

УДК 681.61

канд. техн. наук Ільницький А. І. ORCID: 0000-0001-5817-4917
(ННІ ТС НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»)

Захарчук Л. В. ORCID: 0009-0004-3171-6332 (ННІ ТС НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»)

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОДНОКАНАЛЬНОГО ПОШУКУ СИГНАЛІВ ЗАСОБІВ МОБІЛЬНОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ З ОДНИМ СТУПЕНЕМ ВИЯВЛЕННЯ В ЧАСТОТНО-ЧАСОВІЙ ОБЛАСТІ

В умовах повномасштабного вторгнення і ведення бойових дій за незалежність України питання радіомоніторингу джерел радіовипромінювання засобів телекомунікаційних мереж і систем набувають особливої уваги та вимагають принципово нових підходів до рівня інформатизації, технічної реалізації та підвищення їхньої ефективності.

На сьогодні технічні засоби радіоперехоплення, моніторингу й радіопеленгації в мережах систем мобільного радіозв'язку реалізуються у вигляді програмно-апаратних комплексів, найважливішими показниками ефективності яких вважається швидкодія, точність визначення та ймовірність розпізнавання засобів рухомого радіозв'язку з їхнім інформаційним наповненням. Водночас ці питання і дотепер залишаються проблематичними і потребують подальшого розвитку методів і способів пошуку та виявлення сигналів засобів рухомого радіозв'язку як у частотних, так і в часових телекомунікаційних каналах, та їх інформаційної обробки.

Для вирішення вказаного питання авторами запропоновано математичну модель пошуку сигналів мобільного радіозв'язку у частотно-часовій області з одним ступенем виявлення. Опис математичної моделі визначення спектральних складових сигналів у частотній і часовій областях здійснюється за допомогою основних положень теорії напрямлених ймовірнісних графів, геометричних ймовірностей з її відомою задачею про зустріч у заданий проміжок часу та теоретичних основ статистичної обробки інформації.

Аналіз запропонованої моделі свідчить, що ймовірність успішного завершення пошуку сигналу з одним ступенем виявлення в частотно-часовій області за заданий час залежить від значення тривалості сигналу, кількості аналізованих частотних каналів, часу аналізу сигналу в кожному каналі та ймовірностей похибок першого і другого роду. У статті наведено результати розрахунків значення ймовірностей успішного завершення пошуку сигналу від часу пошуку при різних значеннях часу аналізу. Показано, що застосування математичної моделі одноканального пошуку сигналів засобів мобільного радіозв'язку з одним ступенем виявлення в частотно-часовій області на практиці дасть можливість визначати якість процесу радіомоніторингу і підвищувати ефективність оцінювання спектральних складових радіосигналів за показниками швидкодії, точності визначення та ймовірності розпізнавання засобів мобільного радіозв'язку з подальшим визначенням їхнього інформаційного наповнення.

Ключові слова: радіомоніторинг, телекомунікаційні мережі, системи мобільного зв'язку, показники ефективності, швидкодія, точність визначення, ймовірність розпізнавання.

A. Pnytskyi, L. Zakharchuk Mathematical model of single-channel search for signals of mobile radio communications with one degree of detection in the frequency-time domain.

In the context of a full-scale invasion and military operations for Ukraine's independence, the issues of radio monitoring of radio emission sources of telecommunication networks and systems are gaining special attention and require fundamentally new approaches to the level of informatization, technical implementation and increase of their efficiency.

Today, the technical means of radio interception, monitoring and direction finding in the networks of mobile radio communication systems are realized in the form of software and hardware complexes, the most important performance indicators of which are considered to be speed, accuracy of detection and probability of recognition of mobile radio communication means with their information content. At the same time, these issues still remain problematic and require further development of methods and techniques for searching and detecting signals of mobile radio communications in both frequency and time telecommunication channels and their information processing.

To solve this issue, the authors propose a mathematical model for searching for mobile radio signals in the frequency-time domain with one degree of detection. The description of the mathematical model for determining the spectral components of signals in the frequency and time domains is carried out using the basic provisions of the theory of directed probability graphs, geometric probabilities with its well-known problem of meeting in a given time interval, and the theoretical foundations of statistical information processing.

