

УДК 621.396

Малюженко М. В., к.т.н.; Боровський Г. В.; Казенко С. О.

## ПІДВИЩЕННЯ ЙМОВІРНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛУ НА ФОНІ ШУМІВ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОЇ СТАТИСТИКИ ВХІДНИХ ВИКЛИКІВ

**Maliuzhenko M.V., Borovsriy G.V., Kazenko S.O. Improve the possibility of signals based on noise in conditions of restricted statistics input signals.** In this paper, the techniques of radio which are intended to identify and analyze radio obscure rays to identification sources of signals. Determination accuracy analysis of the radio emission sources (RES) and interference, measurement signals and interference, determining the position of radio sources. Statistical modeling scheme, and also the statistical characteristics analysis of the above-named system is provided. A method for accuracy enhancement of radiation source positioning by the range difference method with the use of passive satellite system, which is intended for radiomonitoring, is considered. An algorithm for cooperative signal processing in two-input antenna system is suggested. The results of mathematical modeling are presented. The purpose of a theoretical study of radio techniques used in various fields of radio control. Task work is to study methods of radio, the effectiveness and accuracy of radio equipment.

**Keywords:** radio emission sources, radio equipment, the method of issue, quasistationary, accuracy

**Малюженко М.В. Боровський Г.В., Казенко С.О. Підвищення ймовірності виявлення сигналу на фоні шумів в умовах обмеженої статистики вхідних відліків.** У статті розглянуто питання щодо точності визначення координат джерел радіовипромінювання системою комплексу пасивного радіомоніторингу з використанням екстремальної постановки різницево-дальномірного методу. Координати джерел радіовипромінювання визначаються шляхом мінімізації квадратичного функціоналу, що дозволяє врахувати інформаційну надмірність системи і тим самим значно підвищити точність визначення координат джерел радіовипромінювання. Також, у статті запропонований підхід щодо статистичного моделювання, а також аналіз статистичних характеристик вищезгаданої системи. Проведено теоретичне дослідження здійснення радіомоніторингу щодо визначення координат в умовах урбанізованого середовища.

**Ключові слова:** джерела радіовипромінювання, радіоелектронні пристрої, квазістаціонарний метод, точність

**Малюженко М.В. Боровський Г.В., Казенко С.О. Повышение вероятности обнаружения сигнала в условиях ограниченной статистики входных отсчетов.** В статье рассматривается вопрос точности определения координат источников радиоизлучения системой комплекса пассивного радиомониторинга с использованием экстремальной постановки разностно-дальномерного метода. Координаты источников радиоизлучения определяются путем минимизации квадратичного функционала, что позволяет учитывать информационную избыточность системы и, тем самым, значительно повысить точность определения координат источников радиоизлучения. Кроме того, в статье предложен подход статистического моделирования и анализ статистических характеристик приведенной системы. Проведено теоретическое исследование осуществления радиомониторинга для определения координат в условиях городской среды.

**Ключевые слова:** источники радиоизлучения, радиоэлектронные устройства, квазістаціонарний метод, точність

### Вступ

Організаційні і технічні питання забезпечення радіомоніторингу на сьогодні визначається цілою низкою різноманітних факторів. Серед них можна виділити дві основні групи - це стрімкий розвиток технічного прогресу в сфері засобів радіозв'язку та суттєві зміни економічного та політичного характеру, в тому числі і лібералізація ринку радіозасобів, Саме останнє суттєво підвищує роль радіомоніторингу в якості інструментарію інформаційної безпеки. Сучасний стан щодо забезпечення моніторингу спектра і технічного радіоконтролю у діапазоні частот до 3 ГГц практично задовольняє потребам структур, що використовують радіочастотний ресурс в межах вказаного діапазону. В той же час

