# DOI: 10.18721/JCSTCS.10102 УДК 004.725.5, 621.396

# АНАЛИЗ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

В.И. Петров<sup>1</sup>, Д.А. Молчанов<sup>2</sup>, Е.А. Кучерявый<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-Бруевича Санкт-Петербург, Российская Федерация; <sup>2</sup> Российский университет дружбы народов Москва, Российская Федерация; <sup>3</sup> Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики" Москва, Российская Федерация

Проведен анализ интерференции в беспроводных сетях, работающих в терагерцовом диапазоне частот. Получены выражения для среднего значения интерференции на приемнике с учетом специфических особенностей распространения электромагнитных волн терагерцового диапазона частот, таких как использование направленных антенн, ослабление сигнала вследствие молекулярной абсорбции, а также блокировка сигнала телом человека. Построены зависимости среднего значения интерференции от коэффициента абсорбции, плотности интерферирующих узлов и других параметров. Проведено сравнение результатов, полученных для двух упрощенных диаграмм направленности. Результаты могут в дальнейшем использоваться для получения оценок среднего значения сигнал-интерференция в беспроводных сетях терагерцового диапазона частот, а также для анализа емкости таких сетей.

**Ключевые слова:** терагерцовый диапазон частот; беспроводные сети; анализ интерференции.

# **INTERFERENCE ANALYSIS IN TERAHERTZ BAND WIRELESS NETWORKS**

V.I. Petrov<sup>1</sup>, D.A. Moltchanov<sup>2</sup>, Ye.A. Koucheryavy<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications St. Petersburg, Russian Federation; <sup>2</sup> Peoples' Friendship University of Russia Moscow, Russian Federation; <sup>3</sup> National Research University "Higher School of Economics" Moscow, Russian Federation

In this paper, the analysis of interference in wireless terahertz band networks is presented. The estimation of the mean level of interference at the target receiver is performed, taking into account such inherent properties of the terahertz band systems as the use of highly-directional antennas, signal attenuation caused by molecular absorption, as well as signal blockage by the human body. Additionally, the comparison of the results for two simplified antenna radiation patterns is performed. The obtained results can be used as a building block for further performance evaluation of terahertz band wireless networks, including the estimation of signal-to-interference ratio and network capacity.

Keywords: terahertz band; wireless networks; interference analysis.

Беспроводные сети передачи данных, работающие в терагерцовом диапазоне частот (0,3–3 ТГц), являются перспективным решением для замены текущих беспроводных локальный сетей, работающих в дециметровом (0,3–3 ГГц) и сантиметровом (3–30 ГГц) диапазонах частот, на дальностях до нескольких десятков метров [1].

По сравнению с текущими беспроводными сетями, использование терагерцового диапазона частот позволит существенно увеличить пропускную способность сети, а также уменьшить размеры приемопередающих устройств. В то же время, терагерцовый канал связи обладает специфическими особенностями, такими как высокий уровень молекулярной абсорбции (поглощения электромагнитного излучения в атмосфере) и существенным ослаблением сигнала при прохождении через препятствия (включая тело человека).

Меньший размер антенных элементов в свою очередь ведет к снижению эффективной апертуры антенны, что негативно сказывается на дальности связи. Для борьбы с данным эффектом предполагается использование антенных систем, состоящих из множества элементов [2]. Коррелированный выбор фаз для каждого отдельного антенного элемента позволяет образовать результирующую диаграмму направленности с узким лучом из множества отдельных диаграмм направленности с относительно широким лучом (см. рис. 1 для случая антенной системы с  $8 \times 8 = 64$  элементами).

Так как отмеченные выше особенности могут оказывать существенное влияние на работу беспроводных сетей терагерцового диапазона частот, они должны быть учтены при оценке характеристик сети.