The analysis of the proposed model shows that the probability of successful completion of the search for a signal with one degree of detection in the frequency-time domain for a given time depends on the value of the signal duration,

the number of analyzed frequency channels, the time of signal analysis in each channel, and the probabilities of errors of the first and second kinds The article presents the results of calculations of the value of the probability of successful completion of the signal search as a function of the search time at different values of the analysis time. It is shown that the application of the mathematical model of single-channel search for signals of mobile radio communication means with one degree of detection in the frequency-time domain in practice will make it possible to determine the quality of the radio monitoring process and increase the efficiency of evaluating the spectral components of radio signals in terms of speed, detection accuracy and probability of recognition of mobile radio communication means with further determination of their information content.

Keywords: radio monitoring, telecommunication networks, mobile communication systems, efficiency indicators, speed, detection accuracy, recognition probability.

Постановка проблеми. В умовах повномасштабного вторгнення і ведення бойових дій за незалежність України питання радіомоніторингу (РМ) джерел радіовипромінювання (ДРВП) засобів телекомунікаційних мереж і систем (ТКМС) набувають особливої уваги. На сьогодні технічні засоби радіоперехоплення, моніторингу й радіопеленгації в мережах безпроводових систем мобільного радіозв'язку (МРЗ) реалізуються у вигляді програмно-апаратних комплексів (ПАК) різних модифікацій, які працюють в умовах часткової або повної невизначеності параметрів вхідних сигналів у реальному масштабі часу на тлі величезної кількості і різноманітності ДРВП з найсучаснішими протоколами передачі даних. При цьому, найважливішими показниками ефективності ПАК при моніторингу безпроводових систем МЗР вважають швидкодію, точність визначення та ймовірність розпізнавання ДРВП рухомого радіозв'язку з їхнім інформаційним наповненням. Однак ці питання і дотепер залишаються проблематичними, що потребує подальшого розвитку ефективних методик, методів та способів пошуку і виявлення тональних, мовних і спеціальних сигналів МРЗ у частотно-часових телекомунікаційних каналах та їх інформаційну обробку [1; 2]. Також швидкий розвиток сучасних телекомунікаційних і комп'ютерних технологій, обчислювальної техніки, радіоелектроніки тощо призводить до появи нових технічних засобів різноманітного призначення, в тому числі й подвійного значення, які мають і оперують вже з новими «нетрадиційними» інформаційними ознаками. Вказані обставини потребують вдосконалення і розвитку систем РМ та протидії, поперед всього з позицій та методології високоефективних інтелектуальних систем, що забезпечують збір, обробку, накопичення і використання отриманої моніторингової інформації для прийняття рішення в масштабі реального часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У структурі ПАК моніторингу ДРВП засобів МРЗ основне місце має підсистема радіоприймальних пристроїв (РПП), яка вирішує завдання виявлення сигналів у частотно-часовій області за циклічними процедурами з одним або декількома ступенями виявлення, що реалізують методи послідовно-паралельного пошуку й виявлення сигналів. Як приклад можна навести мобільну станцію радіомоніторингу MMS-02, яка має такі технічні характеристики [3]: смуга радіочастот – 30–3000 МГц; чутливість – не нижче 0 дБмкВ/м (1 мкВ/м); динамічний діапазон – не гірше 75 дБ; максимальна швидкість панорамного огляду – не менше 300 МГц/с; невизначеність вимірювання рівня – не більше 3 дБ; точність вимірювання частоти – не менше 10^{-6} .

Під час пошуку сигналів МРЗ у частотній області з одним ступенем виявлення РПП налаштовується на частоту певного каналу (1, 2, ..., N), де протягом заданого часу аналізу $t_a = \text{const}$ приймається рішення про наявність або відсутність сигналу. У разі відсутності сигналу приймач переналаштовується на частоту наступного каналу й т. ін. З досягненням останнього каналу РПП налаштовується на частоту першого каналу й пошук починається знову.

