

УДК 621.396.662.072.078

Сайко В.Г., д.т.н., Лисенко Д.О., аспірант; Грищенко Л. М., аспірант;  
Дакова Л.В., аспірант; Кравченко В.І., аспірант

## АЛГОРИТМ АДАПТАЦІЇ РАДІОСИСТЕМИ ДО СЕРЕДНЬОСТАТИСТИЧНИХ ЗМІН ПАРАМЕТРІВ РАДІОКАНАЛУ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

Saiko V.H., Lysenko D.O., Hryshchenko L.M., Dakova L.V., Kravchenko V.I. **Radio system adaptation algorithm to average changes of parameters of the terahertz radio channel.** This paper presents ways to reduce the likelihood of erroneous data reception in the terahertz fading radio channels. But this approach to determine the low-loss transmission windows, from our point of view, is not rational. It can be explained by the fact that at the fixed limit threshold level the utilization factor of radio channel will be variable and therefore efficiency of low-loss transmission windows will also be variable. Therefore it was proposed a new adaptive model with variable threshold level. It can be explained by the fact that at the fixed limit threshold level the utilization factor of radio channel will be variable and therefore efficiency of low-loss transmission windows will also be variable. Therefore it was proposed a new adaptive model with variable threshold level. It allows at change of signal to noise ratio to maintain a constant given utilization factor of radio channel and therefore transmission speed. On the basis of the developed and probable model, in this article the mechanism of adaptation of mobile system functioning mode to the average changes of the parameters of terahertz wireless links, which allows to provide an optimal selection of frequency bands or low-loss transmission windows.

**Keywords:** low-loss transmission windows, radio channel, terahertz band, propagation medium of radio waves, adaptive analyzer

Сайко В.Г., Лисенко Д.О., Грищенко Л.М., Дакова Л.В., Кравченко В.І. **Алгоритм адаптації радіосистеми до середньостатистичних змін параметрів радіоканалу терагерцового діапазону.** В статті на основі ймовірної моделі [1] запропоновано спосіб зниження ймовірності помилкового приймання даних в радіоканалах терагерцового діапазону, який дозволить забезпечити оптимальний вибір частотних діапазонів або вікон прозорості. В залежності від вимог необхідних додатків можна зробити раціональний вибір параметрів радіосистем, які відповідатимуть критеріям пропускної здатності і дальності зв'язку цих додатків.

**Ключові слова:** вікна прозорості, радіоканал, терагерцовий діапазон, середовище розповсюдження радіохвиль, адаптивні аналізатори

Сайко В.Г., Лисенко Д.А., Грищенко Л.Н., Дакова Л.В., Кравченко В.И. **Алгоритм адаптации радиосистемы к среднестатистическим изменениям параметров радиоканала терагерцового диапазона.** В статье на основе предполагаемой модели [1] предложен способ снижения вероятности ложного приема данных в радиоканалах терагерцового диапазона, который позволит обеспечить оптимальный выбор частотных диапазонов или окон прозрачности. В зависимости от требований необходимых приложений можно сделать рациональный выбор параметров радиосистем, отвечающих критериям пропускной способности и дальности связи данных приложений.

**Ключевые слова:** окна прозрачности, радиоканал, терагерцовый диапазон, среда распространения радиоволн, адаптивные анализаторы

### Вступ

**Постановка задачі.** Основними вимогами, що пред'являються до мобільних систем радіозв'язку нового покоління, є висока швидкість і надійність передачі даних великій кількості користувачів в складних умовах поширення сигналів. Для практичної реалізації цих вимог розробники здебільшого приділяють велику увагу найбільш перспективним шляхам побудови мереж мобільного зв'язку четвертого і п'ятого поколінь (4G і 5G) використанню телекомунікаційних систем цифрового радіозв'язку терагерцового діапазону та переходу на малі стільники (мікростільники, пікосоти і фемтосоти), які являють собою базові станції з обмеженим діапазоном дії і встановлюються для розширення зони покриття базових станцій макрорівня. На сьогоднішній день дослідження для таких мобільних систем сфокусовано переважно на збільшенні пропускної здатності каналу зв'язку при використанні

надширококутних сигналів, що займають весь терагерцовий діапазон [2]. Однак, варто зазначити, що в багатьох перспективних додатках для мереж 5-го покоління дальність зв'язку відіграє більш значиму роль, ніж швидкість передачі даних. Таким чином, розробка методики збільшення радіусу дії окремого вузла зв'язку терагерцового діапазону є досить важливою науковою задачею.

