

Igor CEVUX, Анастасія САКОВИЧ

Україна, Національний університет «Одеська політехніка»

E-mail: itsevukh@op.edu.ua

ВИЯВНИК НЕСИНХРОННОЇ ІМПУЛЬСНОЇ ЗАВАДИ В УМОВАХ АДТИВНОЇ СУМІШІ НЕКОРЕЛЬОВАНОЇ ТА ДИСКРЕТНОЇ ЗА ДАЛЬНІСТЮ КОРЕЛЬОВАНОЇ ГАУСОВИХ ЗАВАД

Запропоновано алгоритм виявлення імпульсних несинхронних завад для радіосистем вилучення інформації, що функціонують в умовах складної завадової обстановки. У середовищі Matlab/Simulink сформовано структурну схему і проведено моделювання розробленого алгоритму в умовах адитивної суміші некорельованої та дискретної за дальністю корельованої гаусових завад. Дослідження підтвердили працездатність розробленого алгоритму за наявності обмежень на динамічний діапазон приймального тракту радіотехнічної системи.

Ключові слова: алгоритм виявлення, імпульсна завада, динамічний діапазон, суміш корельованої та некорельованої завад.

Однією з основних вимог, що висувуються до існуючих та проєктованих багатофункціональних радіотехнічних систем (РТС), є висока їхня завадозахищеність в умовах складної, мінливої та апріорно невідомої завадової обстановки [1], [2], [3]. Підвищення завадостійкості РТС і вдосконалення засобів радіоелектронної боротьби вимагають розроблення ефективних систем завадозахисту з високою інформативністю, здатних працювати в умовах впливу комплексу різнорідних завад. При цьому через високу технічну складність рішення, які реалізують складні адаптивні оптимальні багатовимірні алгоритми [4], [5], [6], не можуть використовуватися в мобільних радіолокаторах, для яких більш прості підоптимальні алгоритми виявлення є привабливим технічним та економічним вирішенням цієї проблеми. Розроблення таких алгоритмів вимагає введення певних обмежень (допущень), що накладаються і на структуру системи, і на моделі сигналу та завад, які входять до комплексу.

Постановка завдання

Моделі завад, прийняті в роботі

Всі існуючі види завад, що діють на РТС, з математичної точки зору та характеру впливу на систему завадозахисту можна умовно представити у вигляді трьох компонентів: корельованої η , некорельованої γ та імпульсної δ завад. Тобто на практиці система піддається впливу комплексу завад: $\xi_i = \eta_i + \gamma_i + \delta_i$. Розглянемо кожну з них.

Корельована завада. Поряд з пасивними завадами, які є результатом відбиття зондувального сигналу від підстилаючих поверхонь (земної та водної), протяжних метеоутворень (дощ, сніг, град, туман), є ще багато джерел корельованих завад як природного, так і штучного походження [7], [8]. Вплив пасивних завад

проявляється у придушенні та маскуванні корисних сигналів, особливо при виявленні малорозмірних цілей на низькій висоті. Інтенсивність корельованих завад, як правило, істотно перевищує рівень власних шумів приймача та сигналу від цілі, що ускладнює радіолокаційне спостереження, а іноді робить його взагалі неможливим.

Відповідно до центральної граничної теореми, за умови однорідності статистичних характеристик завади в межах аналізованого часового стробу допустимим є опис корельованої завади нормальною щільністю розподілу ймовірностей з коваріаційною матрицею B_K з елементами

$$b_{ik} = \sigma_K^2 r_{ik} \exp[j(i-k)\varphi_K], \quad (1)$$

де σ_K^2 — потужність корельованої завади;

r_{ik} — коефіцієнти міжперіодної кореляції;

φ_K — доплерівський зсув фази завади за період повторення T , $\varphi_K = 2\pi f_d$;

f_d — доплерівська частота завади.

Некорельована завада містить внутрішні шуми приймача й активні стаціонарні загороджувальні завади. Ці заважаючі впливи, що пройшли через вузько-смугові фільтри, описуються нормальною щільністю розподілу ймовірностей з міжперіодним коефіцієнтом кореляції, близьким до нуля. Отже, для задач міжперіодної обробки сигналів некорельовану заваду можна описати нормальною щільністю розподілу ймовірностей з діагональною коваріаційною матрицею

$$B_H = \sigma_H^2 I, \quad (2)$$

де σ_H^2 — потужність некорельованої завади;

I — одинична матриця.

