

ПЕПА Юрій

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

<https://orcid.org/0000-0003-2073-1364>

yurka14@gmail.com

ДАНИЛОВ Ігор

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

<https://orcid.org/0009-0000-1426-6414>

danylovihor@gmail.com

МЕТОД ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ НЕСАНКЦІОНОВАНОГО ОТРИМАННЯ ІНФОРМАЦІЇ В УМОВАХ НАВМИСНИХ ЗАВАД

У роботі розроблено метод оцінки ефективності виявлення радіосигналів технічних засобів несанкціонованого отримання інформації в умовах навмисного впливу змішаних завад. Показано, що застосування лише класичних показників, таких як ймовірність правильного виявлення та ймовірність хибної тривоги, є недостатнім для повної оцінки функціонування систем радіомоніторингу в умовах нестационарних, негаусівських та адаптивних завадових впливів.

Запропоновано систему показників ефективності, яка охоплює класичні, інформаційні та реалізаційні характеристики процесу виявлення. До класичних показників віднесено ймовірність правильного виявлення та ймовірність хибної тривоги; до інформаційних – оцінку відстані Кульбака-Лейблера та коефіцієнт інформаційної розрізнюваності; до реалізаційних – час прийняття рішення та обчислювальну складність. Сформовано інтегральний критерій ефективності методу, який дозволяє здійснювати порівняльне оцінювання різних підходів до виявлення радіосигналів технічних засобів несанкціонованого отримання інформації.

Розроблено математичне представлення процесу оцінювання ефективності виявлення радіосигналів в умовах дії адитивних, мультиплікативних та імпульсних завад та обґрунтовано доцільність використання інформаційного критерію Кульбака-Лейблера, як узагальненого показника розрізнюваності статистичних гіпотез, щодо наявності або відсутності небезпечного радіосигналу. Проведено порівняльний аналіз запропонованого підходу з енергетичним детектором, CFAR-процедурою та методом 2D-LH.

Ключові слова: технічні засоби несанкціонованого отримання інформації, радіосигнали, навмисні завади, оцінка ефективності, ймовірність виявлення, завадостійкість, радіомоніторинг, технічний захист інформації.

PEPA Yuriy, DANYLOV Ihor

State University of Information and Communication Technologies

METHOD FOR EVALUATING THE EFFICIENCY OF RADIO SIGNAL DETECTION OF TECHNICAL MEANS OF UNAUTHORIZED INFORMATION ACQUISITION UNDER CONDITIONS OF DELIBERATE INTERFERENCE

The paper develops a method for evaluating the efficiency of detecting radio signals emitted by technical means of unauthorized information acquisition under the influence of deliberate mixed interference. It is shown that the use of only classical indicators, such as the probability of correct detection and the probability of false alarm, is insufficient for a complete assessment of radio monitoring systems under non-stationary, non-Gaussian, and adaptive interference conditions.

A system of efficiency indicators is proposed, including classical, informational, and implementation characteristics of the detection process. The classical indicators include the probability of correct detection and the probability of false alarm; the informational indicators include the Kullback-Leibler distance estimate and the information distinguishability coefficient; and the implementation indicators include decision-making time and computational complexity.

A mathematical model of the process for evaluating the effectiveness of radio signal detection in the presence of additive, multiplicative, and impulse noise has been developed, and the feasibility of using the Kulbak-Leibler information criterion as a generalized measure of the distinguishability of statistical hypotheses regarding the presence or absence of a dangerous radio signal has been demonstrated. A comparative analysis of the proposed approach with an energy detector, the CFAR procedure, and the 2D-LH method has been conducted.

Keywords: technical means of unauthorized information acquisition, radio signals, deliberate interference, efficiency evaluation, detection probability, interference resistance, radio monitoring, technical information protection.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.06.2026

Прийнята до друку / Accepted 15.08.2026

Опубліковано / Published 10.09.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© ПЕПА Юрій, ДАНИЛОВ Ігор

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Сучасні системи технічного захисту інформації (ТЗІ) функціонують в умовах ускладнення радіоелектронної обстановки, зростання кількості малопотужних та прихованих джерел випромінювання, а також активного застосування навмисних завад [1]. Особливу небезпеку становлять технічні засоби

несанкціонованого отримання інформації (ТЗНОІ), які можуть використовувати радіоканал для передавання перехопленої інформації та маскувати власне випромінювання під легітимні сигнали або фоновий шум.

