

## МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІКОН ПРОЗОРОСТІ В ТЕРАГЕРЦОВОМУ ДІАПАЗОНІ

Розглянуто питання підвищення ефективності передавання даних по безпроводовому терагерцовому каналу на основі розробленого методу визначення оптимальних параметрів вікон прозорості. Наведено оптимальні значення порога і коефіцієнта використання радіоканалу за критерієм мінімізації ймовірності приймання  $n$ -значної дискретної послідовності з  $m$  і більшою кількістю уражених символів, що дозволяє знайти оптимальні компроміси між відношенням сигнал/шум, пропускнуою спроможністю каналу і дальністю зв'язку для цих вікон прозорості.

**Ключові слова:** частотні вікна прозорості, терагерцовий діапазон, оптимізація характеристик каналів

**Saiko V. H., Lysenko D. O., Hryshchenko L. M., Dakova L. V., Kravchenko V. I. The method for determining optimal parameters of the low-loss transmission windows in terahertz range.**

The questions of increasing the efficiency of data transmission over a wireless and terahertz channel based on the method developed to determine the optimal parameters of low-loss transmission windows are considered. The article attempts to assess the quality of radio reception of discrete data, taking into account both energy and time characteristics for radio communications of the terahertz range by using the general statistical average positions. In carrying out this assessment, at first the probability of defeat with use of additive (total) noise of the significant positions of taken symbols has been investigated. The effect of defeat consisted in full or in part (depending on the current parameters of the transmission and distribution medium) suppression of relatively weak and dying signals with use of strong enough (by the level and duration) noise. The feature of developed probable model is the its ability to describe only stability characteristics of reception of the discrete data, without including the type of signal and operation algorithms of the computing circuits of receiver device at its digital processing. By using this model there is the opportunity to develop the best rules of optimization of channel of the terahertz range (optimal control of transmission parameters) rather than specific digital devices.

**Keywords:** frequency transmission windows, terahertz range, optimal control of transmission parameters

**1. Вступ.** Основними вимогами, що пред'являються до мобільних систем цифрового радіозв'язку нового покоління, є висока швидкість і надійність передавання даних великому числу користувачів в складних умовах поширення сигналів. Для практичної реалізації цих вимог розробники ретельно розглядають в основному один з найперспективніших шляхів, необхідних для побудови мереж мобільного зв'язку четвертого і п'ятого поколінь (4G і 5G), а саме – використання телекомунікаційних систем цифрового радіозв'язку терагерцового діапазону та перехід на малі соти (мікросоти, пікосоти і фемтосоти), які є базовими станціями з обмеженим діапазоном дії і які встановлюються для розширення зони покриття базових станцій макрорівня.

На сьогоднішній день для таких мобільних систем дослідження сфокусовано на збільшенні пропускнуої здатності каналу зв'язку при використанні надширокосмугових сигналів, які займають весь терагерцовий діапазон [1]. Однак, варто зазначити, що в багатьох перспективних додатках для мереж 5-го покоління дальність зв'язку відіграє більш значиму роль, ніж швидкість передавання даних. Таким чином, виникла необхідність вирішення важливої науково-технічної задачі – розробки методу збільшення радіусу дії окремого вузла зв'язку терагерцового діапазону.

У статті запропоновано метод оптимального вибору частотних діапазонів, відомих як вікна прозорості, а потім доведено, що правильний вибір діапазону частот зумовлює кращу ефективність системи з точки зору дальності зв'язку та пропускнуої здатності каналу.

**2. Особливості розповсюдження радіохвиль в терагерцовому діапазоні.** В даний час в багатьох роботах отримано значні результати з досліджень поширення міліметрових, частково субміліметрових і терагерцових хвиль [2, 3]. Основні особливості терагерцового випромінювання, які відрізняють його від мікрохвильового і оптичного, проявляються, головним чином, під час його взаємодії з речовиною.