Цю процедуру пошуку можна надати у вигляді напрямленого ймовірнісного графу [4] (рис. 1) і, спираючись на теорію напрямлених ймовірнісних графів [5], описати математично.

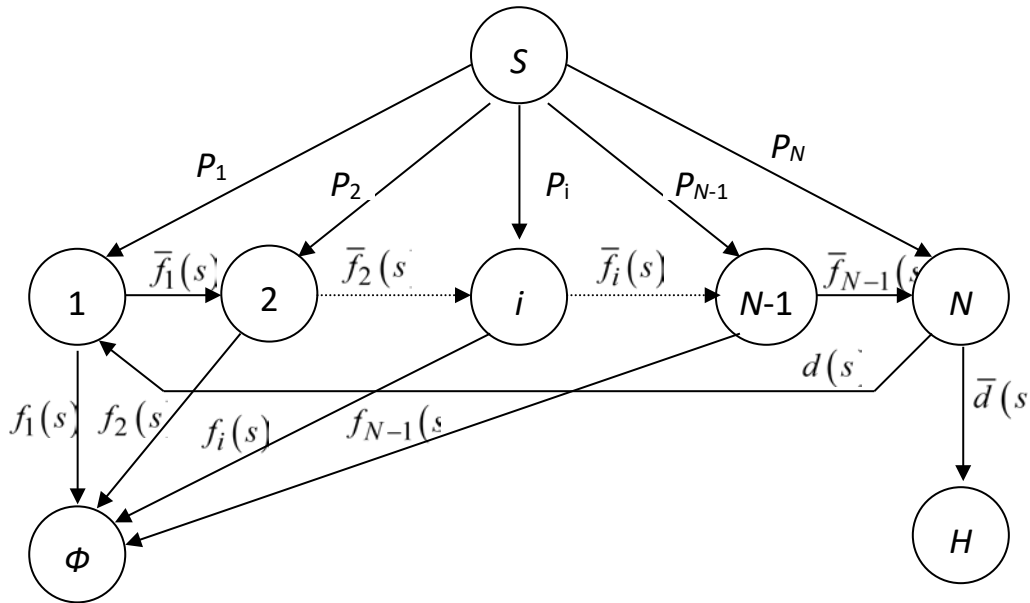


Рис. 1. Граф циклічної процедури одноканального пошуку з одним ступенем виявлення

Вузли графа відображають можливі стани підсистеми пошуку: S – початковий стан; $H(s)$ – поглинальний стан, що відповідає успішному завершенню пошуку сигналу (правильне розпізнавання); $\Phi(s)$ – поглинальний стан, що відповідає помилковому розпізнаванню сигналу. Ребра графа відображають можливі переходи системи з одного стану в інший. При цьому кожне ребро графа має ваги, які визначаються за (1) і враховують імовірність переходу за один крок зі стану, з якого ребро виходить, у стан, в яке воно входить, і час перебування у відповідному стані:

$$d(s) = De^{-ta^s}, \quad \bar{d}(s) = (1-D)e^{-ta^s}; \quad (1)$$

$$f_q(s) = F_q e^{-ta^s}, \quad \bar{f}_q(s) = (1-F_q)e^{-ta^s},$$

де F_q – імовірність помилкового виявлення (похибка першого роду) під час аналізу осередку з номером q ($q = 1, 2, \dots, N-1$), що не утримує сигнал;

D – імовірність пропуску сигналу (похибка другого роду) під час аналізу осередку з номером N .

За правилами перетворення графів [6] можна одержати такі вирази для функцій переходу графа з початкового стану S у поглинальні:

стан успішного завершення пошуку (правильне розпізнавання):

$$H(s) = \frac{\bar{d}(s) \sum_{i=1}^N P_i \prod_{q=i}^{N-1} \bar{f}_q(s)}{1 - d(s) \prod_{q=1}^{N-1} \bar{f}_q(s)}; \quad (2)$$

стан помилкового розпізнавання сигналу:

$$\Phi(s) = \sum_{i=1}^N P_i \frac{\sum_{q=i}^{N-1} f_q(s) \prod_{l=i}^{q-1} \bar{f}_l(s)}{1 - d(s) \prod_{q=1}^{N-1} \bar{f}_q(s)} + \frac{d(s) \prod_{q=i}^{N-1} \bar{f}_q(s)}{1 - d(s) \sum_{q=1}^{N-1} f_q(s)} \sum_{j=1}^{i-1} f_j(s) \prod_{t=1}^{j-1} \bar{f}_t(s), \quad (3)$$

де P_i – імовірність початку перегляду з i -го осередку ($i = 1, 2, \dots, N$).

