

## АНАЛИЗ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ И ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА В СЕТЯХ СВЯЗИ СВЕРХМАЛОГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

**П. Н. Боронин**, аспирант СПбГУТ им. М. А. Бонч-Бруевича; p3v3r0@gmail.com

**Е. А. Кучерявый**, профессор Технологического университета г. Тампере (Финляндия)

**Д. А. Молчанов**, доцент Технологического университета г. Тампере (Финляндия)

Ограниченная дальность связи телекоммуникационных устройств наномасштаба в терагерцовом диапазоне частот (0,1–10 ТГц) является одним из главных факторов, сокращающих количество наносетевых приложений. В статье предлагается использование в терагерцовом диапазоне окон прозрачности, обеспечивающих распространение электромагнитного излучения без молекулярной абсорбции и расширяющих дальность связи наномашин. Найден компромисс между отношением сигнал/шум, пропускной способностью канала, полосой пропускания и дальностью связи для этих окон.

**Ключевые слова:** терагерцовый диапазон, сверхширокополосная связь, окна прозрачности, терабит в секунду, графен.

**Введение.** Нанотехнологии — это быстро развивающаяся научная область, нацеленная на разработку чрезвычайно малых устройств, способных производить несложные действия. На данный момент нанотехнологии находят применение в биомедицине, экологии и военных областях [1]. Наномашин, производя только примитивные операции, по отдельности не способны решать сложные задачи. Для того чтобы сделать возможной работу с такими более сложными приложениями, как доставка лекарственных препаратов в теле человека или совместный мониторинг окружающей среды, требуется обеспечить обмен информацией и командами между сетевыми объектами и контроллером. Необходимость согласования устройств и информационного обмена, естественно, приводит к концепции наносетей.

Одним из перспективных способов использования сетевых возможностей является применение беспроводной связи между наномашинами [2], т.е. довольно молодая концепция Интернета Вещей [3] находит применение и в наномире, из чего следует появление новой концепции Интернета Нановещей [4].

Существуют несколько методов, предложенных для взаимодействия между наномашинами, которые включают применение подходов из биологии (молекулярное, бактериальное, нейронное взаимодействия) [4] и использование сверхвысококачественной электромагнитной связи. Последнее является наиболее перспективным методом. Работы по электромагнитным наносетям связи начались несколько лет назад в контексте наносенсорных сетей [2]. Ранние исследования были сконцентрированы на изучении теоретической базы по телекоммуникациям, использующим миниатюрные приемопередатчики и антенны, рассмотрении набора частот, которые могут использовать наномашин для взаимодействия и анализа характеристик канала. Приведем некоторые из них.

● Графен может быть применен для разработки новых нано-приемопередатчиков [5, 6] и нано-антенн [7, 8], которые могут эффективно работать в диапазоне частот тера-

герцового электромагнитного излучения (0,1–10 ТГц), что удовлетворяет ограничениям на размеры наномашин.

● Терагерцовый канал является «сильно» частотно-селективным и демонстрирует уникальное зависимое от дистанции поведение из-за абсорбции, в основном молекулами водяного пара [9].

● Схемы сверхширокополосной связи, основанные на передаче ультракоротких импульсов, эффективны для очень больших полос пропускания в каналах терагерцового диапазона на дистанциях меньше 1 м [10]. Прием таких импульсов достигается с помощью простого детектора по уровню энергии [11].

● Наномашин требуют разработки новых энергосистем для преодоления ограничения нанобатарей [12, 13], что приводит к разработке нового стека сетевых протоколов [14, 15].

Сегодня исследования в нанотелекоммуникациях сфокусированы на увеличении пропускной способности канала связи при использовании сверхширокополосных сигналов, занимающих весь терагерцовый диапазон частот. Например, в [9] показано, что соединения между наномашинами со скоростями в несколько терабит в секунду (Тбит/с) возможны, но только на расстояния намного меньше 1 м. Однако стоит отметить, что во многих перспективных приложениях наносетей дальность связи играет более значимую роль, чем скорость передачи данных. Таким образом, важно найти способ увеличить радиус действия отдельного узла связи.

