полосы сигнала, полученная после преобразования оптического сигнала в электрический в PD; q – заряд электрона; P_{opt} – средняя оптическая входная мощность; R_L – сопротивление нагрузки; \mathfrak{R} – чувствительность фотодиода; G_{opt} – коэффициент усиления оптического усилителя; NF_{opt} – коэффициент шума оптического усилителя; B_{opt} – ширина спектра оптического усилителя; $h\nu_{\text{opt}}$ – энергия фотона; RIN – относительный шум интенсивности лазера.

Пассивные оптические и электрические компоненты (оптические волокна, электрические кабели, разъемы и т. д.) не создают флуктуации тока, поэтому их вклад в общий шум можно не учитывать. Оптические модуляторы также может рассматриваться как пассивный компонент без помех, поскольку его основным элементом является оптический волновод, который не создает шума. Экспериментальные результаты [7] показывают, что при ширине спектральной линии оптического источника в пределах 50 МГц и диапазоне пропускания до 50 км хроматическая дисперсия SSMF-волокна приводит к незначительному увеличению фазового шума.

После фотодиода система проходит через набор малошумящих усилителей (LNA) и усилителей средней мощности (MPA), каскадный уровень шума усилителей в соответствии с формулой Фрииса становится следующим [5]:

$$NF_{\text{amp}} = NF_{\text{LNA}} + (NF_{\text{MPA}} - 1)/G_{\text{LNA}},$$

NF_{amp} – общий уровень шума каскада усилителей; NF_{LNA} – коэффициент шума усилителя; NF_{MPA} – коэффициент шума усилителя мощности; G_{LNA} – коэффициент усиления шума в усилителе.

7. Анализ значений SIR и SNR для систем связи в ММД. Как показано выше, источники шума для ММД могут быть не только связаны с интерференционными помехами, но и с методами генерации сигналов. В основном внимание в научной литературе уделено исследованию нтерференционных шумов и потерь для мобильных систем в ММД, в меньшей степени исследованию усилению сигналов за счет отражений, шума молекулярного поглощения, шумов, связанных с методом генерации радиосигналов. Однако значения перечисленных шумов могут быть сравнимы.

На рис. 4-6 приведены для сравнения результаты расчетов шумов мобильных систем ММД: интерференционных шумов SIR [19], шумов, связанных с методом оптического гетеродинамирования (4), и вероятности усиления сигнала за счет отражений [8] соответственно.

Из сравнения графиков, можно сделать вывод, что влияние интерференционных помех на моделирование покрытия сетей в ММД может быть сравнимо со значениями шумов, источниками которых могут быть генерирующие устройства, а также необходимо учитывать эффекты отражений, которые также можно использовать для расчета зон усиления полезного сигнала.

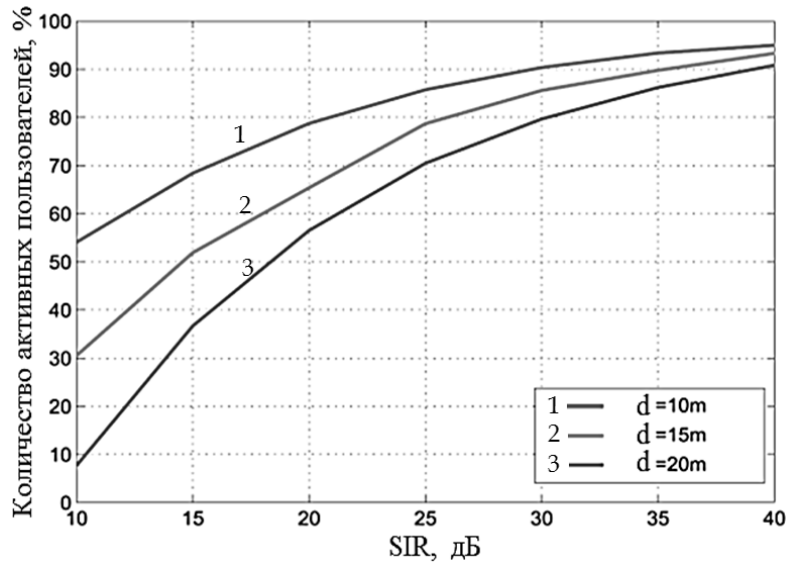


Рис. 4. Влияние порога SIR на процент активных пользователей в области передачи обслуживания: d – расстояние между пользователем и базовой станцией [19]