© Малюженко М.В. Боровський Г.В., Казенко С.О., 2018

забезпечення технічного радіоконтролю новітніх радіотехнологій, систем та стандартів зв'язку потребує глибокої спеціалізації засобів, розробки нової методології проведення технічного радіоконтролю параметрів радіовипромінювань. Виявлення сигналу на фоні завад виходить на перший план і завдяки постійній тенденції зменшення рівня корисного сигналу, коли амплітуда сигналу стає співмірною з рівнем шуму (а іноді навіть і меншою). Причому це питання стосується саме систем обробки локаційної інформації, які працюють у пасивному режимі, та системах спектрального аналізу. Виявлення сигналу на фоні шумів в залежності від вихідної ситуації здійснюється за різними алгоритмами. В загальному випадку задачу розглядають за тих умов, що статистичні властивості сигналу і завади практично однакові і єдиною відмінністю є їх енергетична різниця (дисперсія). Цей так звана класична задача виявлення сигналу на фоні шуму. Тому критерієм виявлення тут також виступає класична перевірка двох статистичних гіпотез: нульовою гіпотезою  $H_0$  вважають ситуацію, коли дані стосуються лише шуму. Тобто на вході приймального пристрою сигнал відсутній. В якості ж альтернативної гіпотези  $H_1$  розглядають ситуацію спільної дії сигналу та шуму на вході приймального пристрою. При розв'язанні задачі виявлення (або не виявлення) сигналу приймач розраховує відношення правдоподібності, яке являє собою відношення ймовірності (точніше її щільності) для альтернативної та нульової гіпотез. Дане відношення порівнюється з певним, наперед заданим порогом, при перевищенні якого і приймається рішення про наявність сигналу. Якщо бути більш точним, то тут треба говорити про відхилення нульової гіпотези. Іншими словами ми не приймаємо альтернативну гіпотезу, але відхиляємо нульову. Ця казуїстика у формулюваннях пов'язана з тим, що зазначений підхід не гарантує вірного рішення в кожному окремому випадку, але певним чином оптимізує негативні наслідки невірних рішень при багатократному повторі процедури виявлення сигналу – власне саме що і притаманне процедурі здійснення радіомоніторингу.

### **Викладення основного матеріалу дослідження**

На відміну від ситуації з активною локацією, для пасивних локаційних систем вважається, що сигнал з'являється у випадкові моменти часу і його тривалість також є випадковою. Априорі відомими є лише статистичні властивості завади. Енергетичні спектри сигналу та шуму вважають близькими за формою. Тому модель виявлення сигналу зводиться до встановлення певного енергетичного порогу, що в тій чи іншій мірі перевищує середній рівень завад. Саме ця міра і визначає ймовірності хибного виявлення сигналу та його пропуску тобто так званих помилок першого та другого роду. Тому важливе значення надається спектральному аналізу, який дозволяє отримати додаткову інформацію на користь нульової чи альтернативної гіпотез. В системах спектрального аналізу в якості такої додаткової інформації виступає задача пошуку так званих «звукорядів», тобто вузькосмугових компонентів енергетичного спектру, кратних основній частоті. На практиці «звукоряд» зазвичай виявляється неповним – тобто в ньому суттєво зменшені або взагалі відсутні ті, чи інші спектральні складові сигналу. Разом з тим шумова складова присутня завжди і амплітуда шуму змінюється випадково. Що може призвести до випадкового зростання амплітуди саме на ділянках «звукоряду». Тому доводиться в шумовому середовищі шукати окремі компоненти «звукоряду» з яких потім формують загальну картину. І тут інтерес представляють тільки ті випадки, де спектральні складові перевищують встановлений поріг, а значить доцільно розглядати такі алгоритми виявлення сигналу, які це роблять не витрачаючи (або мінімально витрачаючи) свої ресурси на аналіз шумової складової. Тобто бажано, щоб алгоритм був настільки «інтелектуальним», щоб він, бажано, не розглядав ті шумові компоненти, які, навіть перевищують наперед заданий поріг. Або ж цей поріг треба так постійно змінювати, щоб він намагався виявляти складові сигналу і не дозволяв «просочуватись» складовим завади [1-5].

В якості математичного описання суміші сигналу та шумової завади на вході системи пасивної локації (радіомоніторинг) використовують випадковий процес. В цьому разі задача виявлення сигналу на фоні шуму вирішується на підставі статистичної теорії оптимізації.

Зазвичай, в загальному випадку, розподіл сигналу на вході системи вважають гаусовським з нульовим математичним сподіванням. При цьому це припущення стосується обох випадків: і коли на вході лише сам шум, і коли на вході шумова завада присутня разом з сигналом. Розподіли шуму і суміші сигналу з шумом відрізняються лише енергетично. Тобто в останньому випадку потужність (дисперсія) на вході системи буде дещо більшою. Якщо ми розглядаємо вибірку з  $m$  випадкових величин, яка описується апріорі відомою щільністю розподілу ймовірностей з тим чи іншим числом степенів свободи, то в силу центральної граничної теореми для достатньо великих обсягів вибірки її функція щільності нормалізується. Тобто будь-який розподіл при зростанні обсягів вибірки наближається до гаусовського. Тому частіш за все розподіл сигналу на вході системи виявлення вважають саме гаусовським з нульовим математичним сподіванням (як у випадку одного тільки шуму, так і у випадку адитивної суми сигналу та шуму). Розподіли сигналу і шуму відрізняються лише своєю дисперсією (потужністю). Поширеним випадком є ситуація, коли в якості статистики спостереження обирають енергію сигналу, яку оцінюють на певному інтервалі (так званий енергетичний критерій виявлення)

$$X = \sum_{n=1}^{\infty} S^2 * (i\Delta t) \quad (1)$$

де  $\Delta t = 1/2\Delta F$ ;  $\Delta t$  – інтервал дискретизації по часу;  $\Delta F$  – смуга пропускання вхідного фільтру системи.