Одной из важных задач в оценке характеристик беспроводных сетей связи является анализ интерференции, который позволяет оценить теоретически достижимую скорость передачи, а также влияет на выбор протоколов множественного доступа к среде. Цель статьи – анализ интерференции в беспроводных сетях терагерцового диапазона частот с учетом направленности антенн, молекулярной абсорбции, а также блокировки терагерцового излучения телом человека. Для анализа используются методы стохастической геометрии, с помощью которых получены выражения для средней интерференции в беспроводных сетях терагерцового диапазона частот для двух диаграмм направленности передающих и приемных антенн.

#### Модель системы

Расположение узлов. Модель системы включает приемник, расположенный в начале координат, а также случайное поле интерферирующих узлов. Для расположения интерферирующих узлов используется пуассоновский точечный процесс с



Рис. 1. Упрощенная диаграмма направленности «Тип 1»

Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

интенсивностью  $\lambda$ . Направления основных лепестков как приемника, так и интерферирующих узлов распределены равномерно на полуинтервале [0;2 $\pi$ ). Каждый из интерферирующих узлов окружен окружностью радиуса  $r_B$ , моделирующей проекцию тела человека (например, пользователя сети с носимым устройством). Область интерференции вокруг приемника радиуса R рассчитана таким образом, что интерференция от узлов вне этого радиуса меньше порога теплового шума.

Диаграммы направленности. В работе рассмотрены два возможных типа диаграмм направленности (рис. 2 и 3). Диаграмма направленности «Тип 1» моделируется единственным главным лепестком, коэффициент усиления внутри которого одинаков и равен G. Диаграмма направленности «Тип 2» моделируется главным лепестком, коэффициент усиления внутри которого одинаков и равен  $G_1$ , а также множеством боковых лепестков, коэффициент усиления внутри которых одинаков и равен  $G_2$ .

Для работы с используемыми диаграммами направленности необходимо определить коэффициенты усиления *G*, *G*, и *G*,



Рис. 3. Упрощенная диаграмма направленности «Тип 2»

как функции от угла диаграммы направленности α. Для диаграммы направленности «Тип 1» характерна концентрация всей излучаемой энергии в единственном конусообразном лепестке. Следовательно, коэффициент усиления G должен увеличиваться обратно пропорционально площади образуемого сегмента сферы S, вычисляемого по формуле  $S = 2\pi r^2 [1 - \cos(\alpha / 2)].$ 

Таким образом, с учетом ослабления сигнала при распространении в среде, коэффициент усиления G может быть вычислен как

$$G = \frac{2}{1 - \cos(\alpha / 2)}.$$

Аналогичным образом могут быть получены и коэффициенты усиления для диаграммы направленности «Тип 2»:

$$\begin{cases} G_1 = 2[(1 - \cos(\alpha / 2)) + k(1 + \cos(\alpha / 2))]^{-1} \\ G_2 = kG_1 \end{cases},$$

где k – коэффициент, связывающий G<sub>1</sub> и *G*<sub>2</sub>.

Модель распространения. В связи с существенным уровнем молекулярной абсорбции модель распространения сигнала в терагерцовом диапазоне частот отличается от моделей, используемых для дециметрового и сантиметрового диапазонов частот (например, используемых при анализе технологий Wi-Fi, LTE и других технологий, работающих в диапазоне 2-6 ГГц). Следуя результатам, полученным в [3, 4], величина интерференции на приемнике I может определяться как

$$I = A \sum_{i=1}^{N} r_i^{-2} e^{-Kr_i},$$

где N – число интерферирующих узлов, оказывающих влияние на приемник; r, расстояние от интерферирующего узла до приемника; К – коэффициент абсорбции; А - коэффициент, определяемый выражением  $A = P_{Tx}G_{Tx}G_{Rx} \frac{c^2}{16\pi^2 f^2} = HG_{Tx}G_{Rx}$ , где  $P_{_{Tx}}$  — мощность интерферирующего узла,  $G_{_{Tx}}$  — коэффициент усиления антенны на

интерферирующем узле,  $G_{Rx}$  – коэффициент усиления антенны на приемнике,

c – скорость света, f – частота передаваемого сигнала, Н - коэффициент, используемый для упрощения последующих вычислений, равный  $H = P_{Tx} \frac{c^2}{16\pi^2 f^2}.$ 

Коэффициенты  $G_{Tx}$  и  $G_{Rx}$  могут быть получены как функции от угла диаграммы направленности с использованием формул для  $G, G_1$  и  $G_2$ , приведенных выше.