Традиційні засоби радіомоніторингу переважно орієнтовані на виявлення сигналів у відносно стабільних умовах, коли статистичні характеристики шуму є відомими або близькими до гаусівських [2]. Однак у реальних умовах навмисний завадовий вплив може мати нестаціонарний, імпульсний, мультиплікативний або негаусівський характер. У таких умовах класичні енергетичні, спектральні та кореляційні підходи можуть демонструвати суттєве зниження достовірності виявлення, збільшення кількості хибних тривог та зростання ймовірності пропуску небезпечного радіосигналу.

Окремою проблемою є оцінювання ефективності методів виявлення. У більшості випадків якість детектора оцінюється за допомогою двох класичних характеристик: ймовірності правильного виявлення та ймовірності хибної тривоги [3]. Проте такий підхід не дозволяє повною мірою врахувати інформаційну розрізнюваність сигналу і завади [4], стійкість методу до зміни розподілу завад, час прийняття рішення та обчислювальну складність алгоритму.

Таким чином, актуальним є завдання розроблення методу оцінювання ефективності виявлення радіосигналів ТЗНОІ в умовах навмисного впливу змішаних завад. Такий метод має забезпечувати кількісне порівняння різних алгоритмів виявлення, обґрунтування вибору параметрів системи радіомоніторингу та визначення придатності методу до застосування в реальних програмно-технічних комплексах ТЗІ.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Проблематика виявлення радіосигналів у складній завадовій обстановці є актуальним напрямом сучасних досліджень у сфері радіомоніторингу, цифрової обробки сигналів та технічного захисту інформації. У роботі [5] розглянуто підхід до адаптивного радіовиявлення в умовах наявності декількох альтернативних гіпотез із використанням інформаційного критерію Кульбака–Лейблера. Такий підхід є важливим для задач виявлення слабких радіосигналів в умовах апіорної невизначеності щодо параметрів завадового середовища.

Фундаментальні положення щодо використання інформаційної міри Кульбака–Лейблера для оцінювання відмінності між статистичними розподілами подано у праці [4]. Саме ця міра є теоретичною основою для кількісного оцінювання розрізнюваності гіпотез про наявність або відсутність небезпечного радіосигналу. У роботі [6] досліджено виявлення сигналів у корельованому негаусівському шумі з використанням статистик вищих порядків, що підтверджує актуальність переходу від класичних енергетичних методів до більш стійких статистичних підходів.

У працях [7–9] розглянуто питання енергетичного виявлення сигналів, впливу невизначеності шуму та використання двопорогових методів спектрального аналізу. Зазначені підходи мають відносну простоту реалізації, однак їх ефективність суттєво залежить від точності оцінювання рівня шуму та знижується при малих значеннях SNR. У роботах [10–12] досліджено адаптивні методи виявлення, зокрема CFAR-процедури та підходи, що використовують дивергенцію Кульбака–Лейблера для порівняння статистичних характеристик сигналу і фону.

Питання виявлення сигналів засобів негласного отримання інформації та розпізнавання радіосигналів у системах технічного захисту інформації розглянуто у працях [1], [12–14]. Зокрема, у роботі [12] досліджено моделювання процесів виявлення технічних засобів несанкціонованого отримання інформації в умовах навмисного впливу завад із використанням відстані Кульбака–Лейблера, а у [14] подано методики розрахунків параметрів виявлення сигналів джерел радіовипромінювання.

Таким чином, аналіз літературних джерел показує, що існуючі дослідження достатньо повно охоплюють питання статистичного виявлення сигналів, енергетичного детектування, CFAR-процедур та використання інформаційних критеріїв. Водночас недостатньо розробленим залишається питання комплексного оцінювання ефективності методів виявлення радіосигналів ТЗНОІ з одночасним урахуванням ймовірності правильного виявлення, ймовірності хибної тривоги, інформаційної розрізнюваності, часу прийняття рішення та обчислювальної складності.

Разом із тим, аналіз сучасних досліджень показує, що більшість існуючих підходів зосереджена або на побудові самого алгоритму виявлення, або на оцінюванні його точності за допомогою обмеженого набору показників. Недостатньо розробленим залишається питання комплексної оцінки ефективності методу виявлення з одночасним урахуванням класичних характеристик детектування, інформаційної розрізнюваності сигналу і завади, завадостійкості та реалізаційної складності алгоритму. Це визначає доцільність розроблення методу оцінки ефективності виявлення радіосигналів ТЗНОІ в умовах навмисного впливу змішаних завад.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є розроблення методу оцінки ефективності виявлення радіосигналів ТЗНОІ в умовах навмисного впливу змішаних завад на основі системи класичних, інформаційних та реалізаційних показників.