Імпульсна завада. Вважатимемо, що несинхронна імпульсна завада є відрізками випадкового процесу з довільною випадковою тривалістю та хаотичним періодом повторення. Приблизно її можна описати нормальною щільністю розподілу ймовірностей з коваріаційною матрицею B_I . Для вектора вхідного процесу X , v -тий елемент якого містить імпульсну заваду, коваріаційна матриця має вигляд

$$B_I = \sigma_I^2 e_v e_v^*, \quad (3)$$

де σ_I^2 — потужність імпульсної завади;

e_v — N -мірний вектор з v -тим елементом, що дорівнює одиниці.

Таким чином, коваріаційна матриця комбінованої завади це сума коваріаційних матриць окремих складових:

$$B_3 = B_K + B_H + B_I. \quad (4)$$

Структура виявника сигналу в умовах різномірної комбінованої завади

За умови, що завади, які входять до комплексу, описуються гаусовими моделями, оптимальний за критерієм максимуму відношення сигнал/завада алгоритм виявлення сигналу потребує обчислення достатньої статистики вигляду [9]

$$l = X^* B_3^{-1} S, \quad (5)$$

де X — N -мірний вектор вибіркового відліку вхідного процесу;

B_3 — коваріаційна матриця комбінованої завади;

S — вектор корисного сигналу;

$*$ — знак комплексного спряження та транспонування.

Застосування оптимальних алгоритмів виявлення сигналу на тлі комплексу завад при вирішенні конкретних радіолокаційних завдань ускладнюється як неможливістю достатньо обґрунтованого завдання ймовірнісних і навіть спектрально-кореляційних характеристик сигналу і комбінованої завади, так і вимогами до реалізації алгоритмів у реальному масштабі часу за умови збереження їхньої стійкості до асимптотично оптимальних рішень. Щоб подолати апіорну невизначеність, застосовується адаптивний байєсівський підхід [12], який передбачає оптимізацію алгоритмів обробки залежно від параметрів завади та заміну невідомих параметрів їх спроможними оцінками, що призводить до побудови адаптивних алгоритмів та систем обробки. У виразі (5) це зводиться до заміни коваріаційної матриці завади B_3 її оцінкою максимальної правдоподібності.

У разі складної мінливої завадової обстановки, зокрема дії потужної імпульсної завади на тлі адитивної суміші дискретної за дальністю корельованої та нестационарної некорельованої завад, вибіркова кореляційна матриця комплексної завади може стати

погано обумовленою, а алгоритми швидкого звернення матриці [7], [13] — видати сингулярні рішення. Це негативно позначається на роботі радіолокаційної системи в цілому: значно знижується співвідношення сигнал/шум, з'являються завади у вигляді помилкових потужних викидів сигналу тощо.

У [14] показано, що з урахуванням апіорної інформації щодо різномірного характеру завадних впливів коваріаційну матрицю комбінованої завади можна подати як

$$B_3 = \left[(B_K + B_H)^{-1} B_I + I \right]^{-1} \left[B_H^{-1} B_K + I \right]^{-1} B_H^{-1}. \quad (6)$$

Тоді процедура виявлення корисного сигналу (5) запишеться у вигляді алгоритму з почерговою компенсацією імпульсної, корельованої і некорельованої завад, які входять до комплексу

$$l = X^* \left\{ \left[(B_K + B_H)^{-1} B_I + I \right]^{-1} \left[B_H^{-1} B_K + I \right]^{-1} B_H^{-1} \right\} S. \quad (7)$$

У [15] показано, що оптимальна процедура (7) зводиться до послідовної оптимальної компенсації кожної з “небілих” завад — спершу імпульсної, а потім корельованої — за критерієм мінімізації середньоквадратичного відхилення (СКВ), із подальшою узгодженою обробкою в умовах “білих” шумів. При цьому оптимальний за СКВ компенсатор імпульсної завади має замінювати уражений імпульсною завадою (ІЗ) елемент вибірки вхідного процесу зваженою сумою значень x_j^* , що не містять ІЗ. Подальші перетворення згідно з (7) зводяться до послідовного виконання операцій оптимального за СКВ режектування корельованої завади (КЗ) та когерентного накопичення.