**Мета роботи** полягає в зниженні ймовірності помилкового приймання даних в радіоканалах терагерцового діапазону із завмираннями завдяки застосуванню алгоритму адаптації режиму роботи систем до середньостатистичних змін параметрів радіолінії систем мобільного зв'язку в залежності від рівня порога при фіксованих значеннях потужності передавача і середньої величини відношення сигнал/шум.

Для подальшого дослідження можливостей використання радіохвиль ТГц діапазону в радіотехнічних системах (РТС), насамперед виконаємо аналіз результатів досліджень [3-5] молекулярного поглинання в атмосфері і гідрометеорах досліджуваних радіохвиль.

### 1. Особливості приймання і передачі сигналів в терагерцовому діапазоні

З [3-5] відомо, що при функціонуванні радіотехнічних систем (РТС) в атмосфері енергія електромагнітних коливань під час поширення послаблюється експоненціально за законом Бугера. Тому для визначення реальної дальності дії РТС необхідно отримати дані щодо коефіцієнту сумарного поглинання і ослаблення, а також його розподілу в просторі і в часі. У зв'язку з цим доцільно проаналізувати особливості поширення терагерцових радіохвиль в атмосфері, в дощах, туманах і пилодимових завадах.

Згідно з [3,4] повний коефіцієнт поглинання і ослаблення можна подати у вигляді суми виду:

$$\gamma_{\text{ноз.}} = \gamma_{H_2O} + \gamma_{O_2} + \gamma_D + \gamma_T + \gamma_O + \gamma_{MS} + \gamma_S \quad (1)$$

де  $\gamma_{H_2O}$  - коефіцієнт поглинання у водяній парі;  $\gamma_{O_2}$  - коефіцієнт поглинання в кисні;  $\gamma_D$  - коефіцієнт ослаблення в дощі;  $\gamma_T$  - коефіцієнт ослаблення в тумані;  $\gamma_O$  - коефіцієнт ослаблення в хмарах;  $\gamma_{MS}$  - коефіцієнт поглинання в мокрому снігу;  $\gamma_S$  - коефіцієнт поглинання в сухому снігу.

При цьому необхідно зазначити, що одна з основних проблем в мікрохвильовому діапазоні пов'язана з розходженням електромагнітних хвиль при видаленні від випромінювача через дифракції. З теорії антен відомо, що потужності і передавальної і приймальної антен пов'язані між собою:

$$P_1 = P_2 \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_2 G_1 F_2(\theta_2, \varphi_2) F_1(\theta_1, \varphi_1) \tau \xi \quad (2)$$

де  $G$  - направленість;  $F$  - функція розподілу нормованої інтенсивності поля;  $d$  - відстань між антенами;  $\tau$  - коефіцієнт передачі потужності;  $\xi$  - поляризаційний коефіцієнт передачі;  $\theta$  та  $\varphi$  - сферичні координати.

Зі зростанням відстані від передавальної антени через кутове розходження поперечний переріз пучка електромагнітних променів збільшується пропорційно квадрату відстані і квадрату кута розходження. Тому на великій відстані від джерела електромагнітна енергія розтікається вздовж дедалі зростаючої площі, і на одиницю площі припадає частка загальної електромагнітної енергії, яка дедалі зменшується.

Для випадку ідеального узгодження приймальної та передавальної антен рівняння (2) можна замінити іншим виразом:

$$P_1 = P_2 \frac{S_1 S_2}{d^2 \lambda^2} F_2(\theta_2, \varphi_2) F_1(\theta_1, \varphi_1) \tau \xi \quad (3)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  - ефективна площа передавальної та приймальної антен.