Імовірність успішного завершення пошуку за заданий час визначається як зворотне перетворення Лапласа [5; 6] $P_{\Pi}^f(t) = L^{-1}\{H(s)/s\}$ і після подання $H(s)$ у вигляді геометричного ряду отримаємо, що:

$$P_{\Pi}^f(t) = \frac{1-D}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{n=0}^{\infty} D^n (1-F)^{n(N-1)+N-i} h\left[t - (Nn + N - i + 1) t_a\right], \quad (4)$$

де $h(x)$ – одинична функція;

t_a – час аналізу одного осередку;

$F_1 = F_2 = \dots = F_{N-1} = F$ – ймовірності помилкового виявлення в кожному каналі, що не містить сигнал;

$P_i = 1/N$ – рівномірний розподіл моментів появи сигналу усередині області пошуку.

Для обчислення ймовірності успішного завершення пошуку за час t необхідно в (4) просумувати всі складові з індексами i, n , що задовольняють нерівності:

$$(Nn + N - i + 1) t_a \leq t. \quad (5)$$

Отже, наведений вираз (4) можна вважати математичним описом (моделлю) успішного завершення пошуку (правильне розпізнавання) сигналу за час t_a аналізу N частотних каналів.

Однак, як показує практика, за час t_a аналізу N каналів сигнал може зникнути або з'явитися при його виявленні. При цьому моменти його появи або зникнення можуть не збігатися з моментами початку або закінчення РМ цього каналу. Крім того, сигнал у каналі може з'явитися й на попередньому циклі перегляду РПП N каналів. Тобто виникає необхідність проаналізувати стан й математично описати підсистеми пошуку сигналу не тільки в частотній, але й у часовій області.

Метою роботи є опис математичної моделі одноканального пошуку сигналів засобів мобільного радіозв'язку з одним ступенем виявлення в частотно-часовій області. Тобто об'єктом дослідження в статті є процес радіомоніторингу джерел радіовипромінювання засобів телекомунікаційних мереж і систем, а предметом дослідження – математична модель одноканального пошуку сигналів засобів мобільного радіозв'язку з одним ступенем виявлення в часовій області. Застосування математичної моделі на практиці дасть можливість підвищити ефективність оцінювання спектральних складових радіосигналів за показниками швидкодії, точності визначення та ймовірності розпізнавання засобів мобільного радіозв'язку з подальшим визначенням їхнього інформаційного наповнення.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для опису одноканальної підсистеми пошуку сигналів МРЗ у часовій області можна скористатись теорією геометричних ймовірностей та її відомою задачею про зустріч у заданий проміжок часу [5; 6] та розрахувати ймовірність зустрічі РПП й сигналу за час t_a аналізу N каналів, тобто протягом одного циклу перегляду T за умови, що тривалість шуканого сигналу τ_c не менша часу аналізу одного каналу $\tau_c \geq t_a$. При цьому тривалість одного циклу перегляду визначається як $T = t_a N$.

Розрахунок зазначеної ймовірності проведемо за допомогою рисунка 2, де координата x відображає момент надходження РПП в певний частотний канал, а y – момент появи в ньому сигналу. Як видно, на рисунку 2 виділено дві області: область M точок $[T \geq x \geq 0; T \geq y \geq -\tau_c]$ стану всієї процедури пошуку і область A точок $[x \geq y; y \geq x - (\tau_c - t_a)]$, що задовольняють умовам пошуку.