Зокрема, в терагерцовому діапазоні знаходяться резонанси обертальних і коливальних переходів молекул багатьох речовин, що дозволяє ідентифікувати діелектричне середовище різного агрегатного стану. Якщо для мікрохвильового випромінювання взаємодія поля і речовини обумовлена механізмами дипольно-релаксаційної поляризації (час релаксації близько  $10^{-6} \dots 10^{-10} \text{ c}$ ), а для оптичного-електронної поляризації (час релаксації  $10^{-15} \text{ c}$ ), то в терагерцовому діапазоні проявляються відразу два види поляризації – дипольна і йонна (атомна).

Час релаксації йонної поляризації складає приблизно  $10^{-13} \text{ c}$  (частота 10 ТГц). При цьому провідна роль відводиться саме дипольній поляризації, яка характерна для полярних діелектриків і визначається орієнтацією дипольних молекул в напрямку вектора напруженості поля.

Дійсну  $\epsilon'$  і уявну  $\epsilon''$  складові комплексної діелектричної проникності діелектричних речовин в залежності від частоти можна знайти зі співвідношень Дебая:

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_c - \epsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (1)$$

$$\epsilon'' = \frac{\omega \tau (\epsilon_c - \epsilon_{\infty})}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2)$$

де  $\epsilon_c$  і  $\epsilon_{\infty}$  – статична та високочастотна діелектричні проникності;  $\omega$  – частота;  $\tau$  – час релаксації.

Зі зростанням частоти  $\epsilon''$  монотонно знижується від статичного значення до високочастотного, приймаючи середньоарифметичне значення 0,5 ( $\epsilon_c + \epsilon_{\infty}$ ) на частоті релаксації  $\omega_p$ , де має максимальне значення. При цьому максимум тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg} \delta_e = \epsilon' / \epsilon''$  спостерігається на іншій частоті. Таким чином, під час переходу з мікрохвильового діапазону до терагерцового значення  $\epsilon'$  і  $\epsilon''$  багатьох речовин виявляються нижчими, а дисипативні втрати можуть різко зрости.

У повітрі залежність поглинання від частоти не є монотонною (вікна "прозорості" змінюються вікнами "поглинання"), але загальна тенденція зберігається – зі зростанням частоти збільшується і загасання, особливо високим воно є в терагерцовому діапазоні 1...10 ТГц (рис. 1) [4, 5].

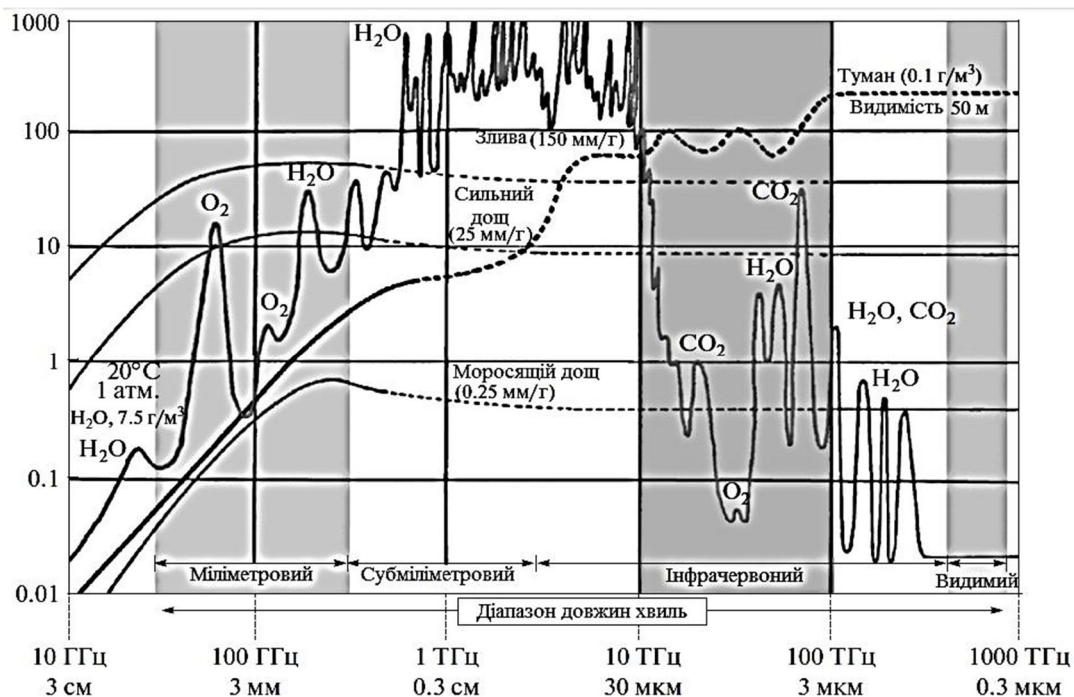


Рис. 1. Загасання хвиль міліметрового, субміліметрового та терагерцового діапазонів в атмосфері та атмосферних опадах[4, 5]