Зі співвідношення (3) видно, потужність, що приймається, тим більше, чим вище  $\lambda$ , отже, в терагерцовому діапазоні ефективність передачі електромагнітного випромінювання

зростає в порівнянні з мікрохвильовим. В [6] з використанням (3) було проведено оціночні розрахунки для двох комунікаційних систем з робочими частотами 60 і 400 ГГц. Незважаючи на те, що терагерцеві джерела поступаються за потужністю мікрохвильовим, при передачі сигналу на відстань до 2 км цей недолік було скомпенсовано більш високою направленістю.

Проведений аналіз досліджень питань поширення радіохвиль в терагерцевому діапазоні [1,3-7] дозволив сформулювати наступні висновки.

1. Особливостями поширення радіохвиль в атмосфері, в тому числі і в гідрометеорах (дощ, туман, сніг) є наявність в ТГц діапазоні цілої низки ділянок спектра (1,3 мм; 0,98 мм і 0,88 мм). Ослаблення для зазначених довжин хвиль становить: 2 дБ/км, 7 дБ/км і 13 дБ/км відповідно, що дозволяє використовувати ці ділянки спектра в радіотехнічних системах.

2. Ослаблення в туманах в ТГц діапазоні хвиль при водності  $0,1 \text{ г/м}^3$ , в порівнянні з дощами, невелике і не перевищує 2 дБ/км.

3. Ослаблення поширення ТГц хвиль в снігу не піддається суворій теоретичній оцінці. Однак відомо, що воно приблизно є вдвічі меншим, ніж в дощах з інтенсивністю менше 5 мм/год.

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 пропускну здатність у смугах вікон терагерцевого діапазону може досягати сотень Гбіт/с. Причому, чим менша відстань радіотраси, тим меншого впливу зовнішніх факторів і тим більшої пропускну здатності можна досягати.

Але цей підхід для визначення вікон прозорості, з нашої точки зору, не є раціональним. Це зумовлено тим, що за фіксованого граничного рівня порога коефіцієнт використання радіоканалу буде змінним і, відповідно, ефективність використання вікна прозорості також буде змінною. Тому в [1] було запропоновано нову адаптивну модель зі змінним рівнем порогу. Вона дозволяє при зміні відношення сигнал/шум підтримувати постійний заданий коефіцієнт використання радіоканалу і, відповідно, швидкість передачі даних.

На основі ймовірної моделі [1], в даній статті запропоновано механізм адаптації режиму роботи системи до середньостатистичних змін параметрів радіолінії терагерцевого діапазону, який дозволяє забезпечити оптимальний вибір частотних діапазонів або вікон прозорості. Сутність методики полягає у визначенні оптимальних значень параметрів засобів радіозв'язку нового покоління для забезпечення надійного зв'язку каналу зв'язку терагерцевого діапазону між приймачем і передавачем під час функціонування в умовах низьких відношень сигнал-шум у вікнах прозорості та забезпечення необхідної якості приймання.

## 2. Сутність механізму адаптації режиму роботи системи до середньостатистичних змін параметрів радіоканалу в терагерцевому діапазоні

**Критерій оцінки ступеня впливу дисперсійних властивостей середовища розповсюдження радіохвиль на стійкість каналу.** В умовах завмирань сигналу контроль поточного стану радіоприймання (якість каналу) доцільно оцінювати через відношення середньої тривалості інтервалів  $\bar{t}_p$  стійкої роботи каналу до середньої тривалості інтервалів  $\bar{t}_3$  завмирань сигналу. Очевидно, що величина  $w = \bar{t}_p / \bar{t}_3$  характеризує відносну стаціонарність каналу за якістю в умовах випадкових змін характеристик радіотрас. При цьому, як показують експериментальні дослідження трас мобільного радіозв'язку [8-10], параметр  $\sigma_A$  змінюється в межах  $\sigma_A \approx (0.2...5)m_A$ . Оскільки на середньо пересічній місцевості траси радіозв'язку протяжністю близько 2...5 км в переважній кількості випадків є закритими або напівзакритими, то для оцінки якості каналу справедливо обмежитися значеннями  $\sigma_A \approx (1...5)m_A$ . На рис. 1 наведено графічні залежності параметра,  $\sigma_A$  від

середнього співвідношення сигнал-шум, отримані шляхом аналітичного моделювання процесів поширення радіохвиль в середовищі, при різних значення параметра  $\sigma_A$  огинаючої сигналу. Прямолінійний характер графіків дозволяє із загальних статистичних позицій оцінювати очікувану на найближчий час якість каналу шляхом прогнозування.