Следуя [5], предполагается, что человеческое тело полностью блокирует прохождение терагерцового сигнала. Иными словами, ослабление сигнала при прохождении через тело настолько велико, что вклад данной компоненты в интерференцию на приемнике несущественен.

## Анализ интерференции

Анализ блокировки. В пуассоновском поле интерферирующих узлов абоненты могут являться причиной блокировки. Следуя результатам из [6], получим вероятность блокировки сигнала от интерферирующего узла  $p_{p}$ , как функцию от удаления от данного узла х, следующим образом:

$$p_B(x) = 1 - e^{-\lambda_I (x-r_B)r_B},$$

где  $r_{B}$  — радиус интерферирующего узла.

Посторонние люди в зоне действия приемника также могут блокировать распространение интерференции. При моделировании расположения посторонних людей с помощью пуассоновского процесса с интенсивностью λ<sub>в</sub> предыдущая формула остается применимой, если заменить λ, на  $(\lambda_I + \lambda_B)$ , где  $\lambda_B -$  интенсивность посторонних людей.

Анализ интерференции для диаграммы направленности «Тип 1». Рассмотрим случай, когда направленные антенны используются только на передающей или только на приемной стороне. Интерферирующий узел в радиусе R от приемника не будет создавать интерференцию всего в двух случаях: если зона покрытия передатчика не включает приемник / зона покрытия приемника не включает передатчик (для упрощения дальнейшего изложения предположим первый вариант), и если распространение интерференции заблокировано другим интерферирующим узлом.

Вероятность второго события определяется величиной  $p_B$ , полученной в предыдущем разделе. Что касается первого события, то вероятность того, что зона покрытия передатчика включает приемник  $p_C$ , для диаграммы направленности «Тип 1» может быть получена как

$$p_C = \frac{\alpha x}{2\pi x} = \frac{\alpha}{2\pi}$$

Рассмотрим бесконечно малое приращение dr. Поскольку процесс расположения интерферирующих узлов является пуассоновским [5], множественные события в пределах dr невозможны. Следовательно, вероятность того, что интерферирующий узел находится на расстоянии r от приемника, пропорциональна значению dr. Таким образом, элементарное приращение кольца может быть вычислено по формуле:

$$\pi (r+dr)^2 - \pi r^2 = 2\pi r dr + O, \qquad (1)$$

из которой следует, что вероятность нахождения интерферирующего узла в интервале (r, r + dr) может быть вычислена как  $2\pi\lambda_r dr$ .

Когда интерферирующий узел на расстоянии r от приемника не заблокирован, и приемник находится в зоне покрытия интерферирующего узла, вклад указанного узла в интерференцию на приемнике равен  $Ar^{-2}e^{-Kr}$ . С учетом данного факта среднее значение интерференции на приемнике E[I] может быть вычислено по следующей формуле [4]:

$$E[I] = \int_{r_B}^{R} Ar^{-2} e^{-\kappa r} p_C[1 - p_B(r)] 2\lambda_I \pi r dr.$$

При подстановке значений вероятностей  $p_B$  и  $p_C$  среднее значение интерференции на приемнике может быть записано как

$$E[I] = \int_{r_B}^{R} Ar^{-2} e^{-Kr} e^{-\lambda_I (x-r_B)r_B} \frac{\alpha}{2\pi} 2\lambda_I \pi r dr =$$
  
=  $A \alpha \lambda_I \Theta(R, r_B, \lambda_I, K),$ 

где  $\theta(R, r_B, \lambda_I, K)$  может быть вычислено как

$$\Theta = e^{-\lambda_I r_B^2} Ei(-R[K + \lambda_I r_B]) - Ei(-r_B^2[K + r_B \lambda_I]),$$

где *Ei*(*x*) — интегральная показательная функция.