В статье сначала будет предложен способ избавления от молекулярной абсорбции путем правильного выбора частотных диапазонов, известных как окна прозрачности. Затем будут доказаны зависимости между выбором окна, его полосой пропускания, пропускной способностью и дальностью связи отдельного узла. Также будет показано, что правильный выбор диапазона частот ведет к лучшей производительности системы с точки зрения дальности связи и пропускной способности канала. С движением вверх по диапазону частот к другим окнам прозрачности потери в свободном пространстве оказывают все большее влияние, снижая дальность распространения сигнала.

Эти результаты расширяют область приложений для наносетей связи и показывают, что они не ограничены до малых зон покрытия, а могут использоваться даже для транспортировки трафика, генерируемого как приложениями с низкими требованиями к пропускной способности, так и «жадными» приложениями на малые и средние дистанции. Подобные результаты для макромасштабных терагерцовых сетей связи были получены в [16].

**Характеристики терагерцового канала.** Формулу передачи в терагерцовом диапазоне можно записать следующим образом:

$$P_{Rx}(f, d) = P_{Tx}(f) - L_P(f, d) - L_A(f, d),$$

где  $P_{Tx}$  — спектральная плотность мощности переданного сигнала (СПМ);  $P_{Rx}$  — СПМ принятого сигнала;  $L_P$  — потери сигнала в пространстве;  $L_A$  — потери из-за молекулярной абсорбции. На сигнал также влияет шум молекулярной абсорбции. Важно отметить, что в антеннах на основе графена тепловой шум на данный момент до конца не изучен, но предполагается, что он пренебрежительно мал благодаря замечательным свойствам этого материала [17, 18].

#### Потери сигнала в связи с молекулярной абсорбцией.

Присутствие молекулярной абсорбции из-за вибраций и вращений молекул — уникальная особенность терагерцового диапазона частот. Молекулярная абсорбция электромагнитного излучения — это эффект, возникающий при передаче сигнала на частотах близких и равных резонансным частотам молекул. Они поглощают часть энергии сигнала и создают шум на этих же частотах за счет внутренней кинетической энергии молекул. Способность поглощать молекулой энергию определяется физическими свойствами (молекулярные связи, пространственная ориентация и т.п.) и измеряется как коэффициент абсорбции. Среди всех составляющих атмосферы Земли наибольший вклад вносит абсорбция молекулами водяного пара.

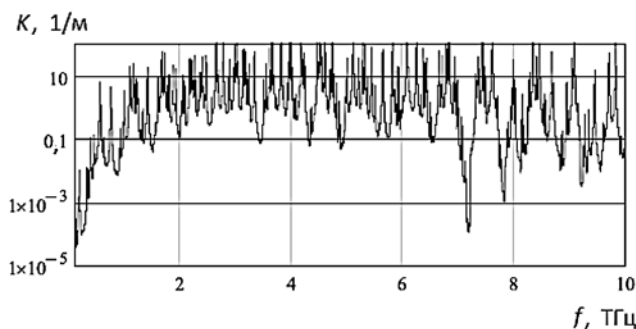


Рис. 1. Коэффициент абсорбции

Коэффициент абсорбции  $K$  представлен на рис. 1 при температуре 296 К, абсолютной влажности 1,8% в диапазоне частот 0,1–10 ТГц. График был получен с применением процедур, описанных в [9], и с использованием информации из базы данных по молекулам HITRAN [19]. Как видно из рисунка, на некоторых частотах абсорбция очень большая и может стать причиной крайне малой возможной дальности связи. Однако можно заметить так называемые окна прозрачности, где абсорбция значительно меньше, чем в других частях спектра. Отметим, что  $K$  не зависит от дистанции передачи, а только от свойств среды.