На початковому етапі боротьби з комбінованою завадою для компенсації імпульсної складової алгоритм (7) передбачає наявність апіорної інформації про номер елемента вектора вхідного процесу та номер елемента дозволу за дальністю, які уражені імпульсною завадою. Однак на практиці така інформація, як правило, відсутня, що зумовлює необхідність її визначення шляхом виявлення ІЗ на тлі суміші інших типів завад.

Алгоритми виявлення несинхронної імпульсної завади на тлі суміші гаусових завад

Завдання виявлення імпульсної завади в умовах адитивної суміші стаціонарних некорельованих та корельованих гаусових завад відомої потужності вирішується порівняно просто [2]. У цьому випадку алгоритм виявлення ІЗ можна побудувати, наприклад, на основі тесту відношення правдоподібності. Застосування такого тесту з урахуванням спроможних оцінок невідомих параметрів дозволяє сформулювати правило прийняття рішення щодо наявності/відсутності імпульсної завади в k -му елементі вибірки вхідного процесу:

$$|X_k|^2 \geq C \sum_{i=1}^{m-1} |X_i|^2, \quad i \neq k, \quad (8)$$

де C — коефіцієнт, що обчислюється залежно від заданої ймовірності помилкової тривоги виявлення ІЗ.

В результаті вся процедура виявлення імпульсної завади на тлі стаціонарної завади невідомої потужності зводиться до порівняння квадрата модуля аналізованого елемента з сумою квадратів модулів інших елементів, які не містять імпульсної завади, помноженою на константу. Однак цей алгоритм втрачає ефективність у випадках змінної потужності нестационарної завади, оскільки будь-яке різке коливання рівня неперервної завади (як корельованої, так і некорельованої) може бути хибно інтерпретоване як імпульсна завада. Унаслідок цього такі елементи виключаються з подальшого процесу виявлення корисного сигналу, що призводить до втрати корисної інформації.

Для підвищення ефективності виявлення імпульсних завад на тлі адитивної суміші некорельованої та дискретної по дальності корельованої завади в [16] в умовах відсутності обмежень на динамічний

діапазон приймального тракту РТС розроблено пристрій, структурна схема якого представлена на **рис. 1**. Запам'ятовувальні пристрої $ЗП_T$, $ЗП_{\pi\tau}$ призначені для зберігання інформації, відповідно, на період T повторення зондувального сигналу та на π тривалостей τ зондувального сигналу. Блоки ВІЗС1, ВІЗС2, ВІЗК — виявники імпульсної завади (ВІЗ) на тлі стаціонарної завади в k -му елементі дозволу за дальністю, що реалізують різні підходи до аналізу даних у межах одного або кількох періодів повторення.

ВІЗС1 працює за методом багатьох контрастів, використовує дані j -го періоду повторення, а рішення щодо наявності ІЗ приймається, якщо виконується хоча б одна з таких умов:

$$\begin{aligned} C|X_{k,j}|^2 - |X_{k+1,j}|^2 &> 0; C|X_{k,j}|^2 - |X_{k+2,j}|^2 > 0; \dots; \\ C|X_{k,j}|^2 - |X_{k+(m-1),j}|^2 &> 0, \end{aligned} \quad (9)$$

де $X_{k,j}$, $X_{k+1,j}$, ..., $X_{k+(m-1),j}$ — вибіркові значення вхідного процесу в k , $k+1$, ..., $k+(m-1)$ елементах дозволу за дальністю j -го періоду повторення;

C — коефіцієнт, що вибирається з умови забезпечення заданої ймовірності помилкової тривоги.