Когда блокировка не учитывается, среднее значение интерференции на приемнике может быть получено чуть проще:

$$E[I] = A\alpha\lambda_I \int_{r_B}^{R} \frac{1}{r} e^{-\kappa r} dr = A\alpha\lambda_I \Theta_1(R, r_B, K),$$

где  $\theta_1(R, r_B, K) = Ei(-KR) - Ei(-Kr_B).$ 

В случае использования всенаправленной антенны то же самое выражение может быть приведено к следующему виду:

$$E[I] = 2\pi\lambda_I A\Theta(R, r_B, \lambda_I, K).$$

При объединении допущений о всенаправленных антеннах и отсутствии блокировки среднее значение интерференции на приемнике может быть вычислено как

$$E[I] = 2\pi\lambda_I A\Theta_1(R, r_B, K).$$

Наконец, если направленные антенны предполагаются как на приемной, так и на передающей стороне, среднее значение интерференции может быть получено домножением приведенных выше результатов на  $\alpha/2\pi$  с учетом блокировки:

$$E[I] = \frac{A\alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Theta(R, r_B, \lambda_I, K)$$

и без учета блокировки:

$$E[I] = \frac{A\alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Theta_1(R, r_B, \lambda_I, K).$$

Анализ интерференции для диаграммы направленности «Тип 2». При использовании диаграммы направленности «Тип 2» требуется различать три случая для выбранного интерферирующего узла:

1) сигнал от интерферирующего узла заблокирован;

2) сигнал от интерферирующего узла не заблокирован, и приемник находится в зоне покрытия основного лепестка диаграммы направленности интерферирующего узла;

3) сигнал от интерферирующего узла не заблокирован, и приемник находится в зоне покрытия боковых лепестков диаграммы направленности интерферирующего узла.

Вероятность первого события равна  $p_{B}$ , а вклад выбранного интерферирующего узла в интерференцию на приемнике равен нулю. Вероятность второго события равна  $p_{C}(1 - p_{B})$ , а вклад выбранного интерферирующего узла в интерференцию на приемнике равен  $A_1 r^{-2} e^{-\kappa r}$ , где  $A_1$  — коэффициент, вычисляемый аналогично коэффициенту A, только для основного лепестка диаграммы направленности «Тип 2». Вероятность третьего события, в свою очередь, равна  $(1 - p_c)(1 - p_B)$ , а вклад интерферирующего узла в интерференцию на приемнике равен  $A_2 r^{-2} e^{-\kappa r}$ , где  $A_2$  вычисляется аналогично  $A_1$ только для боковых лепестков диаграммы направленности «Тип 2».

Таким образом, среднее значение интерференции на приемнике при использовании диаграммы направленности «Тип 2» описывается формулой

$$E[I] = \int_{r_B}^{R} A_1 r^{-2} e^{-Kr} p_C p_A 2\lambda_I \pi r dr + \int_{r_B}^{R} A_2 r^{-2} e^{-Kr} (1 - p_C) p_A 2\lambda_I \pi r dr,$$

которая после взятия интеграла и упрощения приводится к следующему виду:

$$\begin{split} E[I] &= A_1 \alpha \lambda_I \Theta(R, r_B, \lambda_I, K) + \\ &+ A_2 [2\pi - \alpha] \lambda_I \Theta(R, r_B, \lambda_I, K). \end{split}$$

По аналогии с анализом интерференции для диаграммы направленности «Тип 1» рассмотрим несколько специальных случаев.