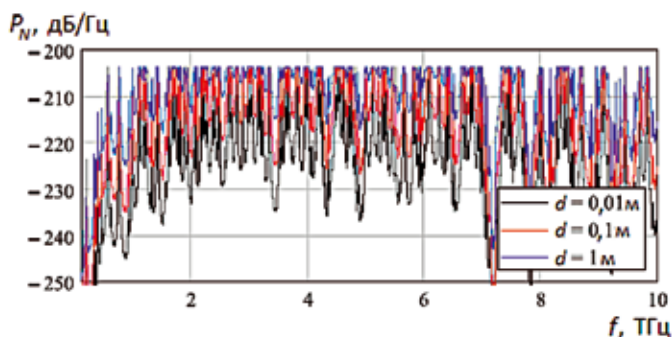


Рис. 2. СПМ шума молекулярной абсорбции

**Шум молекулярной абсорбции.** На рис. 2 изображена СПМ шума молекулярной абсорбции для трех дистанций. Как видно из рисунка, графики шума и коэффициента абсорбции внешне очень похожи. Разница состоит в том, что при коэффициенте пропускания среды ниже 94,5% (эквивалентно коэффициенту поглощаемости среды выше 5,5%), шум молекулярной абсорбции становится равным максимальному значению в  $-203,89$  дБ/Гц ( $\sim 10^{-20}$  Вт/Гц), что соответствует уровню теплового шума Джонсона-Найквиста. Стоит отметить, что шум увеличивается пропорционально ширине полосы частот передаваемого сигнала.

**Потери в свободном пространстве.** Другим параметром, влияющим на передаваемый сигнал, является затухание сигнала при его распространении во все стороны. Как будет показано ниже, для некоторых наборов частот в терагерцовом диапазоне потери в связи с молекулярной абсорбцией будут влиять даже сильнее, чем потери в свободном пространстве.

Затухание сигнала в свободном пространстве описывается формулой:

$$L_P(f, d) = \left( \frac{4\pi f d}{c_0} \right)^2,$$

где  $c_0$  — скорость света в среде;  $d$  — расстояние между передатчиком и приемником радиосвязи;  $f$  — интересующая частота. Из формулы видно, что затухание прямо пропорционально квадрату расстояния. При рассмотрении окон прозрачности затухание сигнала в пространстве становится наиболее существенным фактором, ограничивающим дальность распространения электромагнитного излучения.

На рис. 3 показаны графики общих потерь (молекулярной абсорбции и при распространении в пространстве) для различных расстояний. Можно видеть, что в большей части спектра частот преобладают потери за счет абсорбции, хотя в окнах прозрачности эти потери практически отсутствуют.

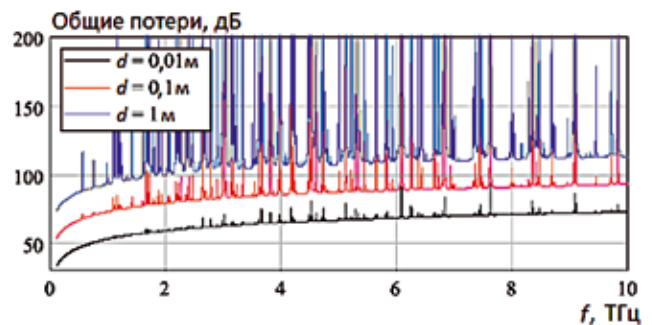


Рис. 3. Общие потери сигнала

**Характеристики связи в окнах прозрачности.** Несмотря на довольно сложные характеристики канала связи, существует способ избежать серьезных искажений сигнала с помощью окон прозрачности. В этих окнах коэффициент пропускания среды всегда выше 95,5% на малых и средних дистанциях. Это означает, что в окнах прозрачности как молекулярный шум, так и потери в связи с абсорбцией пренебрежительно малы.

**Канальные характеристики окон прозрачности.** Во всем спектре терагерцовых частот существует несколько окон прозрачности. Однако свойство накапливать абсорбционные потери и молекулярный шум с дистанцией не позволяют нам четко определить границы и положение окон прозрачности во всем терагерцовом спектре. В статье, как

**Характеристики окон прозрачности и сигналов**

№ окна	Дистанция, м	Частота, ТГц	Ширина полосы, ГГц	Длительность импульса, пс
1	0,01	0,10–0,56	457	1,36
	0,1	0,10–0,55	445	1,40
	1	0,10–0,54	440	1,48
2	0,01	0,56–0,75	192	3,23
	0,1	0,57–0,74	173	3,59
	1	0,63–0,72	95	6,53
3	0,01	0,75–0,99	237	2,62
	0,1	0,76–0,98	218	2,85
	1	0,76–0,98	126	4,92
4	0,01	7,00–7,33	330	1,88
	0,1	7,01–7,31	300	2,07
	1	7,07–7,23	160	2,59
5	0,01	7,64–7,98	340	1,83
	0,1	7,72–7,96	240	2,59
	1	7,75–7,88	130	3,88
6	0,01	8,01–8,28	270	2,30
	0,1	8,04–8,15	110	5,64
	1	8,04–8,15	80	7,76

было упомянуто выше, выбор окон производится на основе коэффициента пропускаемости среды.

