

Пепа Юрій Володимирович

канд. техн. наук, доцент, професор кафедри технічних систем кіберзахисту
 Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ, Україна
 ORCID: 0000-0003-2073-1364
 yurka14@gmail.com

Данилов Ігор Дмитрович

аспірант кафедри технічних систем кіберзахисту
 Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ, Україна
 ORCID: 0009-0000-1426-6414
 danylovihor@gmail.com

СИНТЕЗ ПРОСТОРОВОГО МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ АКТИВНИХ ТА НАПІВАКТИВНИХ РАДІОЗАКЛАДНИХ ПРИСТРОЇВ З ПОДАЛЬШОЮ ОБРОБКОЮ ЗАХИЩЕНОГО СИГНАЛУ

Анотація. У статті розглянуто задачу синтезу просторового методу виявлення активних та напівактивних радіозакладних пристроїв із подальшою адаптивною обробкою захищеного сигналу в умовах дії інтенсивних завад та апріорної невизначеності параметрів радіоканалу. Актуальність дослідження обумовлена постійним зростанням кількості спеціальних технічних засобів негласного отримання інформації, які використовують широкопasmові, шумоподібні та малопомітні сигнали, що ускладнює їх виявлення традиційними методами радіомоніторингу та спектрального аналізу. Проведено аналіз сучасних методів просторової селекції сигналів, адаптивного придушення завад та алгоритмів оцінювання напрямку приходу сигналів у системах технічного захисту інформації.

Запропоновано математичну модель двоканальної системи просторової обробки сигналів на основі направленої та ненаправленої антен. Розроблено алгоритм адаптивної компенсації завадового сигналу з використанням затриманих та різницевих спостережень, що дозволяє оцінювати коефіцієнти просторової селекції та зменшувати вплив завадових компонентів на виході приймача. Отримано аналітичні співвідношення для оцінювання коефіцієнтів просторової обробки та виконано представлення алгоритму у векторно-матричній формі. Розроблено структурну схему приймача з адаптивним алгоритмом просторового виявлення та подальшою обробкою захищеного сигналу.

Проведено чисельне моделювання залежності виграшу відношення сигнал/завада від кута приходу завадового сигналу. Результати моделювання підтвердили ефективність запропонованого методу та показали можливість підвищення відношення сигнал/завада до 10 дБ залежно від просторового положення джерела завади. Встановлено, що стійке виявлення радіозакладних пристроїв забезпечується при значеннях сигнал/завада $\geq (3-6)$ дБ. Показано, що запропонований метод характеризується відносно невисокою обчислювальною складністю порівняно з класичними MVDR- та MUSIC-алгоритмами, що створює передумови для його практичного застосування у системах технічного захисту інформації, радіомоніторингу та спеціальних телекомунікаційних системах.

Ключові слова: обробка сигналів, радіозакладні пристрої, адаптивний приймач, компенсація завад, антена, захист інформації, просторове виявлення.

Yuriy Pepa

Ph.D., Associate Professor, Professor in the Department of Technical Systems for Cyber Security
 State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine
 ORCID: 0000-0003-2073-1364
 yurka14@gmail.com

Ihor Danylov

Ph.D. student in the Department of Technical Systems for Cyber Security
 State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine
 ORCID: 0009-0000-1426-6414
 danylovihor@gmail.com

A SYNTHESIS OF A SPATIAL METHOD FOR DETECTING ACTIVE AND SEMI-ACTIVE RADIO-BASED DEVICES FOLLOWED BY PROCESSING OF THE PROTECTED SIGNAL

Abstract. This paper addresses the problem of developing a spatial method for detecting active and semi-active radio-based devices, followed by adaptive processing of the protected signal under conditions of intense interference and a priori uncertainty regarding radio channel parameters. The relevance of this study stems from the constant increase in the number of specialized technical devices for covert information gathering that utilize broadband, noise-like, and low-observable signals, making them difficult to detect using traditional methods of radio monitoring and spectral analysis. An analysis was conducted of modern methods of spatial signal selection, adaptive interference suppression, and algorithms for estimating the direction of signal arrival in technical information protection systems.

A mathematical model of a two-channel spatial signal processing system based on directional and omnidirectional antennas is proposed. An algorithm for adaptive interference compensation using delayed and difference observations has been developed.

which allows for the estimation of spatial selection coefficients and reduces the impact of interference components on the receiver output. Analytical expressions for estimating spatial processing coefficients have been derived, and the algorithm has been presented in vector-matrix form. A block diagram of a receiver with an adaptive spatial detection algorithm and subsequent processing of the protected signal has been developed.

Numerical simulations were performed to investigate the dependence of the signal-to-interference ratio on the angle of incidence of the interference signal. The simulation results confirmed the effectiveness of the proposed method and demonstrated the possibility of increasing the signal-to-interference ratio by up to 10 dB depending on the spatial position of the interference source. It was established that reliable detection of radio eavesdropping devices is ensured at signal-to-interference ratios $\geq (3-6)$ dB. It has been shown that the proposed method has relatively low computational complexity compared to classical MVDR and MUSIC algorithms, which paves the way for its practical application in information security systems, radio monitoring, and specialized telecommunications systems.

Keywords: signal processing, radio frequency devices, adaptive receiver, interference cancellation, antenna, information security, spatial detection.