Во-первых, при игнорировании эффекта блокировки среднее значение интерференции на приемнике вычисляется с помощью следующей формулы:

$$\begin{split} E[I] &= A_1 \alpha \lambda_I \Theta_1(R, r_B, K) + \\ &+ A_2 [2\pi - \alpha] \lambda_I \Theta_1(R, r_B, K). \end{split}$$

Во-вторых, при использовании направленных антенн как на передающей, так и на приемной стороне, среднее значение интерференции описывается с учетом блокировки как

$$E[I] = \frac{A_1 \alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Theta(R, r_B, \lambda_I, K) + \frac{A_2 [2\pi - \alpha^2] \lambda_I}{2\pi} \Theta(R, r_B, \lambda_I, K);$$

без учета блокировки как

$$\begin{split} E[I] &= \frac{A_1 \alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Theta_1(R, r_B, K) + \\ &+ \frac{A_2 [2\pi - \alpha^2] \lambda_I}{2\pi} \Theta_1(R, r_B, K). \end{split}$$

Стоит также отметить, что предложенный подход позволяет моделировать различные углы диаграммы направленности на интерферирующих узлах и на приемнике.

Анализ интерференции с учетом молекулярного шума. Молекулярный шум — одно из явлений, характерных для терагерцового диапазона частот, чья природа была теоретически предсказана в [7], но пока не была подтверждена экспериментально [8].

Предложенный подход может быть модифицирован для того, чтобы учесть влияние молекулярного шума. Так как молекулярный шум, вызванный излучением от интерферирующих узлов, также оказывает негативное влияние на приемник [9], он может быть учтен при оценке среднего значения интерференции на приемнике посредством замены  $Ar^{-2}e^{-Kr}$  на  $Ar^{2}$  [7]. В этом случае среднее значение интерференции на приемнике для диаграммы направленности «Тип 1» будет описываться следующим выражением:

$$E[I] = \int_{r_B}^{R} Ar^{-2} e^{-\lambda_I (x-r_B)r_B} \frac{\alpha}{2\pi} 2\lambda_I \pi r dr =$$
  
=  $A \alpha \lambda_I \Theta_1^* (R, r_B, \lambda_I),$ 

где  $\theta_1^*(R, r_R, \lambda_I)$  может быть вычислена как

$$\Theta_1^*(R,r_B,\lambda_I)=e^{-\lambda_I r_B}E(-\lambda_I r_B R)-E(-\lambda_I r_B^2).$$

Аналогично, для диаграммы направленности «Тип 2» среднее значение интерференции на приемнике с учетом молекулярного шума равно

$$E[I] = A_1 \alpha \lambda_I \Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I) + A_2[2\pi - \alpha] \lambda_I \Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I).$$

При использовании направленных антенн как на передающей, так и на приемной стороне среднее значение интерференции с учетом молекулярного шума равно для диаграммы «Тип 1»:

$$E[I] = \frac{A\alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I)$$

для диаграммы «Тип 2»:

$$E[I] = \frac{A_1 \alpha^2 \lambda_I}{2\pi} \Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I, K) + \frac{A_2[2\pi - \alpha^2]\lambda_I}{2\pi} \Theta_1^*(R, r_B, \lambda_I, K).$$

Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

Приведенные выше формулы будут использованы в следующем разделе при построении численных оценок интерференции на приемнике.

### Численные результаты и их интерпретация

В данном разделе приведены примеры численных результатов, иллюстрирующих поведение среднего значения интерференции на приемнике в различных условиях. Результаты получены с использованием формул, выведенных в предыдущем разделе.

На рис. 4 приведено среднее значение интерференции как функции коэффициента абсорбции для разных углов направленности для диаграммы направленности «Тип 1». Рисунок демонстрирует сильную зависимость между коэффициентом абсорбции *K* и средним значением интер-



Рис. 4. Среднее значение интерференции как функции коэффициента абсорбции для разных углов направленности (----) α = π/2; (- --) α = π/3; (- --) α = π/6; (----) α = π/12



Рис. 5. Среднее значение интерференции как функции от угла направленности для разных типов диаграммы направленности (----) «Тип 1»; (---) «Тип 2», k = 0,01; (---) «Тип 2», k = 0,05; (---) «Тип 2», k = 0,10

ференции на приемнике, тем самым обосновывая необходимость учета эффекта молекулярной абсорбции в построении моделей связи для сетей терагерцового диапазона частот. Зафиксировав угол диаграммы направленности, мы также можем отметить, что среднее значение интерференции ожидаемо уменьшается с увеличением коэффициента абсорбции. Аналогичным образом, зафиксировав значение коэффициента абсорбции, мы наблюдаем рост среднего значения интерференции на приемнике с увеличением направленности антенны (уменьшением угла диаграммы направленности).