Для досягнення мети необхідно:

1. Провести аналіз обмежень існуючих підходів до оцінювання ефективності методів виявлення радіосигналів;

2. Сформулювати систему кількісних показників ефективності;
3. Обґрунтувати використання інформаційного критерію Кульбака-Лейблера;
4. Побудувати інтегральний критерій ефективності;
5. Провести порівняльне оцінювання з енергетичним детектором (ED), CFAR-процедурою та методом 2D-LH (двовірний вейвлет-розклад для виділення змін сигналів у просторі).

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Розглянемо процес приймання радіосигналу в умовах навмисного впливу змішаних завад [12].
Прийнятий сигнал можна подати у вигляді:

$$x(t) = s(t) + n(t) + j(t) + m(t) \cdot s(t), \quad (1)$$

де $x(t)$ – прийнятий процес; $s(t)$ – корисний радіосигнал ТЗНОІ; $n(t)$ – адитивний шум приймального тракту; $j(t)$ – навмисна завада; $m(t) \cdot s(t)$ – мультиплікативна складова завадового впливу.

Задача виявлення полягає у перевірці двох статистичних гіпотез згідно (1) [5]:

$$H_0 : x(t) = n(t) + j(t); \quad H_1 : x(t) = s(t) + n(t) + j(t) + m(t) \cdot s(t), \quad (2)$$

де гіпотеза H_0 відповідає відсутності небезпечного радіосигналу, а гіпотеза H_1 – його наявності.

Для оцінювання ефективності виявлення необхідно враховувати не лише факт прийняття рішення, але й умови, за яких це рішення формується, а саме: тип завади, рівень співвідношення сигнал/завада (SNR), статистичну розрізнюваність розподілів та обчислювальні витрати.

Класичними показниками якості виявлення сигналів [7] є ймовірність правильного виявлення та ймовірність хибної тривоги, як зазначено у (2):

$$P_{true} = P\{d(x) = H_1 | H_1\}; \quad (3)$$

$$P_{false} = P\{d(x) = H_1 | H_0\}, \quad (4)$$

де $d(x)$ – правило прийняття рішення; P_{true} – ймовірність правильного виявлення; P_{false} – ймовірність хибної тривоги.

Для урахування статистичної розрізнюваності гіпотез H_0 та H_1 , згідно (3) і (4) доцільно використати відстань Кульбака-Лейблера [4]:

$$P_{true}(p_1 \| p_0) = \int p_1(x) \cdot \ln \left[\frac{p_1(x)}{p_0(x)} \right] dx, \quad (5)$$

де $p_1(x)$ – щільність розподілу прийнятого процесу за наявності сигналу; $p_0(x)$ – щільність розподілу прийнятого процесу за відсутності сигналу.

На основі оцінки відстані Кульбака-Лейблера (5) введемо коефіцієнт інформаційної розрізнюваності [3]:

$$\eta_{inf} = 1 - \exp(-\hat{D}_{KL}), \quad (6)$$

де $\hat{D}_{KL}$ – оцінене значення відстані Кульбака-Лейблера, отримане за вибірковими даними.

Для практичного застосування методу необхідно враховувати реалізаційні характеристики. Час прийняття рішення можна оцінити як:

$$T_{dec} = \frac{C_{op}}{R_{proc}}, \quad (7)$$

де C_{op} – кількість елементарних операцій, необхідних для обробки одного фрагмента сигналу; R_{proc} – продуктивність обчислювального пристрою.

Обчислювальна складність алгоритму виявлення, що використовує оцінювання щільностей розподілу та розрахунок інформаційного критерію, може бути подана у вигляді:

$$C = \hat{O}(N \cdot M + N_{ex} + M \cdot \log M), \quad (8)$$

де N – кількість відліків прийнятого сигналу; M – кількість інтервалів дискретизації простору ознак; N_{ex} – кількість реалізацій або експериментальних вибірок, що використовуються для оцінювання статистичних характеристик.