Постановка проблеми. Сучасні системи технічного захисту інформації функціонують в умовах постійного зростання кількості активних та напівактивних радіозакладних пристроїв, які використовують широкопasmові та шумоподібні сигнали, складні методи модуляції та приховані режими передавання інформації. Це суттєво ускладнює процес їх виявлення традиційними методами радіоконтролю та радіомоніторингу, особливо в умовах низького співвідношення сигнал/завада та наявності інтенсивних широкопasmових завад.

Відомі методи виявлення радіозакладних пристроїв переважно базуються на енергетичному аналізі, часовій селекції або спектральному контролю сигналів. Однак такі підходи мають обмежену ефективність в умовах апріорної невизначеності параметрів сигналів та складної завадової обстановки. Особливо це стосується випадків, коли сигнали закладних пристроїв мають низький енергетичний рівень або маскуються під фонові радіосигнали.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності виявлення є використання методів просторової обробки сигналів, що дозволяють здійснювати селекцію джерел випромінювання за напрямком приходу сигналу та адаптивно компенсувати завадові компоненти. Проте існуючі алгоритми просторової обробки часто характеризуються високою обчислювальною складністю, чутливістю до параметричної невизначеності та недостатньою ефективністю при роботі в умовах низьких значень співвідношення сигнал/завада.

У зв'язку з цим актуальною є задача розробки просторового методу виявлення активних та напівактивних радіозакладних пристроїв із подальшою адаптивною обробкою захищеного сигналу, що забезпечуватиме підвищення ефективності виявлення та стійкість роботи приймального пристрою в умовах дії завад.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях значна увага приділяється методам просторової селекції сигналів, адаптивного придушення завад та цифрової обробки сигналів у системах радіомоніторингу і технічного захисту інформації.

Значний внесок у розвиток методів просторової обробки сигналів зроблено у роботах, присвячених адаптивному формуванню діаграм спрямованості антенних систем, цифровій фільтрації та оцінюванню параметрів сигналів в умовах апріорної невизначеності. Окремі дослідження спрямовані на застосування кореляційних та статистичних методів виявлення слабких сигналів у шумовому середовищі.

У роботі [1] розглянуто основні принципи побудови систем радіомоніторингу електромагнітних випромінювань, їх функціональні можливості та алгоритмічні підходи до виявлення радіовипромінювань на об'єктах інформаційної діяльності. Особливу увагу приділено виявленню випромінювань радіозакладних пристроїв та пеленгуванню джерел сигналів, що є безпосередньо пов'язаним із задачею технічного захисту інформації, але не достатньо описані методи виявлення сигналів від радіозакладок.

В [2] автором запропонована процедура виявлення і розпізнавання несанкціонованого радіовипромінювання із застосуванням мобільних систем радіомоніторингу з апріорно визначеною просторово-часовою конфігурацією рухомих радіоприймачів. На відміну від класичних підходів, така процедура орієнтована на роботу в умовах нерегулярного використання радіочастотного ресурсу та використовує небайєсовські правила прийняття рішень. Це важливо для задач виявлення прихованих джерел випромінювання, коли параметри сигналу заздалегідь не визначені.

Питання адаптивної просторової обробки сигналів описано в [3]. Автори розробили градієнтний алгоритм налаштування адаптивної антенної ґратки, який не потребує наявності опорного сигналу. Налаштування антенної ґратки здійснюється за відомим напрямком приходу корисного сигналу, а придушення небажаних завадових сигналів – шляхом мінімізації дисперсії шуму. Проведене ними імітаційне моделювання підтвердило працездатність та ефективність такого підходу в складній завадовій обстановці. Цими питаннями займалися дослідники в [4], які дослідили використання адаптивних антенних ґраток для підвищення пропускної здатності мереж LTE-A. Було порівняно стандартну антенну систему LTE-A та адаптивну лінійну еквідистантну антенну ґратку, моделювання якої показало її ефективність для різних випадкових розміщень абонентів з корисними та завадовими сигналами.

Автор роботи [5] розглянув новий метод спектрального аналізу для визначення випадкових цифрових сигналів на фоні легальних радіосигналів. Доведено, що методи спектрального оцінювання базуються на певній моделі сигналу та припущеннях щодо його поведінки поза інтервалом спостереження. Такий підхід є важливим для задач виявлення слабких або замаскованих радіосигналів, однак у випадку активних завад і просторової невизначеності потребує доповнення методами просторової обробки.

Робота [6] описує перспективи застосування тепловізійних засобів для оперативного виявлення радіоелектронних пристроїв негласного отримання інформації на об'єктах інформаційної діяльності. Акцентується увага на можливості виявлення таких засобів за тепловими ознаками, що свідчить про актуальність комплексного підходу до пошуку закладних пристроїв із використанням як радіотехнічних, так і нерадіотехнічних каналів контролю.

Проблематика виявлення активних і напівактивних радіозакладних пристроїв безпосередньо пов'язана з розвитком методів радіомоніторингу, просторової селекції сигналів, адаптивного придушення завад та оцінювання напрямку приходу радіовипромінювань. У сучасних умовах особливого значення набувають методи, здатні працювати за низьких значень відношення сигнал/завада, апіорної невизначеності параметрів сигналу та наявності широкомуглових або шумоподібних завад.