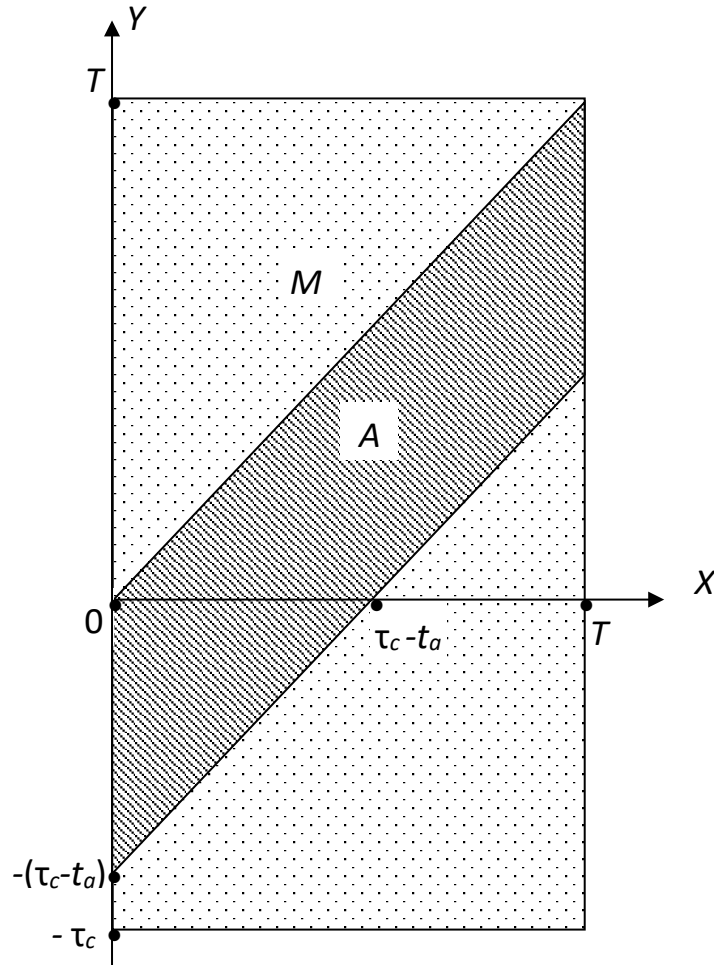


Рис. 2. Геометричне зображення областей пошуку сигналу

За визначенням геометричної ймовірності треба, щоб ймовірність P'_{Π} попадання точки в область A дорівнювала відношенню площі області S_A до загальної площі області S_M :

$$P'_{\Pi} = S_A / S_M.$$

Після обчислення S_A і S_M , з урахуванням рисунка 2, одержимо формулу для розрахунку цієї ймовірності:

$$P'_{\Pi} = \frac{\tau_c - t_a}{\tau_c + N t_a}. \quad (6)$$

Отже, наведений вираз (6) можна вважати математичним описом (моделлю) успішного завершення пошуку (правильне розпізнавання) сигналу τ_c за час t_a аналізу N частотних каналів з одним ступенем виявлення в часовій області.

Отримані математичні вирази (4)–(6) дають підставу розглянути особливості пошуку сигналів з одним ступенем виявлення в частотно-часовій області, де факт одночасного виявлення сигналу в частотній і часовій областях можна розглядати як незалежні випадкові події. При цьому згідно з [5; 6] і врахуванням того, що ймовірність успішного завершення пошуку сигналу в часовій області визначалася за один цикл перегляду РПП всіх каналів, ймовірність пропуску сигналу D_{Π} (похибка другого роду) під час пошуку в частотно-часовій області збільшується й визначається за формулою:

$$D_{\Pi} = 1 - (1 - D) P'_{\Pi} \quad (7)$$

З урахуванням (4), (6) і (7) імовірність успішного завершення пошуку за заданий час з одним ступенем виявлення в частотно-часовій області визначається як

$$P_{\Pi}(t) = \frac{(\tau_c - t_a)(1-D)}{N(\tau_c + Nt_a)} \sum_{i=1}^N \sum_{n=0}^{\infty} \left(1 - \frac{(\tau_c - t_a)(1-D)}{\tau_c + Nt_a} \right)^n \times (1-F)^{n(N-1)+N-i} h \left[t - (Nn + N - i + 1) t_a \right]. \quad (8)$$