В таблице приведены параметры окон прозрачности в диапазоне частот 0,1–10 ТГц. Количество окон уменьшается при увеличении дистанции передачи. Например, для 0,01 м существует до 15 окон, в то время как для 1 м — только шесть. В таблице также приведены возможные длительности для импульса Гаусса. Первые три окна больше подходят для работы на максимально возможных дистанциях, другие три находятся в диапазоне выше 7 ТГц, где потери сигнала в пространстве очень велики и дальность передачи будет возможна максимум до нескольких миллиметров. В зависимости от требуемого расстояния ширину полосы частот сигнала следует варьировать для достижения максимальной эффективности. При работе в первом окне такие действия не требуются.

Для наглядности на рис. 4 показан выигрыш при использовании первого окна прозрачности в окружающей среде с концентрацией водяного пара 1,8%, температурой

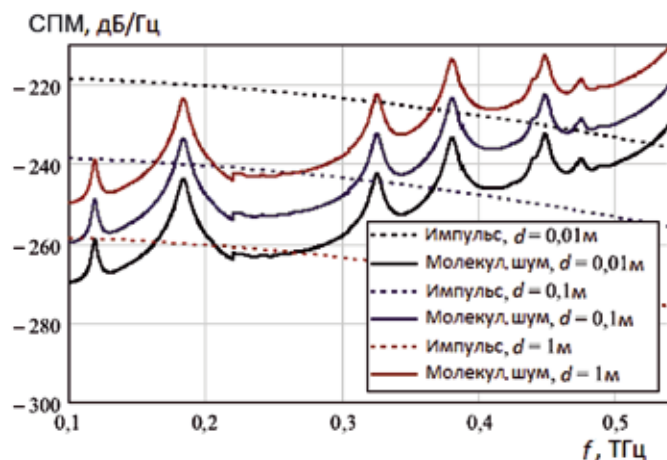


Рис. 4. СПМ сигнала и молекулярного шума при различной дистанции

296 К и нормальным атмосферным давлением. Как видно из рисунка, максимальная дальность распространения импульса составляет несколько десятков сантиметров. Рассмотрим эту возможность более детально.

**Отношение сигнал/шум в зависимости от расстояния.** Независимо от типа модуляции можно рассчитать один из важнейших параметров, влияющих на достижимую скорость передачи данных, а именно отношение сигнал/шум (ОСШ). На рис. 5 ОСШ показано как функция от дистанции для пяти каналов с различными полосами пропускания в первом окне прозрачности. Как видно из рисунка, дальность распространения импульса достигает нескольких сантиметров. При использовании полного окна прозрачности ОСШ падает до 10 дБ приблизительно на 0,02 м. Мы видим, что существует значительное различие между каналами в начале частотного диапазона первого окна прозрачности и в его конце.

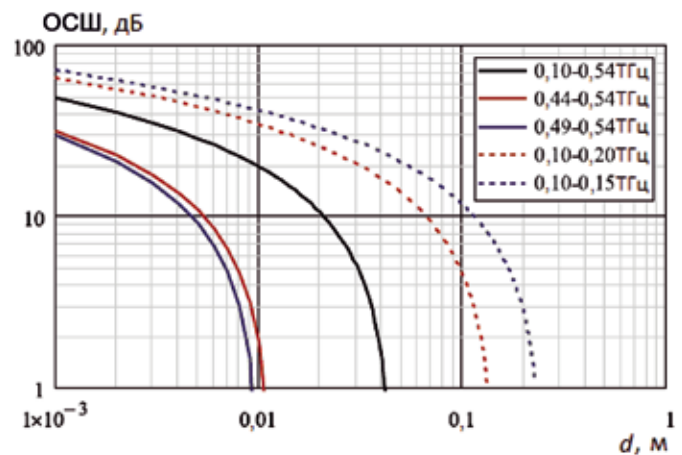


Рис. 5. ОСШ пяти каналов в первом окне

Причиной служит доминирующий эффект потерь в свободном пространстве. В частности, используя 50-ти гигагерцовый канал в начале окна прозрачности, можно достичь расстояния передачи до 0,1 м, сохраняя ОСШ на уровне в 10 дБ и используя сигнал с чрезвычайно малой мощностью в 26,5 нВт. Из полученных результатов можно сделать вывод, что взаимодействие между наномашинами возможно на значительных дистанциях и, следовательно, возможно их сопряжение с микро- и макроустройствами.