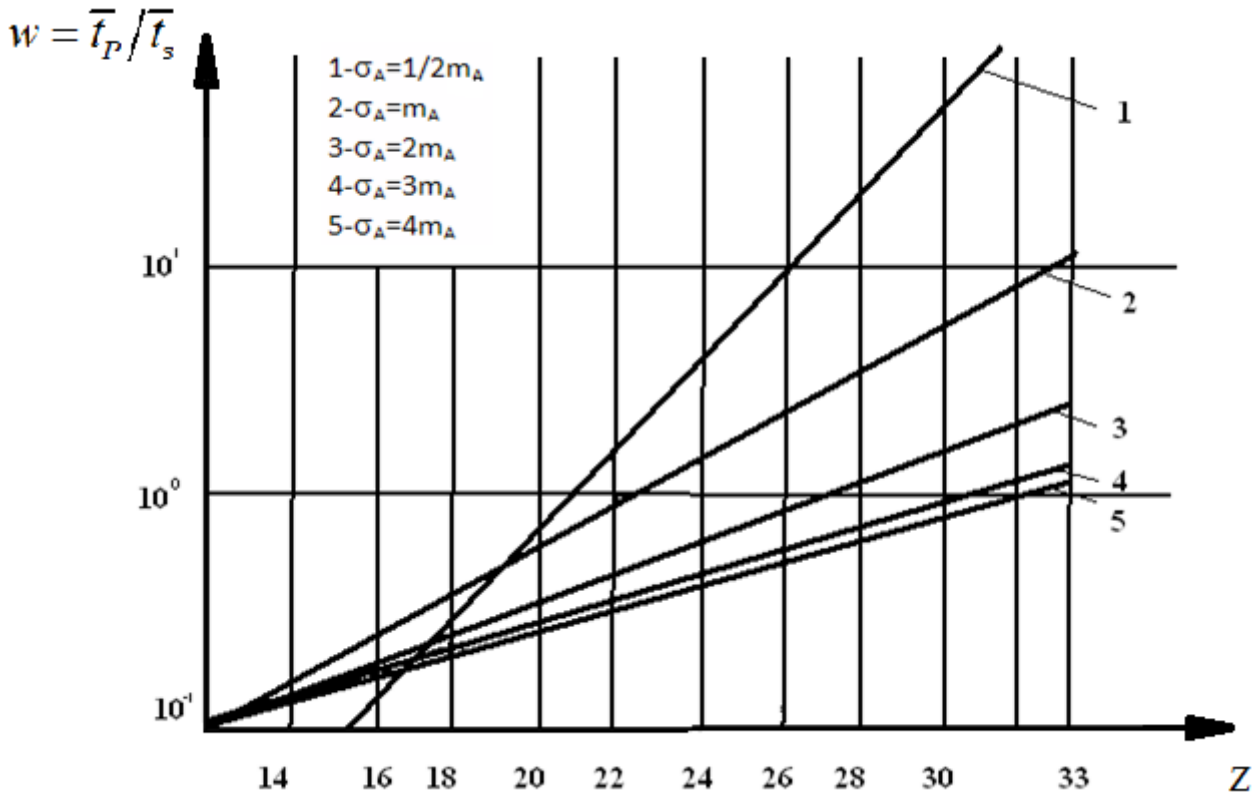


Рис. 1. Графічні залежності параметра  $w$  від середнього співвідношення сигнал-шум  $Z$

З рис. 1 видно, що на відкритих трасах зв'язку [8] ( $\sigma_A \approx 0,2 - 0,5m_A$ ) збільшення енергетики радіоліній зумовлює істотне поліпшення якості каналу. Так, при збільшенні співвідношень сигнал-шум  $\bar{Z}$  з 25 дБ до 36 дБ параметр  $w$  збільшується в сотні разів. Чим більше параметр  $\sigma_A$ , тим більше ослаблення сигналу в місці приймання за рахунок дифракції хвиль на великомасштабних компонентах траси зв'язку, ефекту затінення і багаторазового відбиття радіохвиль в процесі їх розповсюдження. Зменшення нахилу графіків при цьому вказує на можливість досягнення дедалі меншого відчутного виграшу в якості каналу шляхом збільшення співвідношення сигнал-шум.