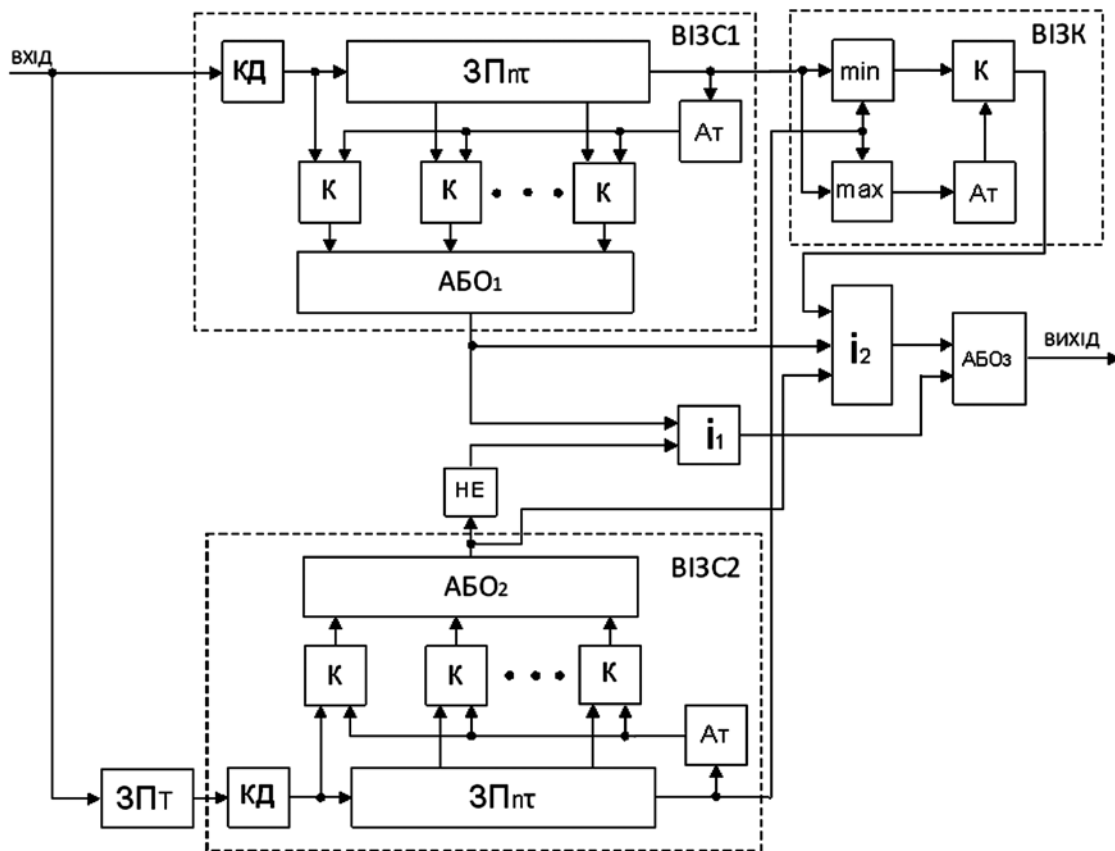


Рис. 1. Структурна схема виявника імпульсних завад без обмежень на динамічний діапазон [16]: ВІЗС1, ВІЗС2, ВІЗК — блоки виявлення імпульсної завади; К — компаратор; $ЗП_T$, $ЗП_{\pi\tau}$ — запам'ятовувальні пристрої; КД — квадратичний детектор; Ат — атенуатор; І, АБО, НЕ — відповідні логічні сполучення

Блок ВІЗС2 аналогічний ВІЗС1, використовує дані $(j-1)$ -го періоду й, відповідно, умови для прийняття рішення про наявність ІЗ такі:

$$C|X_{k,j-1}|^2 - |X_{k+1,j-1}|^2 > 0; C|X_{k,j-1}|^2 - |X_{k+2,j-1}|^2 > 0; \dots; \\ C|X_{k,j-1}|^2 - |X_{k+(m-1),j-1}|^2 > 0; \quad (10)$$

де $X_{k,j-1}, X_{k+1,j-1}, \dots, X_{k+(m-1),j-1}$ — те ж саме, що й у (9), для $(j-1)$ -го періоду повторення.