Необхідно зазначити, що основний внесок в поглинання випромінювання на частотах вище 30 ГГц вносить вода і її пари. У терагерцовому діапазоні, за даними NASA JPL, знаходиться близько 900 ліній поглинання води, які і обумовлюють високий рівень поглинання випромінювання в цьому діапазоні.

В роботі [6] проведено дослідження частотної залежності коефіцієнта ослаблення радіохвиль суб- та терагерцового діапазонів у дощах з урахуванням дрібнокрапельної фракції як функції розподілу крапель за розмірами.

Найбільш придатними для освоєння під мобільні телекомунікаційні системи є вікна прозорості, які можна визначити за певним рівнем загасання. Згідно з [7] таким граничним рівнем може бути 100 дБ/км. Тоді маємо п'ять вікон прозорості і при цьому пропускна здатність у смугах вікон терагерцового діапазону може досягати сотень Гбіт/с. Причому, чим менша відстань радіотраси, тим меншого впливу зовнішніх факторів і тим більшої пропускної здатності можна досягати.

Але цей підхід для визначення вікон прозорості, з нашої точки зору, не є раціональним. Це обумовлено тим, що за фіксованого граничного рівня порога коефіцієнт використання радіоканалу буде змінним [7] і, відповідно, ефективність використання вікна прозорості також буде змінною. Тому, якщо застосувати адаптивну модель, де є змінний рівень порогу, то при змінному відношенні сигнал/шум можна підтримувати постійний заданий коефіцієнт використання радіоканалу і, відповідно, швидкість передавання даних.

**3. Модель динамічного управління частотним радіоресурсом в терагерцовому діапазоні.** Необхідно зазначити, що на сьогоднішній день запропоновано й досить глибоко досліджено різні оцінки якості дискретного радіоканалу, що враховують більшість факторів, які істотно впливають на радіозв'язок [8, 9]. Однак, більшість із них не дозволяє врахувати часові характеристики зміни стану дисперсійних радіоканалів та їх вплив на достовірність прийнятої інформації. Хоча при цьому очевидно, що такі фактори, як глибина і тривалість завмирань сигналу нижче деякого граничного значення багато в чому визначають поточний стан радіоприймання в часі і за корисною енергетикою каналу в терагерцовому діапазоні.

Тому в статті зроблено спробу із загальних статистично середніх позицій оцінити якість радіоприймання дискретної інформації з урахуванням як енергетичних, так і часових характеристик, організованих на радіолініях зв'язку терагерцового діапазону. При проведенні такої оцінки доцільно спочатку досліджувати не ймовірність помилки, як таку, а ймовірність ураження (передпомилки) адитивною (сумарною) завадою значущих позицій прийнятих символів. Ефект ураження полягає в повному або частковому (в залежності від поточних параметрів передавання і середовища розповсюдження) придушенні слабкого завмираючого радіосигналу досить сильною (за рівнем і тривалістю) завадою.

Особливістю нижче розробленої ймовірної моделі є те, що вона описує тільки характеристики стійкості приймання дискретної інформації і не враховує вид сигналу та алгоритми роботи обчислювальних схем приймального пристрою під час його цифрової обробки. Завдання полягає в тому, щоб на основі цієї моделі отримувати можливість вироблення оптимальних правил оптимізації власне радіоканалу терагерцового діапазону (оптимального управління параметрами передавання), а не конкретних цифрових пристроїв (модемів, кодеків тощо).