На рис. 5 приведена зависимость среднего значения интерференции от угла направленности и выбранного типа диаграммы направленности («Тип 1» или «Тип 2»). Поскольку диаграмма направленности «Тип 1» концентрирует всю излучаемую мощность в основном лепестке, среднее значение интерференции на приемнике для диаграммы направленности «Тип 1» выше. В то же время диаграмма направленности «Тип 2» обладает большей гибкостью, т. к. позволяет варьировать долю энергии, излучаемой в направлении боковых лепестков, с помощью коэффициента k. Зависимость среднего значения интерференции на приемнике от угла диаграммы направленности а для диаграммы направленности «Тип 2» имеет принципиально другой вид, чем для диаграммы направленности «Тип 1». В то же время, при уменьшении коэффициента *k* значение функции для диаграммы направленности «Тип 2» ожидаемо приближается к таковому для диаграммы направленности «Тип 1».

Значение коэффициента *k* может значительно меняться в зависимости от конкретной антенны (во множестве исследований коэффициент *k* принимают равным значению из отрезка [0,1-0,2] [10]). С учетом данного факта использование диаграммы направленности «Тип 2» является предпочтительным для анализа интерференции в беспроводных сетях терагерцового диапазона частот. В то же время использование диаграммы направленности «Тип 1» существенно упрощает анализ и финальные выражения, поэтому предпочтительно для построения «грубых» оценок среднего значения интерференции.

В статье рассмотрена задача построения аналитической модели для оценки интерференции в беспроводных сетях, работающих в терагерцовом диапазоне частот, со случайным расположением интерферирующих узлов. Изучены две упрощенные диаграммы направленности, для каждой из которых получены итоговые выражения для оценки среднего значения интерференции как функции от угла направленности диаграммы, коэффициента абсорбции, плотности интерферирующих узлов и других параметров сети.

На основе анализа полученных выражений можно сделать следующие выводы. Вопервых, среднее значение интерференции для диаграммы направленности «Тип 1» увеличивается с уменьшением угла направленности. Во-вторых, среднее значение интерференции для диаграммы направленности «Тип 1» уменьшается с увеличением коэффициента абсорбции. В-третьих, вид функции средней интерференции от угла диаграммы направленности для диаграммы направленности «Тип 2» принципиально отличается от вида функции для диаграммы направленности «Тип 1». В то же время при стремлении параметра k к нулю разница между результатами для диаграммы направленности «Тип 1» и «Тип 2» также стремится к нулю.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kurner T., Priebe S.** Towards THz Communications – Status in Research, Standardization and Regulation // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2014. Vol. 35. No. 1. Pp 53–62.

2. Akyildiz I.F., Jornet J.M. Realizing Ultra-

Massive MIMO (1024×1024) Communication in the (0.06–10) Terahertz Band, Elsevier // Nano Communication Networks. 2016. Vol. 8. Pp. 46–54.

3. **Jornet J.M., Akyildiz I.F.** Femtosecond-Long Pulse-Based Modulation for Terahertz Band Communication in Nanonetworks // IEEE Transactions on Communications. 2014. Vol. 62. No. 5. Pp. 1742–1754.

4. Petrov V., Komarov M., Moltchanov D., Jornet J.M., Koucheryavy Y. Interference and SINR in Millimeter Wave and Terahertz Communication Systems with Blocking and Directional Antennas // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2017. Vol. 16. No. 3. Pp. 1791–1808.