В табл. 1 приведена запропонована система показників (5–8) ефективності виявлення радіосигналів ТЗНОІ, яка дозволяє здійснити ефективне оцінювання якості виявлення радіосигналів ТЗНОІ.

Таблиця 1

Система показників ефективності виявлення радіосигналів ТЗНОІ

Група показників	Позначення	Зміст показника	Бажаний напрям зміни
Класичні	P_{true}	Ймовірність правильного виявлення	Збільшення (↑)
	P_{false}	Ймовірність хибної тривоги	Зменшення (↓)
Інформаційні	$\hat{D}_{KL}$	Оцінка відстані Кульбака-Лейблера	Збільшення (↑)
	η_{inf}	Коефіцієнт інформаційної розрізнюваності	Збільшення (↑)
Реалізаційні	T_{dec}	Час прийняття рішення	Зменшення (↓)
	C	Обчислювальна складність	Зменшення (↓)

Для комплексного порівняння методів виявлення введемо інтегральний критерій ефективності:

$$U(\theta) = \lambda_1 \cdot \psi_1(P_{true}) + \lambda_2 \cdot \psi_2(P_{false}) + \lambda_3 \cdot \psi_3(\hat{D}_{KL}) + \lambda_4 \cdot \psi_4(\eta_{inf}) + \lambda_5 \cdot \psi_5(T_{dec}) + \lambda_6 \cdot \psi_6(C), \quad (9)$$

де θ – вектор параметрів методу; λ_i – вагові коефіцієнти важливості окремих показників; ψ_i – нормовані функції часткових втрат або корисності.

Інтегральний показник ефективності методу можна визначити у нормованому вигляді, використовуючи (9):

$$\eta_{method} = \frac{1}{1 + U(\theta)},$$

$$\text{де } \eta_{method} \in [0, 1].$$

Чим більше значення η_{method} , тим вищою є узагальнена ефективність методу виявлення. Такий підхід дозволяє порівнювати методи, які мають різну математичну природу, різні вимоги до обчислювальних ресурсів і різну стійкість до завадового впливу.

На рис. 1 приведена узагальнена структурна схема оцінювання ефективності виявлення небезпечних радіосигналів ТЗНОІ.

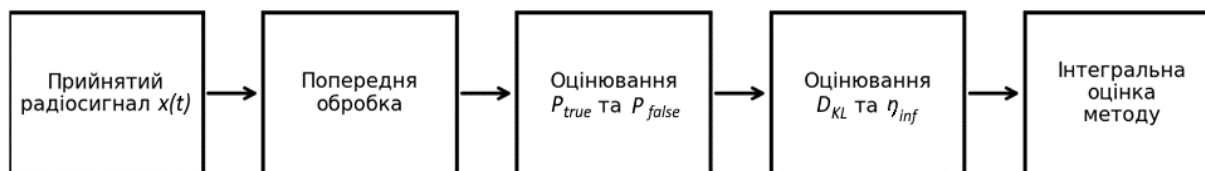


Рис. 1. Узагальнена структурна схема комплексного оцінювання ефективності виявлення радіосигналів ТЗНОІ

На першому етапі формується прийнятий процес, який містить корисний сигнал, шумову складову та навмисну заваду. На другому етапі здійснюється попередня обробка сигналу та виділення ознак. На третьому етапі розраховуються класичні показники виявлення. На четвертому етапі визначаються інформаційні характеристики, зокрема відстань Кульбака-Лейблера. На п'ятому етапі оцінюються реалізаційні характеристики. Завершальним етапом є формування інтегрального показника ефективності.

Для оцінювання запропонованого підходу доцільно розглядати декілька типових завадових сценаріїв: гаусівську адитивну заваду та мультиплікативну α -стійку негаусівську заваду. Саме останній тип завад є найбільш показовим для перевірки робастності, оскільки він характеризується важкими «хвостами» розподілу та різними викидами у прийнятому процесі.

В табл. 2 наведені значення за результатами імітаційного моделювання запропонованого методу на основі відстані Кульбака-Лейблера (D_{KL}) у порівнянні з іншими методами [12] в межах оцінювання ефективності виявлення ТЗНОІ. Зауважимо, що для 2D-LH при α -стійких завадах показник не розраховується через потребу в апіорному знанні параметрів розподілу завади.