Під час оцінки якості радіоканалу за всією робочою смугою терагерцового діапазону зміни його енергетичного стану можна виділити три характерні області. Перша (область I) відрізняється тим, що рівень сигналу перевищує певний граничний рівень  $A_{гр}$ , який визначається величиною заданого (як правило, мінімально допустимого) перевищення рівня сигналу ефективної напруженості поля зовнішніх адитивних завад. При знаходженні сигналу в другій області (область II) рівень сигналу відносно невисокий і дискретна інформація піддається впливу зовнішніх адитивних завад. У цій області флуктуації рівня сигналу обмежені значеннями  $A_{зр}$  і  $A_{п}$ . Нарешті, третя область (область III) характеризується тим, що рівень сигналу є меншим рівня  $A_{п}$ , який визначається реальною чутливістю радіоприймача  $U_0$ , що враховує тільки власні шуми радіоприймальних пристроїв. При цьому на приймання

інформаційних повідомлень будуть впливати не тільки зовнішні (в основному імпульсного характеру) завади, але й внутрішні (флуктаційні) шуми.

У сенсі оцінки ефекту впливу завад на якість радіоприймання ці області можна відповідно трактувати як області стійкого, нестійкого та незадовільного приймання.

Дані про те, як співвідносяться між собою зазначені області за середньою тривалістю інтервалів часу перебування в них каналу зв'язку (огинаючою прийнятого сигналу), представлено на рис.1. З рисунка видно, що в кожному конкретному випадку здійснення радіоприймання, що характеризується різними значеннями енергетичних і дисперсійних параметрів сигналів і завад, кожна з областей з часом може бути більш-менш суттєвою для визначення якості приймання в динаміці функціонування радіомереж цифрового радіозв'язку терагерцового діапазону.

Тому оцінку приймання дискретної інформації в умовах зміни енергетичного стану терагерцового каналу доцільно проводити через відповідні ймовірності ураження значущих позицій приймальних інформаційних послідовностей (інформаційних пакетів) викидами завад при знаходженні каналу в кожній з вище визначених областей. В якості критерію оцінювання тут може виступати ймовірність  $U(\geq m, n)$  приймання  $n$ -значної дискретної послідовності з  $m$  і більш ураженими символами.

З точки зору кількісної оцінки ймовірності  $U(\geq m, n)$ , як факт ураження значущих позицій, прийемо ситуацію, коли викиди огинаючої адитивної завади (шуму) перевищують за рівнем обвідну сигналу на вході приймального пристрою.

При цьому, для ураження більше  $m$  символів  $n$ -значної послідовності необхідно одночасно виконати три умови:

*першу* – щоб відрізок часу, протягом якого приймається інформаційний пакет, принаймні  $i$ -а його частина, припав на період завмирання сигналу нижче рівня  $A_{zp}(A_n)$ ;

*другу* – щоб час початку викиду завади (шуму) припав на початок проходження принаймні  $i$ -ої частини інформаційного пакету;

*третю* – щоб тривалість цього викиду була не меншою, ніж тривалість будь-якого  $i$ -го відрізка інформаційного пакету  $i = m\tau$ , де  $\tau$  – тривалість передавання одиничного символу (біта) інформації.

Тоді при знаходженні огинаючої сигналу в області II вираз для ймовірності  $U(\geq m, n)$  можна записати у вигляді:

$$U(\geq m, n)_{II} = \int \int \int_Q f(\tau_e) \phi(x) \eta(t) d\tau_e dx dt, \quad (3)$$

де  $f(\tau_e)$  – щільність розподілу тривалості  $\tau_e$  викидів завади вище рівня  $A$  огинаючої сигналу;

$\phi(x)$  – щільність розподілу початкових моментів викидів завади на інтервалі  $\bar{t}_3^{-1}$ ;

$\eta(t)$  – щільність розподілу тривалості дискретної послідовності, що приймається на інтервалі  $\bar{t}_p^{-1} + \bar{t}_3^{-1}$ ;

$\bar{t}_p^{-1}, \bar{t}_3^{-1}$  – відповідно середні тривалості інтервалів стійкої роботи каналу і завмирань сигналу рівня  $A_{zp}$ .