Закон розподілу енергії сигналу, що приймається, повністю описується щільністю ймовірності  $f(x)$  випадкової величини  $X_i$  дозволяє встановити ймовірнісні характеристики виявлення, а саме: ймовірності правильного виявлення та ймовірності хибної тривоги:

$$P_{fd} = \int_h^{\infty} f_m(x) dx \quad (2)$$

А також ймовірність пропуску сигналу та ймовірність правильного рішення щодо відсутності сигналу на вході приймального засобу:

$$P_{det} = \int_h^{\infty} f_f(x) dx \quad (3)$$

де:  $h$  – поріг виявлення;  $f_m(x)$  - щільність ймовірності випадкової величини  $X$  при гіпотезі  $H_0$  (ситуація, коли сигнал відсутній і в наявності лише шумова завада);  $f_f(x)$  - щільність ймовірності випадкової величини  $X$  при гіпотезі  $H_1$  (ситуація суміші сигналу та шуму).

Щільність розподілу статистики  $X$  для гаусовського процесу описується щільністю розподілу:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma^2} k_n \left( \frac{x}{\sigma^2} \right) \quad (4)$$

де:  $k_n$  - щільність центрального  $\chi^2$  - розподілу з  $n$  степенями свободи;  $\sigma^2$  - дисперсія.

Аналітичні дослідження статистичних властивостей випадкових статистик достатньо складні і в більшості випадків здійснюються з певним наближенням з використанням символьного програмування в середовищі MATLAB. На рис.1 наведені залежності математичного сподівання та дисперсії сигналу на вході в залежності від встановленого порогу для статистики, що представлена обсягом вибірки  $m=12$  і числа степенів свободи  $n=8$ . З графіків видно, що обидві функції монотонно спадають при зростанні порогу.

При цьому для значних величин числа степенів свободи та обсягу вибірки використовують наступну формули апроксимації:

$$P(x) = \frac{j}{m+1} \quad (5)$$

де:  $1 \leq j \leq m$

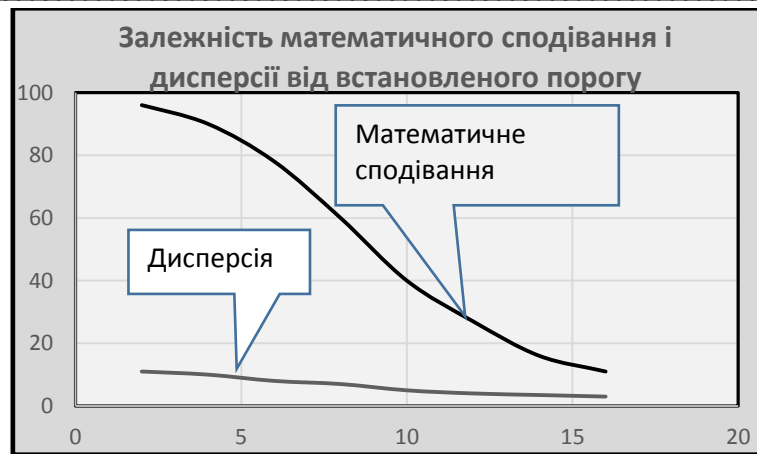


Рис. 1. Залежності математичного сподівання та дисперсії сигналу на вході в залежності від встановленого порогу для статистики

Математичне сподівання вибірки приблизно дорівнює квантилю функції розподілу (якщо відліки взяті з рівномірним кроком). Причому для малої вибірки, а в задачах виявлення сигналу малою можна вважати статистику до 12 відліків, можна обчислити точні значення середньоквадратичного відхилення і дисперсії. Умови порівняння статистик для гіпотез  $H_0$  і  $H_1$  в даній статті розглядаються за умови гаусовського розподілу цих статистик рівності ймовірностей похибки першого роду (хибна тривога) і другого роду (пропуск сигналу). Тобто розглядається ситуація, коли ситуації пропуску сигналу і хибного виявлення сигналу мають рівну ймовірність. Зрозуміло, що за цих умов рівень порогу буде задовольняти умові:

$$h = \frac{\mu_0\sigma_1 + \mu_1\sigma_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (7)$$

Тотожність ймовірностей пропуску сигналу і хибної тривоги є лише окремим випадком, хоч і достатньо поширеним. Ситуація, коли треба приділяти більше уваги одній із помилок (першого або другого роду) в даній статті не розглядається. Тому в даному випадку задавшись наперед певною величиною ймовірності пропуску сигналу, одночасно отримуємо і ймовірність хибного виявлення сигналу.