Слід відмітити роботи [7-9] з адаптивним формуванням діаграм спрямованості антен. Автори запропонували швидкий алгоритм MVDR формування головної пелюстки діаграми спрямованості антени для компенсації кількох завадових сигналів. Проведена оцінка коваріаційної матриці сигналів та зменшено обчислювальні витрати за рахунок застосування леми обернення матриць. Такий підхід є близьким до задачі просторового придушення завад у приймальних пристроях, однак потребує складніших обчислювальних процедур порівняно з двоканальною моделлю, що розглядається у цій роботі. Продовженням є роботи [10, 11], в яких виконано порівняльний аналіз методів оцінювання напрямку приходу сигналу, зокрема Delay-and-Sum, MVDR, MUSIC, ESPRIT, Unitary-ESPRIT та FT-DoA. Досліджено компроміс між точністю оцінювання та обчислювальною складністю для рівномірних лінійних антенних ґраток. Отримані авторами результати підтверджують, що високоточні методи DOA-оцінювання можуть бути ефективними, але їх застосування у практичних системах виявлення радіозакладних пристроїв обмежується вимогами до обчислювальних ресурсів та стійкості при низькому значенні співвідношення сигнал/завада (SNR).

Таким чином, аналіз сучасних джерел показує, що існуючі дослідження охоплюють широкий спектр задач: радіомоніторинг, виявлення несанкціонованих випромінювань, спектральний аналіз, адаптивні антенні ґратки, MVDR-обробку та оцінювання напрямку приходу сигналу. Водночас недостатньо розробленими залишаються прості за структурою методи просторової обробки, орієнтовані на виявлення активних і напівактивних радіозакладних пристроїв у двоканальній приймальній системі за умов невідомого напрямку приходу завади та низького SNR .

Саме це визначає актуальність синтезу просторового методу виявлення з подальшою адаптивною обробкою захищеного сигналу.

Мета і задачі дослідження. Метою цієї роботи є синтез просторового методу виявлення активних та напівактивних радіозакладних пристроїв з подальшою адаптивною обробкою захищеного сигналу в умовах дії завад та апіорної невизначеності параметрів сигналів.

Основні задачі:

1. Розробити математичну модель двоканального приймального пристрою для просторової обробки сигналів;
2. Синтезувати метод адаптивної просторової компенсації завадового сигналу;
3. Отримати аналітичні співвідношення для оцінювання коефіцієнтів просторової селекції;
4. Розробити структурну схему приймача з адаптивним алгоритмом виявлення та обробки захищеного сигналу;
5. Провести оцінювання ефективності розробленого методу.

Основна частина. Нехай на вхід приймального пристрою рис. 1 з властивостями ґратки M надходять лінійно незалежні функції $a(t)$ і $b(t)$ від корисного сигналу $s(t)$ та завади $x(t)$, які знімаються з двох антен – направленої антени $A1$ та ненаправленої $A2$.

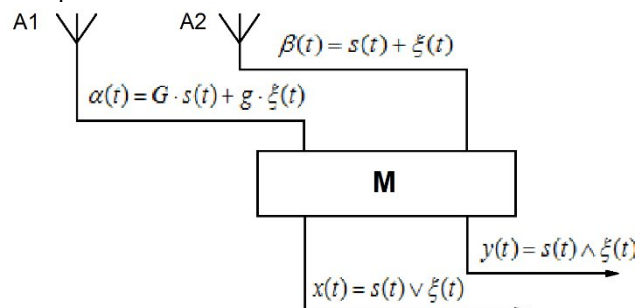


Рис. 1 Антенний пристрій приймача

З двох виходів ґратки M знімаються сигнали:

$$x(t) = s(t) \dot{\cup} x(t);$$

$$y(t) = s(t) \dot{\cup} x(t),$$

які визначаються наступними співвідношеннями:

$$x(t) = s(t) \dot{U}x(t) = \frac{[s(t) + x(t)] + |s(t) - x(t)|}{2}; \quad (1)$$

$$y(t) = s(t) \dot{U}x(t) = \frac{[s(t) + x(t)] - |s(t) - x(t)|}{2}. \quad (2)$$

Корисний сигнал $s(t)$ та $x(t)$ завада надходять з простору на входи антен двох каналів A і B (рис. 2) так, що, по-перше, антени $A1$ і $A2$ мають загальний фазовий центр; по-друге, антени $A1$ і $A2$ характеризуються діаграмами спрямованості по напрямку $F_{A1}(\theta)$, $F_{A2}(\theta)$ відповідно.

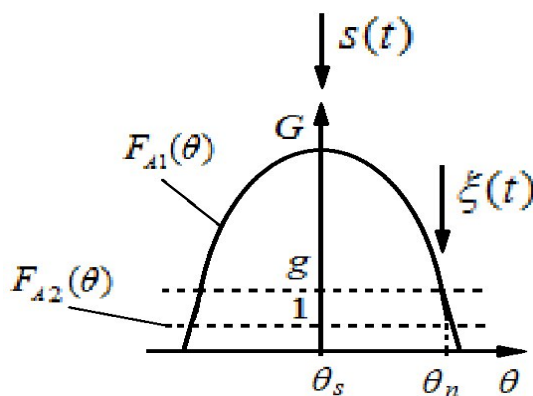


Рис. 2 Напрямки приходу сигналів на основну пелюстку діаграми спрямованості антени

Причому:

$$F_{A1}(\mathbf{q}_s) = G; \quad G > 1; \quad G > g; \quad F_{A1}(\mathbf{q}_n) = g; \quad F_{A2}(\mathbf{q}) = 1,$$