Випадковий характер надходження потоку повідомлень в радіомережах терагерцового діапазону поряд з випадковими природою і характером прояву адитивних і мультиплікативних завад зумовлює той факт, що тимчасові позиції передавання дискретної інформації, зміни енергетичного стану каналу і викидів зовнішніх і внутрішніх адитивних завад радіотрансляції, як правило, не корельовані. Тоді при побудові щільностей  $\eta(t)$  та  $\phi(x)$  правомірно (у першому наближенні) обмежитися рівномірним законом розподілу відповідних їм величин на тривалості інтервалів, істотних для їх аналізу.

Після відповідних перетворень для щільності  $\eta(t)$  остаточно отримаємо:

$$\eta(t) = \frac{\bar{t}_3^{-1} - \bar{t}_3^0 - 2m\tau}{\bar{t}_p^{-1} - \bar{t}_3^{-1}} \sqrt{b^2 - 4ac}, \quad (4)$$

де  $\bar{t}_3^0$  – середня тривалість періоду завмирання сигналу, нижчого від рівня  $A_n$ .

З урахуванням того, що викидів завади над рівнем  $A_o$  на інтервалі  $\bar{t}_u$  може бути в загальному випадку  $N$ , то вираз для щільності  $\phi(t)$  остаточно запишеться у вигляді:

$$\phi(t) = \frac{N}{\bar{t}_3^{-1}} [(n - 2m + 1)\tau + \tau_B]. \quad (5)$$

При побудові щільності  $f(\tau_B)$  слід знати природу конкретної діючої в тракці приймання завади. Враховуючи особливості розповсюдження хвиль в терагерцовому діапазоні і дані [10, 11], в таких випадках часто використовують апроксимацію зміни огинаючої нормального процесу за законом розподілу Релея з нульовим середнім, дисперсією  $\sigma^2 = U_{\phi}^2$  і часом кореляції  $\tau_0 = 1/\Delta f$ , де  $U_{\phi}^2$  – ефективна сумарна напруженість поля завад, а  $\Delta f$  – смуга пропускання радіоприймальних пристроїв.

Після відповідних перетворень вираз для обчислення ймовірності  $U(\geq m, n)$  остаточно отримаємо у наступному вигляді:

$$U(\geq m, n)_{II} = \frac{(\bar{t}_3^{-1} + \bar{t}_3^0 - 2m\tau)}{\bar{t}_p^{-1} + \bar{t}_3^0} \cdot \frac{(\bar{t}_3^{-1} - \bar{t}_3^0) \Delta f A_o}{\bar{t}_3^{-1} \sigma} \times \\ \times \left( 1 - \exp\left\{-\frac{A_o^2}{2\sigma^2}\right\} \right)_{(m-0.5)\tau}^{n\tau} \int [(n - 2m + 1)\tau + \tau_B] \exp\left\{-\frac{\tau_B A_o^2}{2\sigma^2 \tau_0}\right\} d\tau_B \quad (6)$$

за умови  $\bar{t}_3^{-1} - \bar{t}_3^0 \geq 2m\tau$ .

З формули (6) витікає, що при зміні значення рівня, відносно якого оцінюються параметри  $\bar{t}_p^{-1}$  та  $\bar{t}_3^{-1}$ , спостерігаються два процеси, які мають протилежний вплив на значення ймовірності  $U(\geq m, n)$ . З одного боку, при збільшенні порогового рівня ймовірність  $U(\geq m, n)$  спотворення прийнятої інформації через зміни стану терагерцового радіоканалу знижується. З іншого боку, при збільшенні порогового рівня зменшується коефіцієнт використання даного радіоканалу і разом з ним енергії біта сигналу, а отже, збільшується ймовірність  $U(\geq m, n)$ .

Таким чином, може існувати оптимальне значення порогового рівня,  $A_{opt} = k_{opt} A_o$ , за якого

$$\frac{\partial U(\geq m, n)}{\partial k_{opt}} = 0, \quad k = k_{opt}, \quad A_o = const. \quad (7)$$

Результати чисельного моделювання залежності  $U(\geq m, n) = f(k)$  при різних значеннях середнього порога  $A_o$  показали, що  $U(\geq m, n)$  досягає мінімального значення при деякому значенні  $k_{opt}$ . Відповідно вибираючи значення  $k_{opt}$  з урахуванням коефіцієнта використання радіолінії і ймовірності  $U(\geq m, n)$  можна здійснити передавання даних з необхідною ймовірністю  $U(\geq m, n)$  при незначному розширенні смуги сигналу.