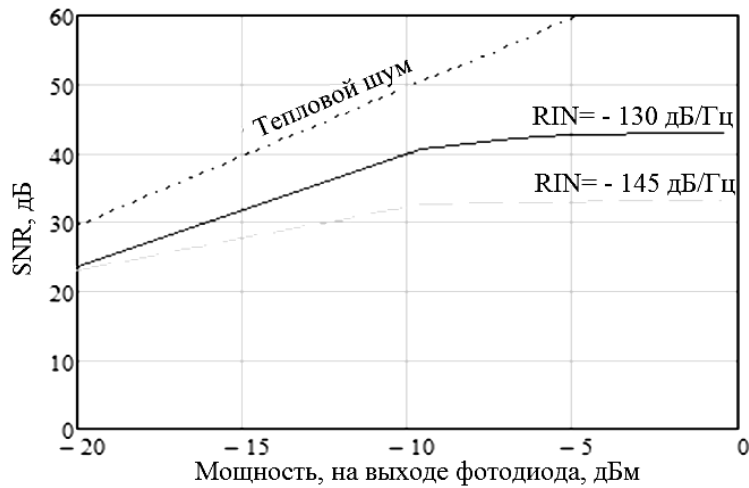


Рис. 5. Значения SNR, рассчитанные по формуле (5).

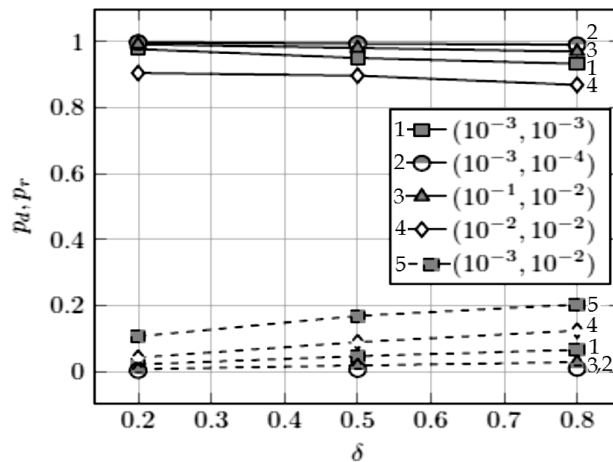


Рис. 6. Вероятность соединения через прямой путь ρ_d (непрерывные линии) и через отраженный путь ρ_r (пунктирные линии) для различных коэффициентов отражения δ . λ , λ_0 – плотность BS и плотность блокирующих(или отражающих) объектов соответственно.

Выводы. В настоящее время модели математических каналов для беспроводной технологии 5G (и следующих поколений) только разрабатываются. Важной проблемой для точных моделей канала 5G с использованием ММД является обеспечение фундаментальной физической основы. Из проведенного анализа составляющих энергетического бюджета радиолинии в ММД, следует, что необходимо в моделях покрытия учитывать как интерференционные шумы, так и шумы, связанные с методом генерации, излучения сигналов ФАР, а также учитывать эффекты молекулярного поглощения (повторного излучения) в атмосфере и отражений сигналов в городской застройке.