Блок ВІЗК приймає рішення за результатами аналізу інформації в j -му та $(j-1)$ -му періодах повторення, реалізуючи алгоритм

$$C \cdot \max \left\{ |X_{k,j}|^2; |X_{k,j-1}|^2 \right\} - \\ - \min \left\{ |X_{k,j}|^2; |X_{k,j-1}|^2 \right\} > 0, \quad (11)$$

де $\max \{a; b\}$, $\min \{a; b\}$ — відповідно, максимальне та мінімальне з величин a та b значення;

$$C = \frac{2}{r_0} \left(\frac{1}{r_0} - \sqrt{\frac{1}{r_0^2} - 1} \right) - 1.$$

З метою перевірки ефективності запропонованого пристрою в порівнянні з пристроєм, представленим у [16], було проведено комп'ютерне моделювання за умов відсутності обмежень на динамічний діапазон приймального тракту РТС. Розглядалося 200 елементів дозволу по дальності у двох періодах повторення. У кожному з цих елементів діяла некорельована завада з гаусовою щільністю розподілу ймовірностей, а в елементах з 20 по 70 та з 120 по 150 — адитивна суміш некорельованої і корельованої завад також з гаусовою щільністю розподілу ймовірностей і модулем комплексного коефіцієнта кореляції $\rho=0,99$. Елементи дозволу 5, 45, 65, 117, 148 першого періоду повторення вражалися імпульсною завадою з відношенням потужностей імпульсної та некорельованої завад $\lambda_{\text{И}} = \sigma_{\text{I}}^2 / \sigma_{\text{H}}^2 = 80$ дБ. Отримані результати моделювання показали, що при відношенні потужностей корельованої і некорельованої завад $\lambda_{\text{KH}} = \sigma_{\text{K}}^2 / \sigma_{\text{H}}^2 = 40$ дБ та розмірі “вікна” $m=10$ відносна частота помилкового виявлення для пропонованого пристрою дорівнювала нулю (спостереження проводилися за 200 статистично незалежними випробуваннями).

У мобільних радіолокаторах, для яких складність технічної реалізації та економічні показники мають суттєве значення, доводиться обмежувати динамічний діапазон приймального тракту РТС, використовуючи при цьому нелінійні та інші методи обробки сигналів в умовах потужних імпульсних та корельованих завад. Найпростішим і дуже ефективним є амплітудне обмеження. Зазвичай рівень обмеження вибирається меншим за середньоквадратичне значення адитивної суміші завад, і в таких умовах рівні імпульсної та

корельованої завад на вході приймального пристрою РТС відрізняються несуттєво. Для таких систем обробки сигналів ймовірність помилкового виявлення ІЗ в блоках ВІЗС1 та ВІЗС2 схеми на рис. 1 неприпустимо велика.

Метою цієї роботи було підвищення ефективності виявлення імпульсної завади в умовах адитивної суміші некорельованої та потужної дискретної за дальністю корельованої завади за наявності обмежень на динамічний діапазон приймального тракту РТС.

Для досягнення мети було розроблено алгоритм виявлення імпульсної завади для РТС, що може ефективно функціонувати в умовах поставленого завдання, в середовищі Matlab/Simulink створено моделі виявника імпульсних завад та проведено моделювання його роботи в умовах адитивної суміші некорельованої та нестационарної корельованої гаусових завад.

Алгоритм виявлення несинхронної ІЗ в умовах змішаних гаусових завад і обмеженого динамічного діапазону

В умовах обмеженого динамічного діапазону приймального тракту РТС амплітудні відмінності між імпульсною та корельованою завадами частково нівелюються, тому подальша обробка має спиратися на інші ознаки. Зокрема, несинхронну ІЗ можна відрізнити від КЗ за інтервалом між імпульсами та відсутністю міжперіодної кореляції.

У [14] показано, що з урахуванням апріорної інформації про різномірний характер завадних впливів коваріаційну матрицю комбінованої завади водночас з (6) можна подати також у вигляді

$$B_3 = \left[(B_{\text{I}} + B_{\text{H}})^{-1} B_{\text{K}} + I \right]^{-1} \left[B_{\text{H}}^{-1} B_{\text{I}} + I \right]^{-1} B_{\text{H}}^{-1}, \quad (12)$$

а процедуру виявлення (5) корисного сигналу записати у вигляді алгоритму з почерговою компенсацією корельованої, імпульсної та некорельованої завад, які входять до комплексу

$$I = \left\{ \left[(B_{\text{I}} + B_{\text{H}})^{-1} B_{\text{K}} + I \right]^{-1} \left[B_{\text{H}}^{-1} B_{\text{I}} + I \right]^{-1} B_{\text{H}}^{-1} \right\} S. \quad (13)$$

Тобто алгоритм (13) зводиться до послідовної компенсації за критерієм мінімуму СКВ спочатку корельованих завад, потім імпульсних і когерентного накопичення. Скористаємося цією можливістю для визначення номера елемента вхідного процесу, ураженого ІЗ.