комплексні амплітудно-частотні характеристики $K_{A1}^{\&}(w)$, $K_{A2}^{\&}(w)$ антенно-фідерних систем в каналах A і B ідентичні:

$$K_{A1}^{\&}(w) = K_{A2}^{\&}(w).$$

Таким чином, в обох каналах обробки прийнятої інформації (на вході приймального пристрою) спостерігаються сигнали $a(t)$ і $b(t)$:

$$\begin{cases} a(t) = G \times(t) + g \mathcal{X}(t); \\ b(t) = s(t) + x(t), \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} b(t) = s(t) + x(t), \end{cases} \quad (4)$$

де $G = F_{A1}(\mathbf{q}_s)$ – коефіцієнт підсилення антени $A1$ з напрямку приходу корисного сигналу $s(t)$; $g = F_{A1}(\mathbf{q}_n)$ – коефіцієнт підсилення антени $A2$ в напрямку приходу завади $x(t)$.

Припустимо, що напрямок приходу сигналу \mathbf{q}_s відомий, а напрямок приходу завади \mathbf{q}_n невідомий. Врахуємо також, що завада $x(t)$ являє собою квазібілий гаусовський шум з незалежними відліками $\{n(t_j)\}$ при

$j = 0, 1, 2, \dots$, які розташовані один від одного через часовий інтервал $Dt = |t_j - t_{j \pm 1}| = \frac{1}{2f_{n, \max}}$, де $f_{n, \max}$ – верхня

гранична частота спектральної щільності потужності завади, а корисний сигнал $s(t)$ через інтервал Dt змінюється незначно, тобто $s(t) = s(t \pm Dt)$.

Вирішити систему рівнянь (3), (4) відносно $s(t)$ і $x(t)$ не представляється можливим в силу присутності в ній додаткового невідомого параметру g . Для її вирішення можна використати ще одну систему рівнянь на основі затриманих на інтервал Dt спостережень $a(t)$ і $b(t)$ та враховуючи останнє передбачення про повільну зміну сигналу $s(t) = s(t \pm Dt)$, порівняно з Dt :

$$\begin{cases} a(t\Phi) = G \times(t) + g \times(t\Phi); \\ b(t\Phi) = s(t) + x(t\Phi), \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} a(t\Phi) = G \times(t) + g \times(t\Phi); \\ b(t\Phi) = s(t) + x(t\Phi), \end{cases} \quad (6)$$

де $t\Phi = t - Dt$; $Dt = \frac{1}{2f_{n,\max}}$.

Отримаємо співвідношення, які визначають алгоритм роботи пристрою обробки вхідних сигналів приймачем. При сумісному виконанні пар рівнянь (3), (5) і (4), (6) отримаємо систему:

$$\begin{cases} a(t) - a(t\Phi) = g[x(t) - x(t\Phi)]; \\ b(t) - b(t\Phi) = x(t) - x(t\Phi). \end{cases} \quad (7)$$

З рівняння системи (7) витікає тотожність, яка визначає значення коефіцієнту підсилення g антеною A_1 завадового сигналу $x(t)$ з напрямку його приходу q_n :

$$g = F_{A_1}(q_n) = \frac{a(t) - a(t\Phi)}{b(t) - b(t\Phi)}.$$

Помноживши обидві частини рівняння (4) системи на деякий коефіцієнт k і віднімаючи їх від відповідних частин рівняння (3) тієї ж системи, а також помноживши при цьому різницю $a(t) - kb(t)$ на деякий коефіцієнт q отримаємо додаткову тотожність:

$$q [a(t) - k b(t)] = q \times(G - k) \times(t) + q \times(g - k) \times(t) = s(t) - x(t). \quad (8)$$

Для виконання тотожності (8) необхідно підібрати такі значення k і q , які будуть коренями системи рівнянь:

$$\begin{cases} q \times(G - k) = 1; \\ q \times(g - k) = -1, \end{cases}$$

вирішуючи яку, отримаємо значення коефіцієнтів k і q , при яких справедлива тотожність (8):

$$k = \frac{G + g}{2}; \quad (9)$$

$$q = \frac{2}{G - g}. \quad (10)$$

Тоді з урахуванням тотожності (8) можемо скласти наступне співвідношення:

$$s(t) - x(t) = q [a(t) - k b(t)], \quad (11)$$

де k і q – коефіцієнти, які визначаються відповідними співвідношеннями (9) та (10).

Підставивши значення $s(t) + x(t)$ з рівняння (4) системи і $s(t) - x(t)$ з рівняння (11) в тотожність (1), (2), отримаємо шукані співвідношення, що визначають алгоритм роботи пристрою обробки прийнятого захищеного сигналу:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \frac{b(t) + q \times [a(t) - k \times b(t)]}{2}; \\ \dot{y}(t) &= \frac{b(t) - q \times [a(t) - k \times b(t)]}{2}; \\ M &= k = \frac{G + g}{2}; \\ q &= \frac{2}{G - g}; \\ g &= \frac{a(t) - a(t\Phi)}{b(t) - b(t\Phi)}. \end{aligned}$$

Взагалі обробка сигналів в лінійному просторі сигналів при переході в простір електричних сигналів передбачає використання алгоритмів обробки інваріантних до умов параметричної і непараметричної априорної невизначеності [2].