Список использованной литературы

1. Rappaport T. S. Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks / T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney, Jr. Molisch, E. Mellios, J. Zhang. // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – Dec. 2017. – Vol. 65. – P. 6213-6230.
2. Bertoni H. L. *Radio Propagation for Modern Wireless Systems* / H. L. Bertoni. – New Jersey: Prentice Hall PTR, 2000. – 258 p.
3. Petrov V. Interference and SINR in Millimeter Wave and Terahertz Communication Systems with Blocking and Directional Antennas / V. Petrov, M. Komarov, D. Moltchanov, J. M. Jornet, Y. Koucheryavy // *IEEE Trans. Wireless Commun.* – 2017. – Vol. 16, – №3. – P. 1791-1808.
4. Jornet J. M. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band / J. M. Jornet, I. F. Akyildiz // *IEEE Trans. Wireless Commun.*, – 2011. – Vol.10, – №10. – P. 3211-221.
5. Urick V. J. *Fundamentals of Microwave Photonics* / V. J. Urick, J. D. McKinney, K. J. Williams. – Hoboken, NJ: Wiley, 2015. – 488 p.
6. Кременецька Я. А. Особливості формування сигналів міліметрового та терагерцового діапазонів для радіофотонних систем зв'язку / Я. А. Кременецька, Г. С. Фелінський, Ю. В. Мельник, Є. О. Бондаренко // *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*. – 2017. – №3(47). – С. 50-63.
7. Qi G. Phase-Noise Analysis of Optically Generated Millimeter-Wave Signals With External Optical Modulation Techniques / G. Qi, J. Yao, J. Seregelyi, S. Paquet, C. Belisle, X. Zhang, K. Wu, R. Kashyap // *Journal of Lightwave Technol.* – 2006, – №24. – P. 4861-4875.
8. Narayanan A. Coverage Analysis in Millimeter Wave Cellular Networks with Reflections / A. Narayanan, T. V. Sreejith, R. K. Ganti // *IEEE Global Communications Conference*. – 2017. – P. 1-6.
9. Кременецька Я. А. Підвищення енергетичної ефективності систем міліметрового діапазону методом створення зон підсилення сигналу внаслідок дифракцій та відбивань / Я. А. Кременецька, Н. В. Градобоева, С. В. Морозова // *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. – 2017. – №3. – С. 21-25.
10. Hansen R. C. *Phased Array Antennas*. 2-nd edition / R. C. Hansen. – Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2009. – 547 p.
11. Kremenetskaya Y. A. Quasi-optical approach to the analysis of the energy model of millimeter wave propagation and antenna characteristics / Y. A. Kremenetskaya, I. O. Liskovskiy, E. R. Zhukova // *IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques*. – Kyiv, – 24-27 May 2017. – P. 395-398.
12. Sklar B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*, 2-nd edition / B. Sklar. – Prentice Hall, 2001. – 1079 p.
13. Rothman L. S. *HITRAN: High-resolution transmission molecular absorption database* / L. S. Rothman et al. Harvard-Smithson Center for Astrophysics. – 2014. – <https://www.cfa.harvard.edu>.

14. Kokkonen J. A discussion on molecular absorption noise in the terahertz band // J. Kokkonen, J. Lehtomäki, M. Juntti // Nano Communication Networks. Journal of Nano Communication Networks. – 2010. – Vol.8. – P. 35-45.
15. Jornet J. M. Low-weight channel coding for interference mitigation in electromagnetic nanonetworks in the terahertz band // J. M. Jornet, I. F. Akyildiz // IEEE International Conference on Communications. – 2011. – P. 1-6.
16. Haenggi M. Interference in Large Wireless Networks / M. Haenggi, Ganti R. Foundations and Trends® in Networking. – 2009. – Vol.3. – №2. – P. 127-248.
17. Pinto P. Communication in a Poisson field of interferers part I: interference distribution and error probability / P. Pinto, M. Win // IEEE Trans. Wireless Commun. – 2010. – Vol. 9. – №7. – P. 2176-2186.
18. Zhao H. GHz millimeter wave cellular communication measurements for reflection and penetration loss in and around buildings in New York city / H. Zhao et al. // IEEE International Conference on Communications. – Budapest. – 9-13 June 2013. – P. 5163-5167.
19. Ebrahim A. Adaptive De-Coupling and Multi-BS Association in Femtocell Networks / A. Ebrahim, E. Alsusa // IEEE Access. – 2017. – Vol.5. – P. 18121-18131.

References (MLA)

1. Rappaport T. S., Xing Y. "MacCartney G. R., Molisch Jr., Mellios E., and Zhang J. Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 65(12) (2017): 6213-6230. Print.
2. Bertoni H. L. *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*. New Jersey: Prentice Hall PTR, (2000). Print.
3. Petrov V., Komarov M., Moltchanov D., Jornet J. M., and Koucheryavy Y. "Interference and SINR in Millimeter Wave and Terahertz Communication Systems with Blocking and Directional Antennas." *IEEE Trans. Wireless Commun.* 16(3) (2017): 1791-1808. Print.
4. Jornet J. M., and Akyildiz I. F. "Channel Modeling and Capacity Analysis for Electromagnetic Wireless Nanonetworks in the Terahertz Band." *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 10(10) (2011): 3211–3221. Print.
5. Urick V. J., McKinney J. D. and Williams K. J. *Fundamentals of Microwave Photonics*. Hoboken, NJ: Wiley, 2015. Print.
6. Kremenetskaya Y. A., Felinsky G. S., Melnik Y. V., and Bondarenko E. A. "Features of the Formation of Millimeter and Terahertz Waveforms." *Naukovi Zapysky Ukrayinskoho Naukovo-Doslidnoho Instytutu Zviazku* 3(47) (2017): 50-63. Print.
7. Qi G., Yao J., Seregelyi J., Paquet S., Bélisle C., Zhang X., Wu K., and Kashyap R. "Phase-Noise Analysis of Optically Generated Millimeter-Wave Signals With External Optical Modulation Techniques." *J. Lightwave Technol* 24 (2006): 4861-4875. Print.
8. Narayanan A., Sreejith T. V., and Ganti R. K. "Coverage Analysis in Millimeter Wave Cellular Networks with Reflections." *IEEE Global Communications Conference* (2017): 1-6. Print.
9. Kremenetska Y. A., Gradoboyeva N. V., and Morozova S. V. "Increase in Energy Efficiency of Millimetres Systems by the Method of Channel Gain Due to Diffraction and Reflection." *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohiyi* 3(56) 2017: 21-25. Print.
10. Hansen R. C. *Phased Array Antennas*. Wiley: Interscience, 2009. Print.
11. Kremenetskaya Y. A., Liskovskiy I. O., and Zhukova E. R. "Quasi-Optical Approach to the Analysis of the Energy Model of Millimeter Wave Propagation and Antenna Characteristics." *IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques*, Kyiv, Ukraine, (2017): 395-398. Print.
12. Sklar B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. 2nd edition. Prentice Hall, 2001. Print.