Таблиця 2

Порівняльні показники методів виявлення при різних типах завад

Метод	P_{true} , гаусівські завади	P_{true} , α -стійкі завади	P_{false}	T_{dec} , мкс	η_{method}
D_KL	0,912	0,830	0,051	84,0	1,000
ED	0,723	0,260	0,051	0,1	0,142
CFAR	0,552	0,166	0,050	5,0	0,027
2D-LH	0,940	–	0,050	16000	–

Задаємо не одне порогове значення, а **систему порогових значень за всіма 6 критеріями (табл. 1)**. Вагові коефіцієнти для запропонованої методики оцінки ефективності краще задати наступні:

$$\begin{cases} P_{true} = 0,85 \dots 0,99; \\ P_{true} = 0,01 \dots 0,10; \\ \hat{D}_{KL} = 0,1 \dots 2,0 \text{ нат}; \\ \eta_{inf} = 0,75 \dots 0,98; \\ T_{dec} = 10^{-5} \dots 10^{-3} \text{ сек}; \\ C = 10^3 \dots 10^6 \text{ операцій}. \end{cases}$$

На рис. 2 наведені результати імітаційного моделювання ймовірності правильного виявлення небезпечного сигналу при різних значеннях SNR для різних методів.

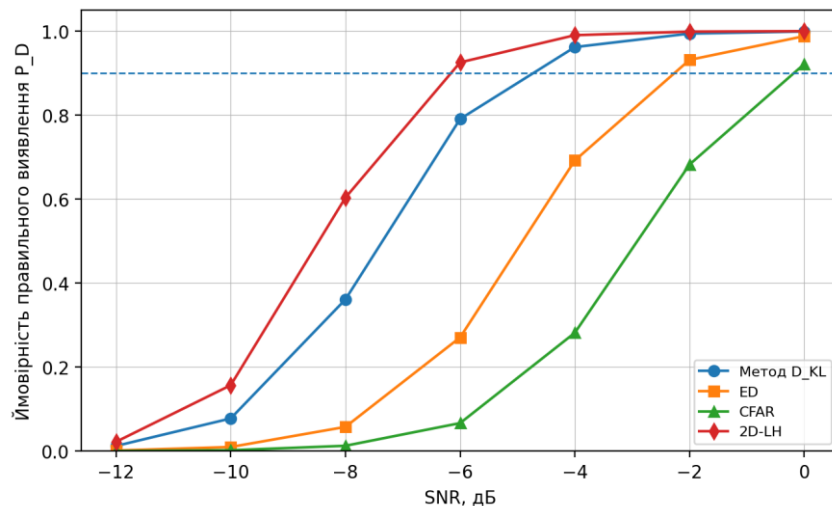


Рис. 2. Залежність ймовірності правильного виявлення від SNR для різних методів

Аналіз отриманих результатів (рис. 2) показує, що при гаусівських стаціонарних завадах метод D_KL перевершує енергетичний детектор (ED-метод) на 2,5 дБ та перевершує CFAR-процедуру на 4,5 дБ за SNR-еквівалентом для $P_{true} = 0,9$. Проте, метод 2D-LH може демонструвати вищу точність ніж запропонований за умови наявності апріорної інформації про форму сигналу, однак має значно більшу обчислювальну складність та гіршу придатність до умов апріорної невизначеності.

Проведемо порівняння стійкості запропонованого методу виявлення небезпечного сигналу ТЗНОІ, а саме метода Кульба-Лейблера при дії гаусівських та α -стійких завад (рис. 3).

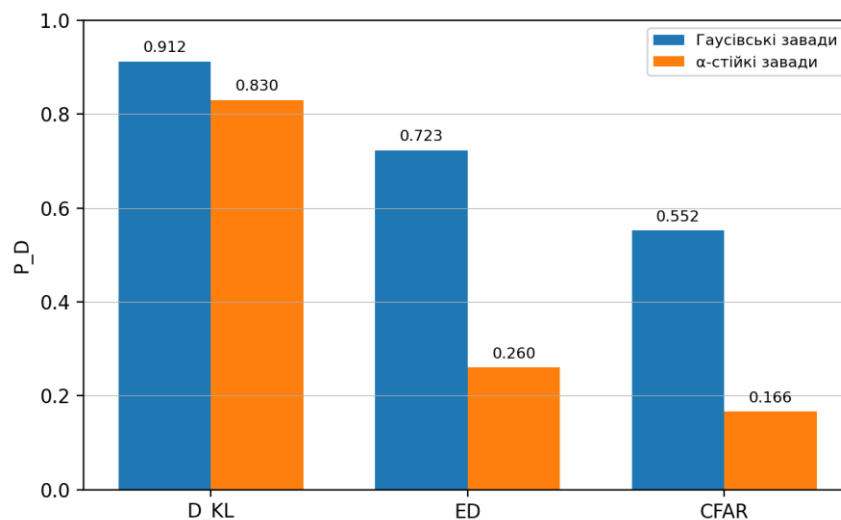


Рис. 3. Порівняння стійкості методів виявлення при гаусівських та α -стійких завадах