Якщо подальша обробка обмежена використанням алгоритмів, які критичні до енергетичних характеристик корисних і завадових сигналів, тоді пристрій обробки повинен формувати наступні сигнали на виході $x(t)$ і $y(t)$, які мають вигляд:

$$x(t) = G \times(t) \dot{x}(t) = \frac{[G \times(t) + x(t)] + |G \times(t) - x(t)|}{2}; \quad (12)$$

$$y(t) = G \times(t) \dot{x}(t) = \frac{[G \times(t) + x(t)] - |G \times(t) - x(t)|}{2}; \quad (13)$$

де $G = F_{A1}(q_s)$ – коефіцієнт підсилення антени A1 з невідомого напрямку приходу сигналу q_s .

За допомогою підходу, що використовувався при складанні рівняння (8), сформуємо наступні співвідношення, враховуючи тотожності (12), (13):

$$q_1 [a(t) - k_1 \times b(t)] = q_1 \times [G - k_1] \times(t) + q_1 \times [g - k_1] \times(t) = G \times(t) - x(t); \quad (14)$$

$$q_2 [a(t) + k_2 \times b(t)] = q_2 \times [G + k_2] \times(t) + q_2 \times [g + k_2] \times(t) = G \times(t) + x(t). \quad (15)$$

Для виконання тотожностей (14), (15) необхідно підібрати такі значення $k_{1,2}$ і $q_{1,2}$, які будуть коренями відповідних систем рівнянь:

$$\begin{aligned} \dot{q}_1 \times [G - k_1] &= G; \\ \dot{q}_1 \times [g - k_1] &= -1; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{q}_2 \times [G + k_2] &= G; \\ \dot{q}_2 \times [g + k_2] &= 1. \end{aligned} \quad (17)$$

Вирішуючи системи рівнянь (16) та (17), отримаємо значення коефіцієнтів $k_{1,2}$ і $q_{1,2}$, які дорівнюють відповідно:

$$k_1 = \frac{G + g}{G + 1}; \quad (18)$$

$$q_1 = \frac{G + 1}{G - g}; \quad (19)$$

$$k_2 = \frac{G - g}{G - 1}; \quad (20)$$

$$q_2 = \frac{G - 1}{G - g}. \quad (21)$$

Тоді з урахуванням тотожностей (18) - (21) можемо скласти відповідне співвідношення наступного виду:

$$G \times(t) - x(t) = q_1 [a(t) - k_1 \times b(t)]; \quad (22)$$

$$G \times(t) + x(t) = q_2 [a(t) + k_2 \times b(t)]; \quad (23)$$

де $k_{1,2}$ і $q_{1,2}$ – коефіцієнти, що визначаються відповідними співвідношеннями (18), (20) та (19), (21).

Підставивши значення $G \times(t) - x(t)$ та $G \times(t) + x(t)$ з рівнянь (22) і (23) в тотожності (12) та (13), отримуємо шукане співвідношення, яке і буде описувати алгоритм роботи пристрою обробки захищеного сигналу в приймачі:

$$\begin{aligned}
 \begin{cases}
 x(t) = \frac{q_2 [a(t) + k_2 \times(t)] + q_1 [a(t) - k_1 \times(t)]}{2}; \\
 y(t) = \frac{q_2 [a(t) + k_2 \times(t)] - q_1 [a(t) + k_1 \times(t)]}{2} \\
 k_1 = \frac{G + g}{G + 1}; \\
 q_1 = \frac{G + 1}{G - g}; \\
 k_2 = \frac{G - g}{G - 1}; \\
 q_2 = \frac{G - 1}{G - g}; \\
 g = \frac{a(t) - a(t\Phi)}{b(t) - b(t\Phi)}.
 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{24}$$

Взагалі зауважимо, що методи і алгоритми обробки в просторі сигналів є одноканальними і не залежать від кількості джерел завад, які впливають на вхід пристрою обробки приймача. Ці методи можуть бути практично реалізовані. Але на них впливають різні дестабілізуючі фактори на верхній і нижній межах смуги прозорості приймального тракту. Це призводить до порушення початкових властивостей простору електричних сигналів [5], що вказує на те, що ці методи перестають бути оптимальними, а значить їх слід додатково оптимізувати, тобто покращити структуру пристрою обробки з урахуванням наявності завадових сигналів у просторі.

Представимо алгоритм фільтрації у векторно-матричній формі.
Сигнали на виходах антенних каналів представимо у векторній формі:

$$x(t) = \begin{pmatrix} \hat{e}_{x_1}(t) \\ \hat{e}_{x_2}(t) \end{pmatrix} \hat{u} = a_s s(t) + a_x x(t),$$

де $a_s = \begin{pmatrix} \hat{e}_{K_{1s}} \\ \hat{e}_{K_{2s}} \end{pmatrix} \hat{u}$; $a_x = \begin{pmatrix} \hat{e}_{K_{1x}} \\ \hat{e}_{K_{2x}} \end{pmatrix} \hat{u}$ – просторові вектори спрямованості для корисного сигналу та завади.

Алгоритм просторової обробки фактично формує ваговий вектор:

$$w = \begin{pmatrix} \hat{e}_1 \\ \hat{e}_g \end{pmatrix} \hat{u}$$

та формує вихідний сигнал:

$$y(t) = w^H x(t),$$

де w^H – ермітове спряження.

Умова придушення завади при $w^H a_x = 0$, причому коефіцієнт g :

$$g = \frac{K_{1x}}{K_{2x}}. \tag{25}$$

Тоді вихідний сигнал:

$$y(t) = w^H a_s s(t),$$

що забезпечує просторову селекцію сигналу.