13. Rothman L. S. et al. *Hitran: High-Resolution Transmission Molecular Absorption Database*. Harvard-Smithson Center for Astrophysics, 2014. <https://www.cfa.harvard.edu>. Web. 11 Sep. 2017.
14. Kokkonen J., Lehtomäki J., and Juntti M. "A Discussion on Molecular Absorption Noise in the Terahertz Band." *Nano Communication Networks*, 8 (2016): 35-45. Print.
15. Jornet J. M., and Akyildiz I. F. "Low-Weight Channel Coding for Interference Mitigation in Electromagnetic Nanonetworks in the Terahertz Band." *IEEE Int. Conf. Commun.* (2011): 1-6. Print.
16. Haenggi M., and Ganti R. K. "Interference in Large Wireless Networks." *Foundations and Trends® in Networking* 3(2) (2009): 127-248. Print.
17. Pinto P., and Win M. "Communication in a Poisson field of Interfererspart I: Interference Distribution and Error Probability." *IEEE Trans. Wireless Commun.* 9(7) (2010): 2176–2186. Print.
18. Zhao H. et al. "28 GHz Millimeter Wave Cellular Communication Measurements for Reflection and Penetration Loss in and Around Buildings in New York City." *IEEE International Conference on Communications* (2013): 5163-5167. Print.
19. Ebrahim A., and Alsusa E. "Adaptive De-Coupling and Multi-BS Association in Femtocell Networks." *IEEE Access*, 5 (2017): 18121-18131. Print.

Автори статті

- Кременецька Яна Адольфівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри телекомунікаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, м. Київ. Тел.: +380 (67) 302 22 42. E-mail: ya.cremen@ukr.net.
- Жукова Олена Ромуальдівна** – старший викладач кафедри телекомунікаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел.: +380 (96) 701 77 79. E-mail: oz48716@gmail.com.
- Градобоєва Неля Вікторівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри телекомунікаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел.: +380 (66) 673 13 00. E-mail: gradob@ukr.net.
- Любас Дмитро Олексійович** – магістр, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел.: +380 (50) 674 31 42. E-mail: lybdim@gmail.com.
- Сасенко Богдан Віталійович** – магістр, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел.: +380 (93) 817 78 75. E-mail: saienko.bohdan@gmail.com.

Authors of the article

- Kremenetska Yana Adolfivna** – candidate of science (technic), associate professor of telecommunication technologies department, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel.: +380 (67) 302 22 42. E-mail: ya.cremen@ukr.net.
- Zhukova Olena Romualdivna** – senior lecturer of telecommunication technologies department, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel.: +380 (96) 701 77 79. E-mail: oz48716@gmail.com.
- Hradoboieva Nelia Viktorivna** – candidate of science (technic), associate professor of telecommunication technologies department, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel.: +380 (66) 673 13 00. E-mail: gradob@ukr.net.
- Liubas Dmytro Oleksiiovych** – master studies in electronics and telecommunications, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel.: ++380 (50) 674 31 42. E-mail: lybdim@gmail.com.
- Saienko Bohdan Vitaliiovych** – master studies in electronics and telecommunications, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel.: +380 (93) 817 78 75. E-mail: saienko.bohdan@gmail.com.

Дата надходження
в редакцію: 27.03.2018 р.

Рецензент:
доктор фізико-математичних наук, професор
Г. С. Фелінський
*Київський національний університет
імені Тараса Шевченка*