А при цьому, з огляду на загальне припущення, що переданий сигнал і повний шум є гауссовими процесами, пропускна здатність  $C$  каналу зв'язку у вікні прозорості визначатиметься з використанням теореми Шеннона для каналу з шумами:

$$C(d) = \int_{B(d)} \log_2 \left( 1 + \frac{P(f)}{L_p(f,d)L_A(f,d)N_M(f,d)} \right) df, \quad (8)$$

де  $B$  – смуга пропускання каналу;  
 $P$  – спектральна щільність потужності сигналу;  
 $L_p$  – загасання сигналу у вільному просторі;  
 $L_A$  – загасання сигналу через молекулярні абсорбції;  
 $N_M$  – спектральна щільність потужності шуму молекулярної абсорбції.

**4. Висновки.** Таким чином, отримані результати дозволяють оцінити поточні (очікувані) характеристики надійності терагерцового каналу в динаміці функціонування при різних параметрах частотних вікон прозорості. Крім того, беручи до уваги багатопараметричний характер моделей, представляється можливим з загальносистемних позицій на основі статистики розподілу величин  $\bar{t}_p^{-1}, \bar{t}_3^{-1}$  і заданого коефіцієнта використання радіоканалу, проводити попередній об'єктивний аналіз умов забезпечення надійності зв'язку і будувати надалі конкретні алгоритми оптимізації частотно-енергетичних, просторових і частотно-часових характеристик каналів в терагерцовому діапазоні.

#### Список використаної літератури

1. Han C. Terahertz band: Next frontier for wireless communications / C. Han, I. F. Akyildiz / in Proc. IEEE International Conference on Communications. Accepted to ICC. – 2014.
2. Быстров Р. П. Дальность действия миллиметровых радиолокационных станций в дождях / Р. П. Быстров, А. В. Соколов, Р. Н. Чеканов // Радиотехника. – Москва, 2005. – № 1. – С. 19–23.
3. Быстров Р. П. Распространение короткой части миллиметровых и субмиллиметровых волн: возможные области их применения / Р. П. Быстров, А. В. Соколов // Радиотехника. – Москва, 2006. – № 5. – С. 11-18.
4. Кравчук С. О. Телекомунікаційні системи терагерцового діапазону / С. О. Кравчук, Т. М. Наритник. Монографія. – Житомир: ФОН «Євенок О.О.». – 2015. – 208 с.
5. Siegel P. H. Terahertz technology / P. H. Siegel // IEEE Trans. on microwave theory and techniques. – 2002. – Vol. 50, No. 3. – PP. 910-928.
6. Малышенко Ю. И. Оценка воздействия дождей на параметры радиолокационных станций микроволнового диапазона с учетом метеостатистических сведений о продолжительности выпадения дождей / Ю. И. Малышенко, Ю. В. Левадный // ИРЭ НАН Украины. – Радиофизика и электроника. – 2012. – Т. 3(17), № 1. – С. 36-40.
7. Grigat M. Link budget considerations for THz Fixed Wireless links / M. Grigat // IEEE Trans. on Terahertz science and technology. – 2012. – Vol. 2, №. 2. – P. 567-572.
8. Прокис Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис; под ред. Д. Д. Кловского; пер. с англ. – Москва : Радио и связь, 2000. – 800 с.
9. Связь с подвижными объектами в диапазоне СВЧ / Под ред. У. К. Джейкса ; пер. с англ. под ред. М. С. Ярлыкова, М. В. Чернякова. – Москва: Связь, 1979. – 304 с.
10. Пономарев Г. А. Распространение УКВ в городе / Г. А. Пономарев, А. Н. Куликов, Е. Д. Тельпуховский // Томск: МП РАСКО. – 1991. – 223 с.