Потужність на виході приймача:

$$P_{out} = |w^H a_s|^2 P_s + |w^H a_x|^2 P_x,$$

де P_s та P_x – потужності корисного сигналу і завадового відповідно.

Оскільки $w^H a_x = 0$, отримуємо:

$$P_{out} = |w^H a_s|^2 P_s. \tag{26}$$

Оцінимо SNR на вході приймача:

$$SNR_{in} = \frac{|K_{1s}|^2 P_s}{|K_{1x}|^2 P_x + s_n^2},$$

де S – дисперсія шуму приймача; n – кількість завад.

На виході приймача SNR :

$$SNR_{out} = \frac{|w^H a_s|^2 P_s}{s_n^2}.$$

Виграш по SNR розраховуємо як

$$G = \frac{SNR_{out}}{SNR_{in}}$$

або в децибелах

$$DSNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{SNR_{out}}{SNR_{in}}. \tag{27}$$

Спробуємо отримати оцінку коефіцієнта \hat{g} через затримку:

- для затриманих сигналів

$$x_1^t(t) = x_1(t - t); \quad x_2^t(t) = x_2(t - t);$$

- для різницевих сигналів

$$Dx_1(t) = x_1(t) - x_1(t - t); \quad Dx_2(t) = x_2(t) - x_2(t - t).$$

Тоді оцінка коефіцієнта \hat{g} методом мінімізації середньоквадратичної похибки:

$$\hat{g} = \frac{\int Dx_2(t) Dx_1(t) dt}{\int (Dx_2(t))^2 dt}$$

або в дискретному вигляді:

$$\hat{g} = \frac{\sum_n Dx_2[n] Dx_1[n]}{\sum_n (Dx_2[n])^2}. \tag{28}$$

Згідно (24-28) розробимо схему приймача з адаптивним алгоритмом виявлення і подальшою обробкою захищеного сигналу. Така схема показана на рис. 3.

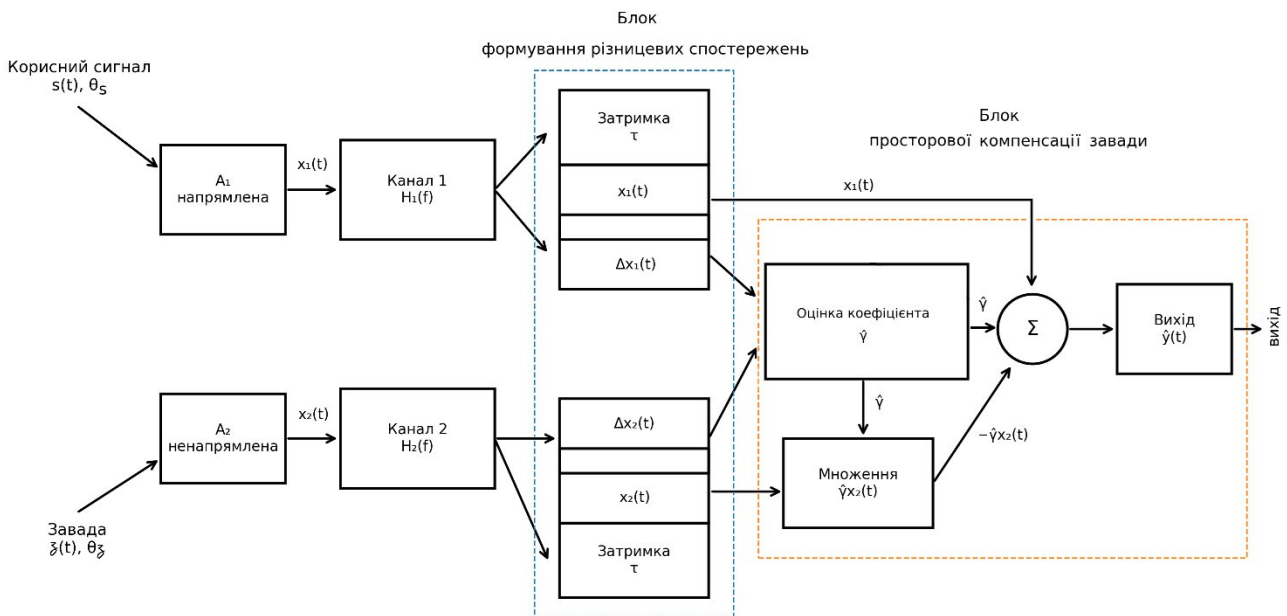


Рис. 3 Схема приймача з адаптивним алгоритмом виявлення і подальшою просторовою обробкою захищеного сигналу

Таким чином, структурна схема (рис. 3) реалізує адаптивний алгоритм просторової компенсації завад і забезпечує підвищення ефективності виявлення радіозакладних пристроїв в умовах складної завадової обстановки.

Оцінимо ефективність виграшу SNR за формулою (27) розробленого методу від кута приходу завади на антену $A1$ (рис. 4).