З наведеного виразу (8) видно, що ймовірність успішного завершення пошуку сигналу з одним ступенем виявлення в частотно-часовій області за заданий час залежить від значення тривалості сигналу τ_c , кількості аналізованих частотних каналів N , часу аналізу сигналу в кожному каналі t_a та ймовірностей похибок першого F і другого роду D . Із цих величин реально можна змінювати тільки час аналізу сигналу в кожному каналі. Розраховані за виразом (8) значення імовірностей P_{Π} успішного завершення пошуку сигналу від часу пошуку при різних значеннях $t_a = 5$ мс, 10 мс, 20 мс наведено в таблиці 1 і зображено графічно на рисунку 3, за умови, що $\tau_c = 100$ мс, $F = 0,001$, $N = 10$, $D = 0,1$.

Таблиця 1

Імовірності P_{Π} успішного завершення пошуку сигналу від часу пошуку

t, мс	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
$t_a = 5$ мс	0,81	0,95	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
$t_a = 10$ мс	0,4	0,64	0,78	0,86	0,91	0,94	0,96	0,97	0,98	0,98	0,98
$t_a = 20$ мс	0,12	0,24	0,33	0,42	0,49	0,55	0,61	0,66	0,69	0,73	0,76

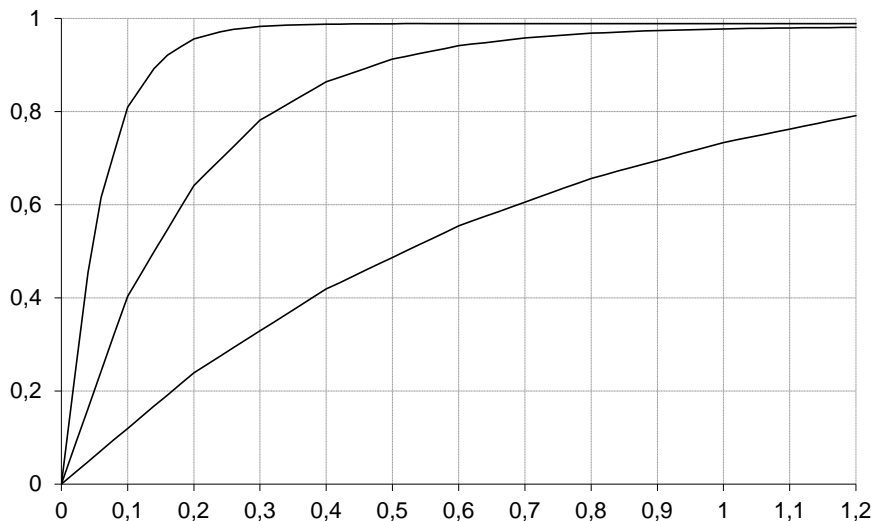


Рис. 3. Залежність імовірності P_{Π} успішного завершення пошуку сигналу з одним ступенем виявлення від часу пошуку пошуку при різних значеннях $t_a = 5$ мс, 10 мс, 20 мс

Аналізуючи отримані залежності, можна зробити висновок, що для збільшення ймовірності успішного завершення пошуку сигналу й зменшення його часу потрібно зменшувати час аналізу сигналу t_a в кожному каналі. Для цього можна запропонувати використання циклічної процедури пошуку сигналів ДРВП з декількома ступенями виявлення й різним часом аналізу на кожному ступені. Однак ці питання виходять за межі цієї статті і можуть бути розглянуті окремо.

Висновки.

1. Розроблена математична модель одноканального пошуку сигналів засобів мобільного радіозв'язку з одним ступенем виявлення в частотно-часовій області (8) дає можливість

розрахувати ймовірність зустрічі РПП й сигналу за час аналізу N каналів, тобто протягом одного циклу перегляду $T = t_a N$ за умови, що тривалість шуканого сигналу τ_c не менша часу аналізу одного каналу $\tau_c \geq t_a$.