**Пропускная способность канала в зависимости от расстояния.** Учитывая общее предположение, что переданный сигнал и полный шум являются гауссовскими процессами, пропускная способность  $C$  канала связи в окне прозрачности рассчитывается с использованием теоремы Шеннона для канала с шумами:

$$C(d) = \int_{B(d)} \log_2 \left( 1 + \frac{P(f)}{L_p(f,d)L_A(f,d)N_M(f,d)} \right) df,$$

где  $B$  — полоса пропускания канала;  $P$  — СПМ сигнала;  $L_p$  — затухание сигнала в свободном пространстве;  $N_M$  — СПМ шума молекулярной абсорбции. Поскольку рассматриваем только окна прозрачности, эффект затухания сигнала в связи с молекулярной абсорбцией  $L_A$  не принимается в расчет. Эффект теплового шума также не учитывается. Во всех расчетах параметры среды являются нормальными (температура — 296 К, давление — 760 мм рт.ст., концен-

трация молекул водяного пара, т.е. средняя влажность — 1,8%).

На рис. 6 пропускная способность канала связи показана как функция от дистанции (в логарифмическом масштабе) для пяти каналов, также как в случае с ОСШ. Стоит отметить, что для варианта с полосой 440 ГГц наблюдается максимальная пропускная способность, поскольку данный канал самый широкий из всех. Несмотря на то, что теоретически можно достичь скоростей в несколько Тбит/с, уверенный прием сигнала будет осуществим только на расстоянии в несколько сантиметров (около 2 Тбит/с на 0,01 м).

Уменьшая полосу пропускания канала связи, можно добиться увеличения распространения сигнала вплоть до нескольких метров, однако придется пожертвовать пропускной способностью канала и, как следствие, эффективной скоростью передачи данных. Возвращаясь к рис. 5, заметим, что наиболее эффективные каналы находятся в начале окна прозрачности. На рис. 6 нетрудно увидеть ту же закономерность, причем достижимая дистанция уменьшается более чем в 10 раз при использовании каналов из хвоста окна. Этот эффект возникает из-за затухания сигнала в пространстве и частично из-за шума молекулярной абсорбции.

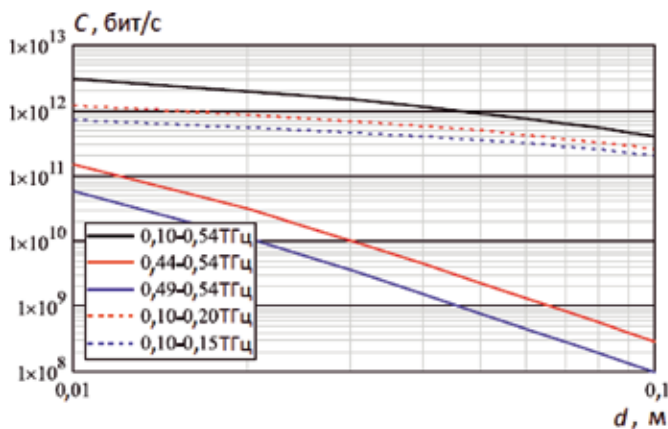


Рис. 6. Пропускная способность каждого из пяти каналов

Таким образом, все рассмотренные каналы удовлетворяют требованиям по пропускной способности приложений транзакционного типа. Целое окно прозрачности в 440 ГГц так же как и малые каналы по 50 и 100 ГГц в начале окна могут быть использованы для высокоскоростных приложений на дистанциях в пару сантиметров, например, для межъядерного взаимодействия в многоядерных процессорах или в других вычислительных компонентах.

**Заключение.** Использование окон прозрачности в терагерцовом диапазоне частот делает возможным взаимодействие между наномашинами. Дальность связи каждого нанозула значительно возрастает из-за практического отсутствия молекулярной абсорбции. Затухание сигнала в пространстве становится наиболее влияющим фактором на характеристики канала связи. Кроме того, хотя существует множество окон прозрачности в полосе 0,1–10 ТГц, первое окно прозрачности 0,1–0,54 ТГц позволяет достичь больших дистанций. Используя энергию импульса 0,1 Адж, можно достигать скоростей до нескольких Тбит/с и осуществлять уверенный прием сигнала на расстояниях до нескольких сантиметров. С возрастанием полосы пропускания канала связи в окне прозрачности покрытие уменьшается, а пропускная способность пропорционально увеличивается.