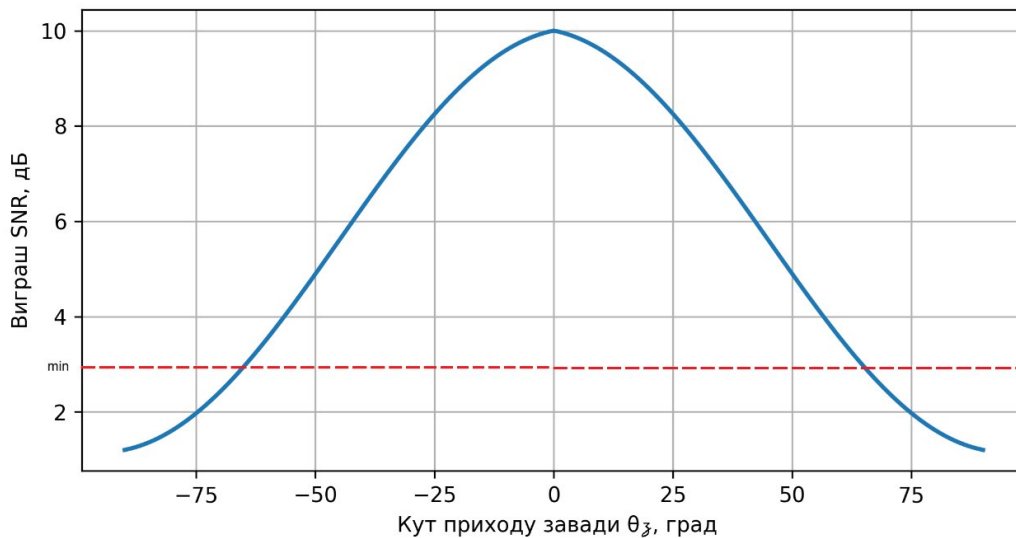


Рис. 4 Залежність виграшу SNR від кута приходу завади на антену $A1$

Отримана залежність на рис. 4 має виражений максимум у центральній області діаграми спрямованості антени, що відповідає найбільш ефективному просторовому рознесенню корисного та завадового сигналів. Максимальний виграш досягає близько 10 дБ при кутах приходу завади, близьких до нульового напрямку, коли алгоритм просторової компенсації забезпечує найбільш точне оцінювання коефіцієнтів селекції та ефективне придушення завадового сигналу. Така залежність досить добре узгоджується з відомими підходами в [12] для виявлення поляризаційних складових сигналів антенними ґратками для боротьби з перешкодами для GPS сигналів.

Як видно з рис. 4 мінімальне допустиме значення SNR , при якому можливе виявлення радіозакладного пристрою, становить близько 3 дБ. Тоді кути при яких можливе ефективне виявлення корисного сигналу ± 60 градусів.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Практичне моделювання показало, що ефективна робота алгоритму просторової обробки забезпечується при значеннях SNR 3-6 дБ. При менших значеннях SNR погіршується точність оцінки вагових коефіцієнтів та зменшується ефективність просторової компенсації завад, а це говорить про суттєве погіршення розбірливості мови.

Таким чином пристрій обробки сигналів в просторі призводить до зниження ступеню статистичної залежності завади в каналах приймання і вказує на більшу ефективність, ніж відомі пристрої обробки суміші корисного і завадового сигналів. Запропонований метод забезпечує адаптивне придушення завад без необхідності точного апіорного знання параметрів завадового сигналу та може бути використаний для підвищення ефективності виявлення прихованих каналів витоку інформації.

Перспективи подальших досліджень полягають у: розширенні методу на багатоканальні антенні ґратки; використанні алгоритмів адаптивного оцінювання напрямку приходу сигналу на практиці; інтеграції просторової та часової обробки сигналів; дослідженні стійкості алгоритму в умовах негаусових та нестационарних завад; створенні спеціалізованого програмно-апаратного комплексу для виявлення радіозакладних пристроїв у режимі реального часу.

Отримані результати можуть бути використані під час побудови сучасних систем технічного захисту інформації, комплексів радіоконтролю, спеціальних телекомунікаційних систем та перспективних адаптивних приймальних пристроїв.

Внесок авторів: Ігор Данилов – аналіз джерел, розробка математичної моделі, результати моделювання та їх обґрунтування; Юрій Пепа – теоретичні основи дослідження, синтез схеми приймача.

Декларація про штучний інтелект

Автори не використовували штучний інтелект при створенні матеріалів статті.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів та підтверджують, що під час підготовки цієї роботи не існувало жодних комерційних, фінансових чи інших взаємовідносин, які могли б бути розцінені як такі, що здатні вплинути на результати дослідження або їх інтерпретацію. Робота виконана відповідно до принципів академічної доброчесності, етичних норм проведення наукових досліджень та вимог редакційної політики щодо запобігання конфлікту інтересів.