На рис. 2 наведені залежності математичного сподівання і середньоквадратичного відхилення для гіпотез  $H_0$  і  $H_1$  при тих же значеннях статистичних параметрів ( $m=12$ ;  $N=8$ ).

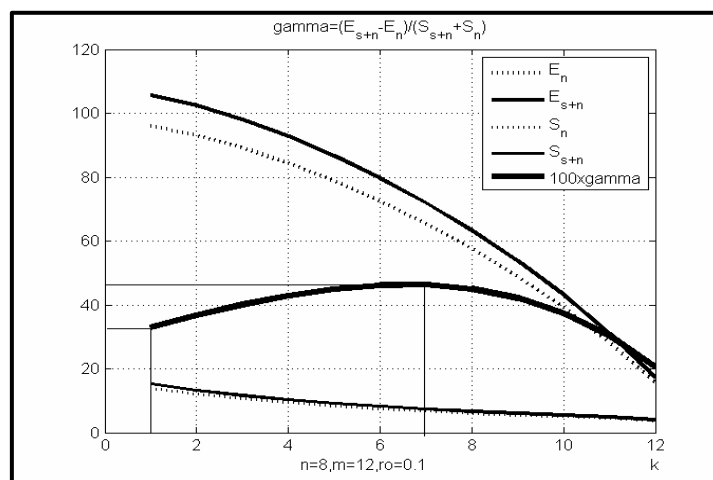


Рис. 2. Залежності математичного сподівання і середньоквадратичного відхилення

Існує, в певному розумінні, оптимальне значення порогу, що забезпечує оптимальну роздільність статистик між собою, оскільки на графіку можна спостерігати певний максимум (рис.2). Це дозволяє процес прийняття рішення про наявність або відсутність сигналу на фоні завади розділити мінімум на два кроки:

- на першому етапі на підставі випадкової вибірки вибудовується порядкова статистика для якої задається перший поріг відсічення;

- на другому кроці прийняття рішення відбувається так само, як і для «класичного» алгоритму – тобто за наперед заданим рівнем пропуску сигналу (тобто встановлюється ймовірність помилки другого роду) виставляється вже другий поріг виявлення сигналу. І вже у випадку перевищення цього другого порогу, приймається рішення, що на вході системи пасивної локації присутній сигнал.

Тобто на відміну від «класичного» підходу, де для прийняття рішення використовується лише одна вибірка ( у вигляді вектору), то в запропонованому підході рішення приймається на підставі певної матриці, де цей поточний вектор виступає в якості одного з її стовпчиків. Для реалізації запропонованого підходу, необхідно попереднє накопичення вибірок, що призводить до певної часової затримки. В багатьох випадках при здійсненні радіомоніторингу така затримка не є суттєвою.

Для оцінки того, як впливає затримка в прийнятті рішення на  $j$  кроків на ймовірність виявлення сигналу достатньо зробити порівняння цих ймовірностей.

Для  $j$  незалежних випробувань ймовірність того, що після їх здійснення відбудеться хоч би одне виявлення сигналу (сумарна ймовірність виявлення) буде дорівнювати наступній величині:

$$P_{\Sigma} = 1 - \prod_{i=1}^j (1 - P_1) \quad (8)$$

де  $P_1$  - ймовірність виявлення сигналу в одиничному випробуванні.

При «двопороговому» виявленні сигналу, по мірі заповнення матриці ймовірність виявлення в кожному наступному одиничному випробуванні буде зростати, прагнучі к кінці-кінців досягти свого теоретично можливого рівня. Результати моделювання для тих же вихідних даних (обсяг вибірки  $m=12$  і число степенів свободи  $n=8$ ) наведено на рис. 3.