Відомо [2], [3], що простим, але досить ефективним пристроєм придушення корельованих завад є пристрій черезперіодної компенсації (ЧПК). Розробимо алгоритм виявлення імпульсної завади, який, за прикладом [17], додатково використовує аналіз процесів на виході ЧПК. Будемо вважати, що:

— імпульсна завада на вході та виході пристрою ЧПК розподілена за нормальним законом, а модуль її міжперіодного коефіцієнта кореляції дорівнює нулю;

— враження несинхронною ІЗ одного і того самого елемента дозволу одразу в двох сусідніх періодах повторення має мізерно малу ймовірність;

— корельована завада на вході та виході ЧПК також розподілена за нормальним законом, має близьку до нуля доплерівську фазу, а її потужність в заданому елементі дозволу невідома та корельована в сусідніх періодах повторення.

Структурну схему розробленого виявника імпульсних завад на фоні адитивної суміші некорельованої та дискретної за дальністю корельованої завади наведено на **рис. 2** (де Σ — суматор, ВП — віднімальний пристрій, решта позначень — як і на рис. 1).

До схеми на рис. 2 входять чотири виявника ІЗ на тлі стаціонарної завади в k -му елементі дозволу за дальністю.

ВІЗС1 використовує дані j -го періоду повторення та працює за алгоритмом

$$|X_{k,j}|^2 \geq C \sum_{i=1}^{m-1} |X_{i,j}|^2, i \neq k; \quad (14)$$

ВІЗС2 працює з даними $(j-1)$ -го періоду за алгоритмом

$$|X_{k,j-1}|^2 \geq C \sum_{i=1}^{m-1} |X_{i,j-1}|^2, i \neq k; \quad (15)$$

ВІЗС3 аналізує дані на виході схеми ЧПК за алгоритмом

$$|X_{k,\text{ЧПК}}|^2 \geq C \sum_{i=1}^{m-1} |X_{i,\text{ЧПК}}|^2, i \neq k, \quad (16)$$

де $X_{k,j}$, $X_{k,j-1}$, $X_{k,\text{ЧПК}}$ — вибіркові значення вхідного процесу в k -му з m елементів дозволу за дальністю

у ковзному вікні відповідного періоду та на виході системи ЧПК.

ВІЗК приймає рішення, як і на схемі рис. 1, за результатами аналізу інформації в j -му та $(j-1)$ -му періодах повторення і працює за алгоритмом (13).

Квадрат модуля відліку вхідного процесу надходить з КД1 на вхід ВІЗС1, який визначає наявність ІЗ в аналізованому елементі в j -му періоді повторення. На виході компаратора К1 з'являється рівень логічної 1, якщо виконується умова алгоритму (14).

На вхід ВІЗС2 дані надходять із затримкою на час, що дорівнює тривалості періоду зондування. Тут відбувається виявлення імпульсної завади в аналізованому елементі у $(j-1)$ -го періоді, якщо виконується умова алгоритму (15).

На вхід ВІЗС3 надходять дані з виходу схеми ЧПК. Тут відбувається виявлення імпульсної завади в аналізованому елементі на виході схеми ЧПК, якщо виконується умова алгоритму (16).

ВІЗК виявляє імпульсну заваду шляхом порівняння оцінки коефіцієнта кореляції з порогом. Оцінка обчислюється за двома вибірковими значеннями, що відповідають аналізованому елементу у двох сусідніх періодах повторення. На його виході буде рівень логічної 1, якщо виконується умова (11).

Представимо логічну структуру прийняття рішення щодо наявності імпульсної завади за умов безпомилкової роботи всіх ВІЗ схеми.