Таким чином, критерієм оцінки ступеня впливу дисперсійних властивостей середовища розповсюдження на стійкість каналу може слугувати параметр  $\theta = \operatorname{tg} \alpha$ ,  $\alpha$  - кут нахилу графіків. Через характеристики каналу параметр  $\theta$  виражається наступним чином (див. рис. 1):

$$\theta = \frac{\lg w_2 - \lg w_1}{\bar{Z}_2 - \bar{Z}_1}; w_i = \frac{\bar{t}_{pi}}{\bar{t}_{zi}}; \bar{Z}_i = \frac{m_{Ai}}{U_{3+ui}}; i=1, 2. \quad (4)$$

Звідки

$$\bar{Z}_2 = (\lg w_2 - \lg w_1 + \theta \bar{Z}_1) / \theta. \quad (5)$$

Для практичної реалізації алгоритму адаптації режиму роботи системи до середньостатистичних змін параметрів радіоканалу в терагерцовому діапазоні необхідно

розглянути також особливості побудови сучасних вимірювачів характеристик параметрів викидів випадкових процесів.

### 3. Особливості побудови адаптивних аналізаторів розподілу інтервалів перебування випадкового процесу всередині і поза заданими межами

Розглянемо стаціонарний випадковий процес  $X(t)$ , що перетинає в випадкові моменти часу фіксовані рівні  $x_1$  і  $x_2 \gg x_1$ . Нехай  $\lambda_1(x_1)$  – інтенсивність викидів процесу під (над) рівнем, відповідно  $\lambda_1(x_2)$  – інтенсивність викидів над рівнем  $x_2$ . Сумарне середнє число  $\bar{N}$  інтервалів перебування процесу всередині заданих меж  $x_1$  і  $x_2$  за час  $T$  може бути знайдено через сумарну інтенсивність викидів:

$$\bar{N} = [\lambda_1(x_1) + \lambda_1(x_2)] \cdot T$$

Середній час  $\bar{T}_{\text{преб.}}$  перебування всередині кордонів за час аналізу  $T$ :

$$\bar{T}_{\text{преб.}} = P(x_2 \geq x \geq x_1) \cdot T$$

де  $P(x_2 \geq x \geq x_1) = \int_{x_1}^{x_2} W(x) dx$  – ймовірність попадання миттєвих значень процесу  $X(t)$  між рівнями аналізу,  $W(x)$  – щільність розподілу миттєвих значень.

Відповідно, середній час перебування процесу поза межами:

$$\bar{T}_{\text{непр.}} = T - \bar{T}_{\text{преб.}} = [1 - P(x_2 \geq x \geq x_1)]T$$

Звідси можна знайти середні тривалості інтервалів перебування процесу всередині і поза заданими межами:

$$\bar{\tau}_{\text{преб.}} = \frac{\bar{T}_{\text{преб.}}}{\bar{N}} = \frac{P(x_2 \geq x \geq x_1)}{\lambda_1(x_1) + \lambda_1(x_2)} \quad (9)$$

$$\bar{\tau}_{\text{непр.}} = \frac{\bar{T}_{\text{непр.}}}{\bar{N}} = \frac{1 - P(x_2 \geq x \geq x_1)}{\lambda_1(x_1) + \lambda_1(x_2)} \quad (10)$$

Як видно з (9) і (10),  $\bar{\tau}_{\text{преб.}}$  та  $\bar{\tau}_{\text{непр.}}$  залежать від розподілу миттєвих значень процесу, висоти відносних рівнів аналізу  $\frac{x_1}{\sigma}$  і  $\frac{x_2}{\sigma}$ , ширини зони аналізу  $\frac{x_2 - x_1}{\sigma}$ , інтенсивності викидів над заданими рівнями, тобто ширини енергетичного спектра процесу. У загальному випадку,  $\bar{\tau}_{\text{преб.}}$  та  $\bar{\tau}_{\text{непр.}}$  можуть різко відрізнятися один від одного, тому вид щільності розподілу  $W_{\text{преб.}}(\tau, x_1, x_2)$  та  $W_{\text{непр.}}(\tau, x_1, x_2)$  очікується різним. Внаслідок цього і ширина диференціального коридору при експериментальному вимірі обох щільностей не може вибиратися однаковою. За аналогією з [11,12], оптимальна ширина диференціального коридору  $(\Delta\tau)_{\text{opt}}$  після адаптації аналізатора повинна встановлюватися пропорційно середньому значенню вимірюваного інтервалу. А саме, необхідно задати:

$$(\Delta\tau)_{\text{преб.}} = k\bar{\tau}_{\text{преб.}}$$

$$(\Delta\tau)_{\text{непр.}} = k\bar{\tau}_{\text{непр.}}$$

Таким чином, за час адаптації аналізатора до випадкового процесу на його вході доцільно одночасно за двома паралельними каналами оцінити середні інтервали перебування процесу всередині і поза заданими межами і виробити оптимальні диференціальні коридори. Потім в процесі вимірювання функцій розподілу накопичити одночасно за двома каналами інформацію про інтервали перебування і не перебування, після чого одночасно закінчити вимірювання в момент накопичення певної кількості інтервалів перебування всередині заданих меж. По суті, даний адаптивний аналізатор складається з двох незалежних аналізаторів тривалості викидів, за аналогією з [11,12]. Деяким спрощенням є наявність

загальних блоків для обох каналів, таких як генератор, що задає лічильні імпульси, формувачі часу адаптації та вимірювань і низку інших.

#### 4. Основні етапи алгоритму адаптації режиму роботи системи до середньостатистичних змін параметрів радіоканалу

1. Виконання вимірювань параметрів сигнал-шум  $Z_o$  для кожного активного в даний момент часу радіоканалу.

2. Виконання вимірювань параметрів квазіперіодів  $t_p$  та  $t_z$  зміни енергетичного стану середовища.

3. Визначення розрахункового значення параметра  $m_A$  сигналу в частотній області за оцінюванням залежності величини  $w$  від відношення сигнал-шум за різних можливих значеннях  $m_A$  (рис.1) як елементу заданої множини розрахункових значень параметра  $m_A$  сигналу, найбільш близького до знайденого  $m_A$  сигналу в частотній області;

4. Визначення розрахункового оптимального порогового значення  $k_{opt}$  і діапазону змінювання порога  $k_{min} \dots k_{max}$  із залежності  $U(\geq m, n) = f(k)$  [1], де  $k = A / A_o$ ;  $A, A_o$  -- відповідний поточний (що приймається) і середній рівень сигналу.

5. Виконання вимірювань величини пакетної помилки для усіх можливих значень порогового рівня в діапазоні  $k_{min} \dots k_{max}$  багаточастотної системи радіозв'язку;

6. Для кожного з виконаних вимірювань порівняння виміряної величини пакетної помилки з пороговою величиною, необхідною для забезпечення необхідної якості радіоканалу;

7. Виключення з подальшого аналізу тих вимірювань, для яких виміряна величина пакетної помилки менше порогової величини, необхідної для забезпечення необхідної якості радіоканалу;

- для кожного з виконаних вимірювань, крім виключених з аналізу:

8. Визначення результуючої ймовірності правильного приймання пакета багаточастотної системи радіозв'язку для кожного можливого значення порогової величини, крім виключених з розгляду, усереднюючи знайдену ймовірність правильного приймання пакета багаточастотної системи радіозв'язку за всіма виконаними вимірюваннями, крім виключених з аналізу;

9. Визначення оптимального значення порогової величини як порогової величини, за якої значення результуючої ймовірності правильного приймання пакета багаточастотної системи радіозв'язку є максимальним.

#### Висновки

Відмінною рисою зазначеної методики є поєднання аналітичних і імітаційних методів зі статистичними методами аналізу середовища реалізації радіоканалу в терагерцевому діапазоні, яке набуває особливого значення при побудові перспективних радіосистем для мереж 4-го і 5-го покоління в зазначеному діапазоні.