Таким образом, в зависимости от требований используемых приложений можно сделать рациональный выбор параметров, удовлетворяющих критериям пропускной способности и дальности связи этих приложений. Дальнейшая работа будет связана с рассмотрением всех возможных сценариев, их моделированием, исследованием работы всей системы на уровне доступа к среде и на сетевом уровне, а также построением стека протоколов для наносетей связи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кучерявый А. Е., Прокопьев А. В., Кучерявый Е. А. Самоорганизующиеся сети. — СПб.: Изд-во «Любавич», 2011.
2. Akyildiz I. F., Jornet J. M. Electromagnetic wireless nanosensor networks // Nano Commun. Netw. (Elsevier).— 2010.— J. 1 (1).— P. 2–19.
3. Кучерявый А. Е. Интернет Вещей // Электросвязь.— 2013.— № 1.
4. Кучерявый Е. А., Баласубраманиям С. Интернет нановещей и наносети // Электросвязь.—2014.— № 4.
5. Vicarelli L., Vitiello M. S., Coquillat D., et al. Graphene field-effect transistors as room-temperature terahertz detectors // Nature Mater.— 2012.— № 11.— P. 865–871.
6. Jornet J. M., Akyildiz I. F. Graphene-based plasmonic nanotransceiver for terahertz band communication / in Proc. of European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP.— 2014.
7. Tamagnone M., Gomez-Diaz J. S., Mosig J. R., Perruisseau-Carrier J. Reconfigurable terahertz plasmonic antenna concept using a graphene stack // Appl. Phys. Lett.— 2012.— 101 (21).
8. Jornet J. M., Akyildiz I. F. Graphene-based plasmonic nano-antenna for terahertz band communication in nanonetworks // IEEE J. Sel. Areas Commun. Special Issue on Emerging Technologies for Communications.— 2013.— № 12 — (12).— P. 685–694.
9. Jornet J. M., Akyildiz I. F. Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band // IEEE Trans. Wireless Commun.— 2011.— № 10 (10).— P. 3211–3221.
10. Jornet J. M., Akyildiz I. F. Femtosecond-long pulse-based modulation for terahertz band communication in nanonetworks // IEEE Trans. Comm.— 2014.— № 62 (5).— P. 1742–1754.
11. Cid-Fuentes R. G., Jornet J. M., Akyildiz I. F., Alarcon E. A receiver architecture for pulse-based electromagnetic nanonetworks in the terahertz band / in Proc. of IEEE International Conference on Communications, ICC.— June 2012.— P. 4937–4942.
12. Jornet J. M., Akyildiz I. F. Joint energy harvesting and communication analysis for perpetual wireless nanosensor networks in the terahertz band // IEEE Trans. Nanotechnol.— 2012.— № 11 (3).— P. 570–580.
13. Wang Z. L. Towards self-powered nanosystems: from nanogenerators to nanopiezotronics. / Adv. Funct. Mater.— 2008.— № 18 (22).— P. 3553–3567.
14. Jornet J. M., Pujol J. C., Pareta J. S. PHLAME: a physical layer aware MAC protocol for electromagnetic nanonetworks in the terahertz band / Nano Commun. Netw. (Elsevier).— 2012.— J.3 (1).— P.74–81.
15. Mohrehkesh S., Weigle M. C. RIH-MAC: receiver-initiated harvesting-aware mac for nanonetworks / in Proc. of the ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication, ACM NANOCOM, Atlanta, GA.— May 2014.
16. Han C., Akyildiz I. F. Distance-aware multi-carrier (DAMC) modulation in terahertz band communication / in Proc. IEEE International Conference on Communications, Accepted to ICC.— 2014.
17. Geim A., Novoselov K. The rise of graphene / Nature Mater.— 2007.— № 6.— P.183–191.
18. Pal A. N., Ghosh A. Ultralow noise field-effect transistor from multilayer graphene // Appl. Phys. Lett.— 2009.— № 95 (8).
19. HITRAN: high-resolution transmission molecular absorption database. Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Database.— 2014. www.cfa.harvard.edu.