Список використаної літератури

1. Воронін М.О. (2022) Методи виявлення радіовипромінювань на об'єктах інформаційної діяльності. *Сучасний захист інформації*. №4(52). 60–65. <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2022.040010>
2. Корсун В.І. (2019) Процедура виявлення і розпізнавання несанкціонованого випромінювання мобільними системами радіомоніторингу із апіорно визначеною просторово-часовою конфігурацією її рухомих радіоприймачів. *Вісник Хмельницького національного університету*. №4(275). 199–203. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2019-275-4-199-203>
3. Плющ О.Г., Рибдайло А.А. (2019) Алгоритм налаштування адаптивної антенної решітки. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень НУОУ*. №2(66). 108–114. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2019-2-66/108-114>
4. Маковеєнко Д.О., Сідень С.В., Пилявський В.В. (2021) Використання адаптивних антенних решіток для збільшення пропускної здатності мережі LTE-A. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. №3. 17–25. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-3-2>
5. Лаптев О.А. (2019) Новий метод спектрального аналізу визначення випадкових цифрових сигналів на фоні легальних радіосигналів. *Сучасний захист інформації*. №4(40). 70–81. <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2019.047081>
6. Конотопець М., Туровський О., Самойлов І., Комонюк Є. (2025) Перспективи застосування тепловізорів для виявлення радіоелектронних засобів негласного отримання інформації на об'єктах інформаційної діяльності. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. №1. 59–69. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-8>
7. Ong L.T. (2015) Adaptive Beamforming Algorithms for Cancellation of Multiple Interference Signals. *Progress In Electromagnetics Research M*. Vol. 43. 109–118. <https://doi.org/10.2528/PIERM15061202>
8. Gentilho E., Scalassara P.R., Abrão T. (2020) Direction-of-Arrival Estimation Methods: A Performance-Complexity Tradeoff Perspective. *Journal of Signal Processing Systems*. Vol. 92. 239–256. <https://doi.org/10.1007/s11265-019-01467-4>
9. Mahmoud K.R., et al. (2008) Analysis of Uniform Circular Arrays for Adaptive Beamforming Applications Using Particle Swarm Optimization Algorithm. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. Issue 18. 42–52. <https://doi.org/10.1002/mmce.20265>
10. Liu T. et al. (2022) Reduced-dimension MVDR Beamformer Based on Sub-Array for Robust Adaptive Beamforming. *IET Communications*. Issue 16. 2183–2192. <https://doi.org/10.1049/cmu2.12472>
11. Poormohammad S., et al. (2017) Precision of Direction of Arrival Estimation Using Antenna Arrays. *International Journal of Electronics and Communications*. Vol. 74. 145–149. <https://doi.org/10.1016/j.aecue.2017.02.007>
12. Park K., Seo J. (2021) Single-Antenna-Based GPS Anti-Jamming Method Exploiting Polarization Diversity. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. Vol. 57. No. 2. 919–934. <https://doi.org/10.1109/TAES.2020.3034025>

References

1. Voronin M.O. (2022) Metody vyivlennia radiovypryminiuvan na ob'ekтах informatsiinoi diialnosti. *Suchasnyi zakhyst informatsii*. No. 4(52). 60–65. <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2022.040010>
2. Korsun V.I. (2019) Protседura vyivlennia i rozpiznavannia nesanktsionovanoho vyprominiuvannia mobilnymy systemamy radiomonitorynhu iz apriorno vyznachenoiu prostorovo-chasovoiu konfiguratsiieiu yii rukhomykh radiopryimachiv. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. No. 4(275). 199–203. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2019-275-4-199-203>
3. Pliushch O.H., Rybydailo A.A. (2019) Alhorytm nalashtuvannia adaptyvnoi antennoi reshitky. *Zbirnyk naukovykh prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen NUOU*. No. 2(66). 108–114. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2019-2-66/108-114>
4. Makoveienko D.O., Siden S.V., Pyliavskiy V.V. (2021) Vykorystannia adaptyvnykh antenykh reshitok dlia zbilshennia propusknoi zdatnosti merezhi LTE-A. *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*. No. 3. 17–25. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-3-2>
5. Laptiev O.A. (2019) Novyi metod spektralnoho analizu vyznachennia vypadkovykh tsyfrovyykh syhnaliv na foni lehalnykh radiosyhnaliv. *Suchasnyi zakhyst informatsii*. No. 4(40). 70–81. <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2019.047081>
6. Konotopets M., Turovskiy O., Samoilo V., Komoniuk Ye. (2025) Perspektyvy zastosuvannia teplovizoriv dlia vyivlennia radioelektronnykh zasobiv nehlasnoho otrymannia informatsii na ob'ekтах informatsiinoi diialnosti. *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh*. No. 1. 59–69. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-8>
7. Ong L.T. (2015) Adaptive Beamforming Algorithms for Cancellation of Multiple Interference Signals. *Progress In Electromagnetics Research M*. Vol. 43. 109–118. <https://doi.org/10.2528/PIERM15061202>
8. Gentilho E., Scalassara P.R., Abrão T. (2020) Direction-of-Arrival Estimation Methods: A Performance-Complexity Tradeoff Perspective. *Journal of Signal Processing Systems*. Vol. 92. 239–256. <https://doi.org/10.1007/s11265-019-01467-4>
9. Mahmoud K.R., et al. (2008) Analysis of Uniform Circular Arrays for Adaptive Beamforming Applications Using Particle Swarm Optimization Algorithm. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. Issue 18. 42–52. <https://doi.org/10.1002/mmce.20265>
10. Liu T. et al. (2022) Reduced-dimension MVDR Beamformer Based on Sub-Array for Robust Adaptive Beamforming. *IET Communications*. Issue 16. 2183–2192. <https://doi.org/10.1049/cmu2.12472>
11. Poormohammad S., et al. (2017) Precision of Direction of Arrival Estimation Using Antenna Arrays. *International Journal of Electronics and Communications*. Vol. 74. 145–149. <https://doi.org/10.1016/j.aecue.2017.02.007>
12. Park K., Seo J. (2021) Single-Antenna-Based GPS Anti-Jamming Method Exploiting Polarization Diversity. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. Vol. 57. No. 2. 919–934. <https://doi.org/10.1109/TAES.2020.3034025>

Надійшла до редакції: 20.01.26

Прийнята до друку: 12.06.26

Опубліковано: 30.06.26