Як видно з рис. 3, при α -стійких завадах метод D_{KL} деградує лише на 9 % ($P_{true} : 0,912 \rightarrow 0,830$), тоді як енергетичний детектор деградує на 64 % ($P_{true} : 0,723 \rightarrow 0,260$), а CFAR-процедура – на 69,9 % ($P_{true} : 0,552 \rightarrow 0,166$). Це підтверджує доцільність включення інформаційних показників до системи оцінювання ефективності.

Таким чином, запропонований метод оцінки ефективності дозволяє перейти від часткового аналізу якості виявлення небезпечних сигналів до комплексної багатокритеріальної оцінки. Його перевага полягає в тому, що він поєднує ймовірнісні, інформаційні та реалізаційні характеристики, що є необхідним для практичних задач ТЗІ в умовах навмисного завадового впливу.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У роботі розроблено метод оцінки ефективності виявлення радіосигналів ТЗНОІ в умовах навмисного впливу змішаних завад. На відміну від традиційних підходів, які переважно ґрунтуються на використанні ймовірності правильного виявлення та ймовірності хибної тривоги, запропонований метод використовує систему класичних, інформаційних та реалізаційних показників, що надає йому перевагу.

Сформовано систему з шести показників ефективності: P_{true} , P_{false} , $\hat{D}_{KL}$, η_{inf} , T_{dec} та C . Така система дозволяє комплексно оцінювати якість функціонування методу виявлення, його стійкість до зміни статистичних характеристик завад, інформаційну розрізняюваність сигналу і фону, а також придатність до реалізації в програмно-технічних комплексах радіомоніторингу.

Обґрунтовано використання відстані Кульбака-Лейблера як інформаційного критерію для кількісного оцінювання розрізняюваності статистичних гіпотез щодо наявності або відсутності небезпечного радіосигналу. Показано, що цей критерій є особливо доцільним в умовах апіорної невизначеності щодо типу завад, коли класичні енергетичні та порогові методи виявлення втрачають ефективність.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості використання запропонованого методу для оцінювання, порівняння та оптимізації алгоритмів виявлення радіосигналів ТЗНОІ у системах ТЗІ, програмно-технічних комплексах радіомоніторингу та засобах контролю радіоелектронної обстановки.

Метод виявлення небезпечних сигналів ТЗНОІ є ефективним за умови одночасного виконання системою порогових обмежень: $P_{true} \geq 0,9$; $P_{false} \leq 0,05$; $\hat{D}_{KL} \geq 0,3$ нат; $\eta_{inf} \geq 0,8$; $T_{dec} \leq 10^{-3}$ сек, а $C \leq 10^5$ операцій. Такі значення забезпечують компроміс між достовірністю виявлення, допустимим рівнем хибних спрацювань, інформаційною розрізняюваністю сигналу і завади, швидкістю та реалізаційною складністю запропонованого методу.

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні методу оцінювання ефективності для багатоканальних і просторово-розподілених систем радіомоніторингу, дослідженні впливу адаптивних навмисних завад на інформаційні показники виявлення, удосконаленні алгоритмів оцінювання щільностей розподілу в умовах малих вибірок та інтеграції запропонованого методу в автоматизовані комплекси ТЗІ.