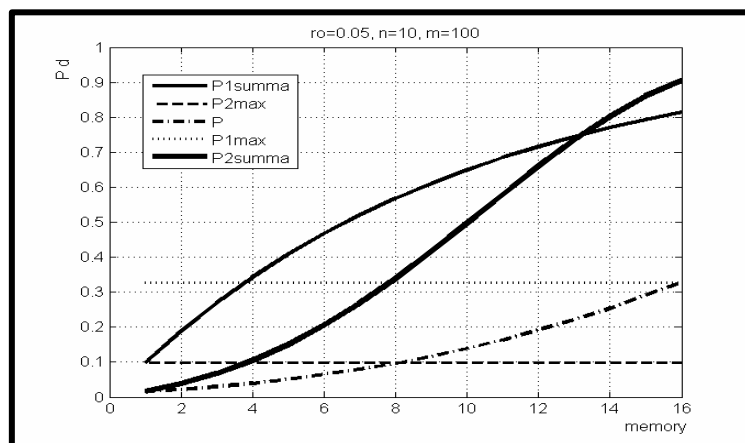


Рис. 3. Результати моделювання для тих же вихідних даних

З наведених графіків видно, що при «однопороговому» алгоритмі сумарна ймовірність виявлення сигналу експоненціально зростає по мірі заповнення пам'яті матриці. Для «двопорогового» виявлення спочатку спостерігається певний програш (особливо відчутний на самому початку, де різниця може досягати 20%). Але потім із-за більш швидкого зростання (вже після 12 відліку) ймовірність виявлення сигналу на фоні шуму для «двопорогового» алгоритму перевищує цей же параметр для класичного однопорогового

підходу. Цей виграш, а в нашому випадку він сягає 10 і більше відсотків) досягається за рахунок введення додаткового порогу, що попередньо відсікає малі значення вхідного сигналу на вході системи і, таким чином, не витрачається пошуковий ресурс на шумову складові. А, крім того, цей підхід використовує інформацію, що міститься в попередніх вибірках прийнятого сигналу, яка при класичному підході не використовується. Попереднє накопичення інформації підвищує достовірність при прийнятті рішення щодо наявності чи відсутності сигналу на вході приймального пристрою.

### **Висновки**

Підсумовуючи вищенаведене слід зазначити, що для успішного вирішення задачі виявлення сигналу на фоні завад, в першу чергу треба відштовхуватись від приймального пристрою, його технічних характеристик, Саме достатня функціональність та продуктивність приймального пристрою дозволяє отримувати «якісні» первинні вибірки на вході, що в подальшому розширює можливості використання тих, чи інших алгоритмів обробки сигналу з тим, щоб забезпечити максимальну достовірність результатів при здійсненні задач радіомоніторингу в реальних умовах на фоні складної електромагнітної обстановки.

### **Список використаної літератури**

1. Кузнецов Ю.В. Спектральный и временной анализ импульсных и периодических сигналов: Учеб. пособие / Кузнецов Ю.В. - М.: Изд-во МАИ, 2007. – 95 с.
2. Рембовский А. М. Повышение эффективности поисковых средств автоматизированного радиомониторинга / I Специальная техника, № 4, 2003. 5. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Сергиенко А.Р., Носимые средства автоматизированного радиомониторинга. - Специальная техника № 4, М. 2004 г.
3. Поздняков Е.К. Алгоритм расчета координат цели на основе измерения периода вращения РЛС / Поздняков Е.К., Пантеев Р.Л., Коротков В.В., Ткаченко В.Н. // Материалы 16-го международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Харьков, 2012. – Т. 3. - С. 134- 135.
4. Огороднийчук Н.Д. Использование метода наименьших квадратов для оценки положения объекта с траекторией произвольной формы / Огороднийчук Н.Д., Паслен В.В. // Радиоэлектронное оборудование летательных аппаратов. Вып. 3. – К.: КВВАИУ, 1989. – 118 с.
5. Останин С. А. Спектрально-корреляционный анализ радиосигналов ионосферных источников [Электронный ресурс] / С. А. Останин, Ю. А. Земский // Журнал Радиоэлектроники, 2012 - №6. – URL: <http://jre.cplire.ru/mac/jun12/10/text.html>

### ***Автори статті***

**Малюженко Михайло Вікторович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри телекомунікаційних технологій Державного університету телекомунікацій, Київ, Україна.

**Боровський Геннадій Володимирович** – студент Державного університету телекомунікацій, Київ, Україна.

**Казенко Сергій Олексійович** – студент Державного університету телекомунікацій, Київ, Україна.

### ***Authors of the article***

**Maliuzhenko Michailo Viktorovich** - candidate of Science (technic), associate professor of Department of telecommunications technologies, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

**Borovskiy Gennadiy Volodimiribich** – student, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

**Kazenko Sergiy Oleksiyovich** - student, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Дата надходження в редакцію: 22.10.2018 р.

Рецензент: д.т.н., с.н.с. Ю.В. Мельник