2. Ймовірність успішного завершення пошуку сигналу з одним ступенем виявлення в частотно-часовій області за заданий час залежить від значення тривалості сигналу τ_c , кількості аналізованих частотних каналів N , часу аналізу сигналу в кожному каналі t_a та ймовірностей похибок першого F і другого роду D .

3. Застосування математичної моделі одноканального пошуку сигналів засобів мобільного радіозв'язку з одним ступенем виявлення в частотно-часовій області на практиці дасть можливість підвищити ефективність оцінювання спектральних складових радіосигналів за показниками швидкодії, точності визначення та імовірності розпізнавання засобів мобільного радіозв'язку (див. рис. 3) з подальшим визначенням їхнього інформаційного наповнення.

4. Достовірність результатів досліджень, що наведені у статті, забезпечується несуперечністю отриманих науково-практичних результатів загальновідомим фізичним та математичним положенням теорії цієї предметної області науки і техніки та добрим погодженням із результатами, що наведені в відомих літературних джерелах [7–10].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ільченко М. Ю., Кравчук С. О. Телекомунікаційні системи: монографія. Київ, 2017. С. 730.
2. Ільницький А. І., Захарчук Л. В. Проблемні питання радіомоніторингу джерел і об'єктів телекомунікаційних мереж і систем та загально-науковий концептуальний підхід до їх розв'язання. *Системи і технології зв'язку, інформації та кібербезпеки: актуальні питання і тенденції розвитку*: матеріали III Міжнародної наук.-техн. конф., м. Київ, 30 листопада 2023 р. Київ, ВІТІ, 2023. С. 167. URL: <https://drive.google.com/file/d/1nTFvkmqQSrIvdQgFvzSDyz1aStDjPQOC/view> (дата звернення: 03.02.2024).
3. Слободянюк П. В., Благодарний В. Г., Ступак В. С. Довідник з радіомоніторингу: посібник. Ніжин, 2008. С. 341. URL: https://duikt.edu.ua/uploads/1_730_62703296.pdf (дата звернення: 15.01.2024).
4. Ільницький А. І., Стретович О. В. Алгоритми декодування тональних сигналів у комплексах розвідки систем рухомого радіозв'язку. *Труди академії*. 2005. № 65. С. 70–75.
5. Гнеденко Б. В. Курс теорії ймовірностей: підручник. Київ, 2010. С. 464. URL: <https://probability.knu.ua/userfiles/yamnenko/Gnedenko.pdf> (дата звернення: 28.12.2023).
6. Grimmett G. R., Stirzaker D. R. *Probability and Random Processes*. Oxford University Press Inc., New York. 2001. P. 596. URL: https://www.academia.edu/31210737/Probability_and_random_process_by_geoffrey_grimmett_and_david_stirzaker (дата звернення: 14.02.2024).
7. Ільницький А. І., Ільяшов О. А. Інформативність розвідувальних ознак і сигнатур та міра їх невизначеності при розпізнаванні джерел і об'єктів розвідки. *Збірник наукових праць ЦНДІ ЗСУ*. 2009. № 25. С. 25–40.
8. Ільницький А. І., Бурба О. І., Пасічник О. О. Статистичні характеристики інформаційних ознак джерел випромінювання при радіомоніторингу телекомунікаційних мереж. *УСiМ*. 2016. № 6. С. 48–58. URL: <http://usim.org.ua/arch/2016/6/7.pdf> (дата звернення: 03.04.2024).
9. Ільницький А. І., Бурба О. І. Статистичні оцінки незміщеності та ефективності параметрів джерел радіовипромінювання при радіомоніторингу телекомунікаційних мереж. *Системи управління навігації та зв'язку*. 2018. № 2 (48). С. 149–153. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz_2018_2_31 (дата звернення: 03.04.2024).
10. Стретович О. В., Федірко О. М., Рубальський П. С. Математична модель підсистеми пошуку радіосигналів систем рухомого радіозв'язку. *Збірник наукових праць ЦНДІ ЗСУ*. 2005. № 14. С. 36–43 (дата звернення: 03.04.2024).