Нехай ІЗ діє у k -му елементі дозволу в j -му ($j \geq 2$) періоді повторення на тлі стаціонарних, безперервних за дальністю завад. Тоді на виході К1 з'явиться рівень логічної 1, що надійде до входу елемента «І2», на

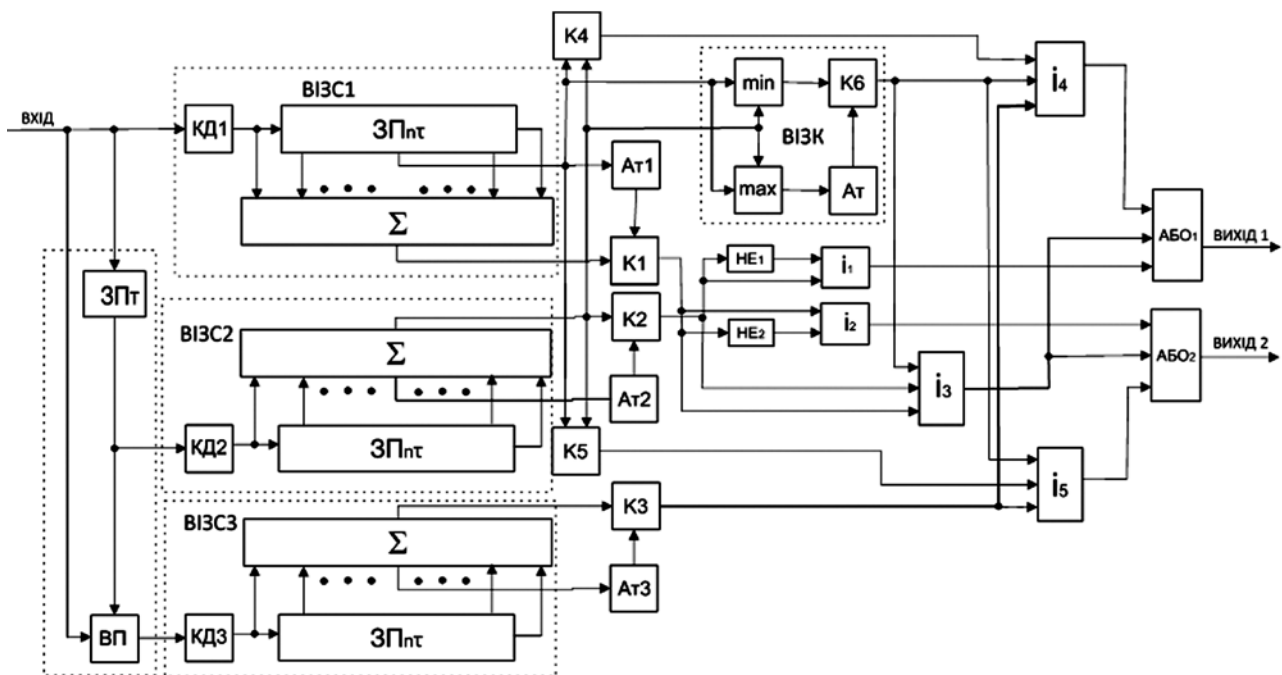


Рис. 2. Структурна схема виявника імпульсних завад за наявності обмежень на динамічний діапазон

другий вхід якого через елемент «НЕ2» теж надійде рівень логічної 1. В результаті на виході елементу «І2» буде рівень логічної 1, який надійде на перший вхід елемента АБО2, на виході якого, незалежно від результату роботи ВІЗК, з'явиться сигнал, що є ознакою наявності імпульсної завади в k -му елементі дозволу по дальності j -го періоду повторення.

Нехай ІЗ діє у k -му елементі дозволу за дальністю в $(j-1)$ -му періоді повторення на тлі стаціонарних, безперервних за дальністю завад. Тоді на виході К2 з'явиться рівень логічної 1, що надійде до входу елемента «І1», на другий вхід якого через елемент «НЕ1» теж надійде рівень логічної 1. В результаті на виході елемента «І1» буде рівень логічної 1, який надійде на третій вхід елемента «АБО1», на виході якого, незалежно від результату роботи ВІЗК, з'явиться сигнал, що є ознакою наявності імпульсної завади в k -му елементі дозволу по дальності $(j-1)$ -го періоду повторення.

Нехай протягом перехідного — від потужної корельованої завади до некорельованої — процесу на виходах компараторів К1 (ВІЗС1) та К2 (ВІЗС2) за відсутності імпульсної завади встановлюються рівні логічної 1. Ці рівні надходять відповідно на перший та другий (через інвертор) входи елементів «І1» та «І2», в результаті чого на виходах цих елементів формуються рівні логічного 0. На виході ВІЗК буде рівень логічного 0 й, отже, рівень логічного 0 з'явиться і на виході елемента «ІЗ». Беручи до уваги те, що на перший та другий входи елемента «АБО» надходять рівні логічного 0, на його виході також з'явиться рівень логічного 0, що є ознакою відсутності імпульсної завади в аналізованому елементі.