Таким чином, за допомогою розробленої методики можна визначити оптимальні смуги пропускання каналу (вікна прозорості) для практичної реалізації і, відповідно, в залежності від вимог використовуваних додатків можна зробити раціональний вибір параметрів, які відповідають критеріям пропускну здатності і дальності зв'язку цих додатків.

#### Список використаної літератури

1. Сайко В.Г. Метод визначення оптимальних параметрів вікон прозорості в терагерцевому діапазоні // Сайко В.Г., Грищенко Л.М., Дакова Л.В., Лисенко Д.О., Кравченко В.І.// Телекомунікаційні та інформаційні технології. –2017.-- № 1.

2. Самоорганизующиеся радиосети с широкополосными сигналами: Монография / [Ильченко М.Е., Бунин С.Г., Войтер А.П., Романюк В.А.] – К.: НПП Издательство „Наукова думка” НАН Украины. – 2013. – с.444.
3. Быстров Р. П. Дальность действия миллиметровых радиолокационных станций в дождях / Р. П. Быстров, А. В. Соколов, Р. Н. Чеканов // Радиотехника. – М., 2005. – № 1. – С. 19–23.
4. Быстров Р.П., Соколов А.В. Распространение короткой части миллиметровых и субмиллиметровых волн: возможные области их применения. // Радиотехника, - № 5, - 2006. - С. 11-18.
5. 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.
6. Mann С.М. Towards terahertz communications systems, terahertz sources and systems / Ed by R. Miles et al. Amsterdam: Kluwer Academic. 2001.
7. 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. Связь с подвижными объектами в диапазоне СВЧ / Под ред. У.К. Джейкса: пер. с англ./ Под ред. М.С. Ярлыкова, М.В. Чернякова. – М.: Связь. – 1979. – 304 с.
9. Пономарев Г.А. Распространение УКВ в городе./ Пономарев Г.А., Куликов А.Н., Тельпуховский Е.Д. // Томск.: МП РАСКО.-- 1991.- 223с.
10. Сайко В.Г. Системи цифрового бездротового радіозв'язку нового покоління: монографія. – К.: ПП «Золоті ворота», 2011. – 300 с.
11. Фомин Я.А. Теория выбросов случайных процессов. – М.: Связь, 1980. – 216 с.
12. Тихонов В.И. Выбросы траекторий случайных процессов / Тихонов В.И. Хименко В.И. – М: Наука, 1987. - 305 с.

#### *Автори статті*

- Сайко Володимир Григорович** - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедру радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел. +38 044 249 25 04. E-mail: vgsaiko@gmail.com
- Лисенко Дмитро Олександрович** - аспірант кафедри радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел. +38 067 959 02 38. E-mail: lysenko@ucrf.gov.ua
- Грищенко Людмила Миколаївна** - науковий співробітник кафедри радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел. +38 093 672 65 40. E-mail: mila\_1956@mail.ru
- Дакова Лариса Валеріївна** - аспірант кафедри радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел. +38 099 905 31 23. E-mail: l\_dakova@gmail.com.
- Кравченко Владислав Ігорович** - аспірант кафедри радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, м. Київ. Тел. +38 063 801 81 16. E-mail: vladislav\_kravchenko@mail.ua

#### *Authors of the article*

- Sayko Volodymyr Hryhorovych** - doctor of sciences (technical), professor, head of Department of Radio technologies, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel. +38 044 249 25 04. E-mail: vgsaiko@gmail.com.
- Lysenko Dmytro Oleksandrovych** - post-graduate student of Department of Radio technologies, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel. +38 067 959 02 38. E-mail: lysenko@ucrf.gov.ua
- Hryshchenko Liudmyla Mykolaivna** - research assistant of Department of Radio technologies, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel. +38 093 672 65 40. E-mail: mila\_1956@mail.ru
- Dakova Larysa Valeriivna** - postgraduate student of Department of Radio technologies, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel. +38 093 672 65 40. E-mail: l\_dakova@gmail.com
- Kravchenko Vladyslav Ihorovych** - postgraduate student of Department of Radio technologies, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel. +38 063 801 81 16. E-mail: vladislav\_kravchenko@mail.ua

Дата надходження в редакцію: 01.02.2017 р.

Рецензент: д.т.н., проф. М.М. Климаш