Література

1. Шуклін Г.В., Пепа Ю.В., Науменко А.В., Лазебний В.А. (2021) Визначення закону розподілу ймовірності успішного несанкціонованого доступу до конфіденційної інформації в системі захисту інформації при наявності параметричної невизначеності. Наукові записки ДУТ. № 1(1). 19–26. <https://doi.org/10.31673/2518-7678.2021.011926>
2. Лаптев О., Лаптева Т., Браїловський М. (2025) Методики розрахунків параметрів виявлення сигналів засобів негласного отримання інформації (джерел радіовипромінювання). Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка». № 4(28). 575–585. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.28.812>
3. Zhou R., Gueaieb W., Spinello D. (2023) A Model-Free Kullback-Leibler Divergence Filter for Anomaly Detection in Noisy Data Series. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. Vol. 145. No. 2. Article 024501. <https://doi.org/10.1115/1.4056105>
4. Kullback S., Leibler R.A. (1951) On Information and Sufficiency. The Annals of Mathematical Statistics. Vol. 22. No. 1. 79–86. <https://doi.org/10.1214/aoms/117729694>
5. Addabbo P., Han S., Biondi F., Giunta G., Orlando D. (2021) Adaptive Radar Detection in the Presence of Multiple Alternative Hypotheses Using Kullback–Leibler Information Criterion. Part I: Detector Designs. IEEE Transactions on Signal Processing. Vol. 69. 3730–3741. <https://doi.org/10.1109/TSP.2021.3089440>
6. Palahina E., Gamcova M., Gladisova I., Gamec J., Palahin V. (2018) Signal Detection in Correlated Non-Gaussian Noise Using Higher-Order Statistics. Circuits, Systems, and Signal Processing. Vol. 37. 1704–1723. <https://doi.org/10.1007/s00034-017-0623-5>

7. Lorincz J., Ramljak I., Begusic D. (2022) Analysis of the Impact of Detection Threshold Adjustments and Noise Uncertainty on Energy Detection Performance in MIMO-OFDM Cognitive Radio Systems. *Sensors*. Vol. 22. No. 2. Article 631. <https://doi.org/10.3390/s22020631>
8. Mahendru G., Shukla A., Banerjee P. (2022) A Novel Double Threshold-Based Spectrum Sensing Technique at Low SNR Under Noise Uncertainty for Cognitive Radio Systems. *Wireless Personal Communications*. Vol. 126. 1863–1879. <https://doi.org/10.1007/s11277-022-09825-5>
9. Mahendru G., Shukla A., Banerjee P. (2021) An Optimal and Adaptive Double-Threshold Based Approach to Spectrum Sensing Under Noise Uncertainty. *Wireless Personal Communications*. Vol. 121. 3031–3052. <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03596-w>
10. Arjoune Y., Kaabouch N., El Ghazi H., Tamtaoui A. (2018) Spectrum Sensing: Enhanced Energy Detection Technique Based on Noise Measurement. *IEEE 8th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*. 828–834. <https://arxiv.org/pdf/1803.05118>
11. Lei S., Jakobsson A., Zhao Z. (2017) CFAR Adaptive Matched Detector for Target Detection in Non-Gaussian Noise With Inverse Gamma Texture. *IEEE Signal Processing Letters*. Vol. 24. No. 9. 1356–1360. <https://arxiv.org/pdf/1705.04557>
12. Hua X., Cheng Y., Wang H., Qin Y., Li Y., Zhang W. (2017) Matrix CFAR Detectors Based on Symmetrized Kullback–Leibler and Total Kullback–Leibler Divergences. *Digital Signal Processing*. Vol. 69. 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2017.06.019>
13. Шуклін Г.В., Наконечний В.С., Данилов І.Д., Пепа Ю.В. (2026) Моделювання процесів виявлення технічних засобів несанкціонованого отримання інформації в умовах навмисного впливу завад за допомогою відстані Кульбака-Лейблера. *Сучасний захист інформації*. № 1(65). 142–148. <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2026.011799>
14. Дробик О.В., Лаптев О.А., Пархоменко І.І., Богуславська О.В., Пепа Ю.В., Пономаренко В.В. (2024) Розпізнавання радіосигналів на основі апроксимації спектральної функції у базисі передатних функцій резонансних ланок другого порядку. *Сучасний захист інформації*. № 2(58). 13–23. <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2024.020002>