5. Akdeniz M.R., Liu Y., Samimi M.K., Sun S., Rangan S., Rappaport T.S., Erkip E. Millimeter Wave Channel Modeling and Cellular Capacity Evaluation // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2014. Vol. 32. No. 6. Pp. 1164–1179.

6. Petrov V., Komarov M., Moltchanov D., Jornet J.M., Koucheryavy Y. Interference Analysis of EHF/THF Communications Systems with Blocking and Directional Antennas // Proc. of the

1. **Kurner T., Priebe S.** Towards THz Communications – Status in Research, Standardization and Regulation. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2014, Vol. 35, No. 1, Pp 53–62.

2. Akyildiz I.F., Jornet J.M. Realizing Ultra-Massive MIMO (1024×1024) Communication in the (0.06-10) Terahertz Band, Elsevier, *Nano Communication Networks*, 2016, Vol. 8, Pp. 46–54.

3. Jornet J.M., Akyildiz I.F. Femtosecond-Long Pulse-Based Modulation for Terahertz Band Communication in Nanonetworks. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, Vol. 62, No. 5, Pp. 1742–1754.

4. Petrov V., Komarov M., Moltchanov D., Jornet J.M., Koucheryavy Y. Interference and SINR in Millimeter Wave and Terahertz Communication Systems with Blocking and Directional Antennas, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, Vol. 16, No. 3, Pp. 1791–1808.

5. Akdeniz M.R., Liu Y., Samimi M.K., Sun S., Rangan S., Rappaport T.S., Erkip E. Millimeter Wave Channel Modeling and Cellular Capacity Evaluation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, IEEE Global Communications Conf. Washington, DC USA, 2016.

7. Jornet J.M., Akyildiz I.F. Channel Modeling and Capacity Analysis for Electromagnetic Wireless Nanonetworks in the Terahertz Band // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2011. Vol. 10. No. 10. Pp. 3211–3221.

8. Kokkoniemi J., Lehtomaki J., Juntti M. A Discussion on Molecular Absorption Noise in the Terahertz Band, Elsevier // Nano Communication Networks. 2016. Vol. 8. Pp. 35–45.

9. **Petrov V., Moltchanov D., Koucheryavy Y.** Interference and SINR in Dense Terahertz Networks // Proc. of the IEEE 82nd Vehicular Technology Conf. Boston, MA, USA, 2015.

10. **Rappaport T.S.** Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd Ed. Prentice Hall, 2002. 736 p.

#### REFERENCES

2014, Vol. 32, No. 6, Pp. 1164-1179.

6. Petrov V., Komarov M., Moltchanov D., Jornet J.M., Koucheryavy Y. Interference Analysis of EHF/THF Communications Systems with Blocking and Directional Antennas. *In the Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM)*, Washington, DC USA, 2016

7. Jornet J.M., Akyildiz I.F. Channel Modeling and Capacity Analysis for Electromagnetic Wireless Nanonetworks in the Terahertz Band. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, Vol. 10, No. 10, Pp. 3211–3221.

8. Kokkoniemi J., Lehtomaki J., Juntti M. A Discussion on Molecular Absorption Noise in the Terahertz Band, Elsevier. *Nano Communication Networks*, 2016, Vol. 8, Pp. 35–45.

9. Petrov V., Moltchanov D., Koucheryavy Y. Interference and SINR in Dense Terahertz Networks. In the Proceedings of the IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (IEEE VTC2015-Fall), Boston, MA, USA, 2015.

10. **Rappaport T.S.** *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd Ed., Prentice Hall, 2002, 736 p.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

**ПЕТРОВ Виталий Игоревич PETROV Vitaly I.** E-mail: vit.petrov@gmail.com

**МОЛЧАНОВ** Дмитрий Александрович **MOLTCHANOV Dmitry A.** E-mail: moltchanov.dmitri@gmail.com **КУЧЕРЯВЫЙ Евгений Андреевич КОUCHERYAVY Yevgeni A.** E-mail: yevgeni.koucheryavy@gmail.com

Статья поступила в редакцию 10.02.2017

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017