11. Сайко В. Г. Системи цифрового бездротового радіозв'язку нового покоління / В. Г. Сайко: монографія. – Київ : ПП «Золоті ворота», 2011. – 300 с.

#### References

1. Han C., Akyildiz I. F. Terahertz band: Nextfrontier for wireless communications / in Proc. IEEE International Conference on Communications. Accepted to ICC. – 2014.
2. Bystrov R. P., Sokolov A. V., Chekanov R. N. Radio band of millimeter radar stations in the rains // Radiotekhnika. – 2005. – № 1. – PP. 19-23.
3. Bystrov R. P., Sokolov A. V. Distribution of the short millimeter and submillimeter waves, possible areas of application // Radiotekhnika. – 2006. – № 5. – P.P. 11-18.
4. Kravchuk S. O., Narytnyk T. M. Terahertz band telecommunication systems. – Zhytomyr: «Yevenok O. O.». – 2015. – 208 с.
5. Siegel P. H. Terahertz technology // IEEE Trans. on microwave theory and techniques. – 2002. – Vol. 50, No. 3. – PP. 910-928.
6. Malysenko Yu. I., Levadniy Yu. V. Assessing of the impact of the rains to the parameters of radar stations of the microwave band take into account meteorological information about the duration of rainfall // IRE NASU. – Radio Physics and Electronics. – 2012. – Vol. 3(17), № 1. – P.P. 36-40.
7. Link budget considerations for THz Fixed Wireless links/ M. Grigat // IEEE Trans. On Terahertz science and technology. – 2012. – Vol. 2, No. 2. – P.P. 567-572.
8. Prokis John. Digital communication / ed. by Klovsky D. D. – Moskva : Radio i svyaz, 2000. – 800 p..
9. Communicate with mobile objects in SHF band ; ed. by Jakes U.K. – Moskva : Svyaz. – 1979. – 304 p.
10. Ponomarev G.A., Kulikov A.N., Telpuhovskij E.D. VHF propagation in the city // Tomsk : RASCO. – 1991 . 223 p..
11. Saiko V. H. Systems of the digital wireless radio of new generation. – Kyiv : Golden Gate, 2011. – 300 p.

#### Автори статті

**Сайко Володимир Григорович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, м. Київ. Тел. +380 (44) 249 25 04. E-mail: vgsaiko@gmail.com.

**Лисенко Дмитро Олександрович** – аспірант кафедри радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, м. Київ. Тел. +380 (67) 959 02 38. E-mail: lysenko@ucrf.gov.ua.

**Грищенко Людмила Миколаївна** – науковий співробітник кафедри радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, м. Київ. Тел. +380 (93) 672 65 40. E-mail: mila\_1956@mail.ru.

**Дакова Лариса Валеріївна** – аспірант кафедри радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, м. Київ. Тел.: +380 (99) 905 31 23. E-mail: l\_dakova@gmail.com.

**Кравченко Владислав Ігорович** – кафедри радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, м. Київ. Тел.: +380 (63) 801 81 16. E-mail: vladislav\_kravchenko@mail.ua.

#### Authors of the article

**Sayko Volodymyr Hryhorovych** – doctor of sciences (technical), professor, head of radiotechnologies department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel.: +380 (44) 249 25 04. E-mail: vgsaiko@gmail.com.

**Lysenko Dmytro Oleksandriovych** – postgraduate student of radiotechnologies department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel.: +380 (67) 959 02 38. E-mail: lysenko@ucrf.gov.ua.

**Hryshchenko Lyudmyla Mykolaivna** – research assistant of radiotechnologies department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel.: +380 (93) 672 65 40. E-mail: mila\_1956@mail.ru.

**Dakova Larysa Valeriivna** – postgraduate student of radiotechnologies department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel.: +380 (99) 905 31 23. E-mail: l\_dakova@gmail.com.

**Kravchenko Vladyslav Ihorovych** – postgraduate student of radiotechnologies department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel.: +380 (63) 801 81 16. E-mail: vladislav\_kravchenko@mail.ua.

Дата надходження  
в редакцію: 27.12.2016 р.

Рецензент:  
доктор технічних наук, професор В. А. Дружинін  
Державний університет телекомунікацій, Київ