References

1. Shuklin H.V., Pepa Yu.V., Naumenko A.V., Lazebnyi V.A. (2021) Vyznachennia Zakonu Rozpodilu Ymovirnosti Uspishnoho Nesanktsionovanoho Dostupu do Konfidentsiinoi Informatsii v Systemi Zakhystu Informatsii pry Naiavnosti Parametrychnoi Nevyznachenosti. *Naukovi zapysky DUT*. No. 1(1). 19–26. <https://doi.org/10.31673/2518-7678.2021.011926>
2. Laptiev O., Laptieva T., Brailovskyi M. (2025) Metodyky Rozrakhunkiv Parametriv Vyiavlennia Syhnaliv Zasobiv Nehlasnoho Otrymannia Informatsii (Dzherel Radiovyprominiuвання). *Elektronne fakhove naukove vydannia «Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika»*. No. 4(28). 575–585. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.28.812>
3. Zhou R., Gueaieb W., Spinello D. (2023) A Model-Free Kullback-Leibler Divergence Filter for Anomaly Detection in Noisy Data Series. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. Vol. 145. No. 2. Article 024501. <https://doi.org/10.1115/1.4056105>
4. Kullback S., Leibler R.A. (1951) On Information and Sufficiency. *The Annals of Mathematical Statistics*. Vol. 22. No. 1. 79–86. <https://doi.org/10.1214/aoms/117729694>
5. Addabbo P., Han S., Biondi F., Giunta G., Orlando D. (2021) Adaptive Radar Detection in the Presence of Multiple Alternative Hypotheses Using Kullback–Leibler Information Criterion. Part I: Detector Designs. *IEEE Transactions on Signal Processing*. Vol. 69. 3730–3741. <https://doi.org/10.1109/TSP.2021.3089440>
6. Palahina E., Gamcova M., Gladisova I., Gamec J., Palahin V. (2018) Signal Detection in Correlated Non-Gaussian Noise Using Higher-Order Statistics. *Circuits, Systems, and Signal Processing*. Vol. 37. 1704–1723. <https://doi.org/10.1007/s00034-017-0623-5>
7. Lorincz J., Ramljak I., Begusic D. (2022) Analysis of the Impact of Detection Threshold Adjustments and Noise Uncertainty on Energy Detection Performance in MIMO-OFDM Cognitive Radio Systems. *Sensors*. Vol. 22. No. 2. Article 631. <https://doi.org/10.3390/s22020631>
8. Mahendru G., Shukla A., Banerjee P. (2022) A Novel Double Threshold-Based Spectrum Sensing Technique at Low SNR Under Noise Uncertainty for Cognitive Radio Systems. *Wireless Personal Communications*. Vol. 126. 1863–1879. <https://doi.org/10.1007/s11277-022-09825-5>
9. Mahendru G., Shukla A., Banerjee P. (2021) An Optimal and Adaptive Double-Threshold Based Approach to Spectrum Sensing Under Noise Uncertainty. *Wireless Personal Communications*. Vol. 121. 3031–3052. <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03596-w>
10. Arjoune Y., Kaabouch N., El Ghazi H., Tamtaoui A. (2018) Spectrum Sensing: Enhanced Energy Detection Technique Based on Noise Measurement. *IEEE 8th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*. 828–834. <https://arxiv.org/pdf/1803.05118>
11. Lei S., Jakobsson A., Zhao Z. (2017) CFAR Adaptive Matched Detector for Target Detection in Non-Gaussian Noise With Inverse Gamma Texture. *IEEE Signal Processing Letters*. Vol. 24. No. 9. 1356–1360. <https://arxiv.org/pdf/1705.04557>
12. Hua X., Cheng Y., Wang H., Qin Y., Li Y., Zhang W. (2017) Matrix CFAR Detectors Based on Symmetrized Kullback–Leibler and Total Kullback–Leibler Divergences. *Digital Signal Processing*. Vol. 69. 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2017.06.019>
13. Shuklin H.V., Nakonechnyi V.S., Danylov I.D., Pepa Yu.V. (2026) Modeliuvannia Protseviv Vyiavlennia Tekhnichnykh Zasobiv Nesanktsionovanoho Otrymannia Informatsii v Umovakh Navmysnoho Vplyvu Zavad za Dopomohoiu Vidstani Kulbaka-Leiblera. *Suchasnyi zakhyst informatsii*. No. 1(65). 142–148. <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2026.011799>
14. Drobik O.V., Laptiev O.A., Parkhomenko I.I., Bohuslavska O.V., Pepa Yu.V., Ponomarenko V.V. (2024) Rozpiznavannia Radiosyhnaliv na Osnovi Aproksymatsii Spektralnoi Funktsii u Bazysi Peredatnykh Funktsii Rezonansnykh Lanok Druhooho Poriadku. *Suchasnyi zakhyst informatsii*. No. 2(58). 13–23. <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2024.020002>