При наявності імпульсної завади в k -му елементі дозволу по дальності в j -му періоді повторення в указаний перехідний період на виході ВІЗК з'явиться рівень логічної 1. Цей сигнал надходить на вихід елемента «ІЗ», оскільки на його другий і третій входи також подаються рівні логічної 1 з виходів ВІЗС1 та ВІЗС2 відповідно. У результаті рівень логічної 1 надходить на перший вхід елемента «АБО1», на виході якого формується сигнал, що є ознакою наявності імпульсної завади в аналізованому елементі.

Виявлення потужної ІЗ у $(j-1)$ -му періоді виконується так само, як і для j -го періоду.

Зауважимо, що ефективність роботи запропонованого виявника потужної ІЗ в умовах відсутності обмежень на динамічний діапазон приймального пристрою збігається з ефективністю роботи прототипу. У випадку ж застосування обмежень динамічного діапазону, наприклад при використанні системи ШОВ (широка полоса — обмежувач — вузька полоса), рівні імпульсної та корельованої завад на вході приймального пристрою РЛС майже не відрізняються, і в результаті ефективність виявлення ІЗ в блоках

ВІЗС1 та ВІЗС2 на тлі некорельованих і дискретних за дальністю корельованих завад неприйнятно знижується. Тому до складу пристрою введено блок ВІЗС3, який визначає наявність імпульсної завади на виході схеми ЧПК. Алгоритм роботи полягає в обчисленні знаку різниці між квадратом модуля відліку процесу з виходу схеми ЧПК (помноженим на константу C) та виваженою сумою $m-1$ сигналів з кожного з m елементів лінії затримки. Якщо ця різниця додатна, фіксується присутність імпульсної завади в k -му елементі, якщо від'ємна — її відсутність. Компаратори К4 і К5 разом із логічними елементами «І4» та «І5» дозволяють визначити, в якому саме періоді повторення, j -му чи $(j-1)$ -му, виявлено заваду. Результат з'являється на «Виході 1» або «Виході 2» відповідно.

Модель виявника несинхронної імпульсної завади в середовищі Matlab/Simulink

Для підтвердження працездатності розробленого алгоритму виявлення несинхронної ІЗ в заданих в роботі умовах була розроблена імітаційна модель в пакеті програмного забезпечення Matlab/Simulink, представлена на **рис. 3**.

Підсистема генератора комбінованої завади (**рис. 4**) містить:

- генератор імпульсних завад, що формує чотири ІЗ заданої потужності у наперед визначених елементах дозволу за дальністю для j -го та $(j-1)$ -го періодів повторення;

- генератор некорельованих завад, що генерує дві такі завади заданої потужності для j -го та $(j-1)$ -го періодів;

- генератор корельованих завад, що формує дві КЗ із заданими потужністю та модулем комплексно-го міжперіодного коефіцієнта кореляції;

- схему, яка забезпечує формування дискретної за дальністю корельованої завади потрібної протяжності у вибраних елементах дозволу.

Підсистема формувача комбінованої завади та ЧПК (**рис. 5**) формує з імпульсних, корельованих та некорельованих завад комбіновану заваду для j -го (Out2) та $(j-1)$ -го (Out3) періодів повторення, здійснює однократну черезперіодну компенсацію корельованої завади (Out4), а також готує сигнали для відображення на Scope (Out1).

Підсистема ВІЗС1 (**рис. 6**) виявляє імпульсну заваду на тлі стаціонарної завади в k -му елементі дозволу за дальністю у ковзному вікні розміром $m=9$ j -го періоду повторення, що працює за алгоритмом (14). Підсистеми ВІЗС2 та ВІЗС3 мають аналогічний вигляд і працюють, відповідно, за алгоритмами (15) та (16).

Підсистема ВІЗК1 (**рис. 7**) виявляє імпульсну заваду шляхом порівняння оцінки коефіцієнта кореляції між j -м та $(j-1)$ -м періодами повторення з порогом. Рівень логічної 1 формується на виході Out1, якщо

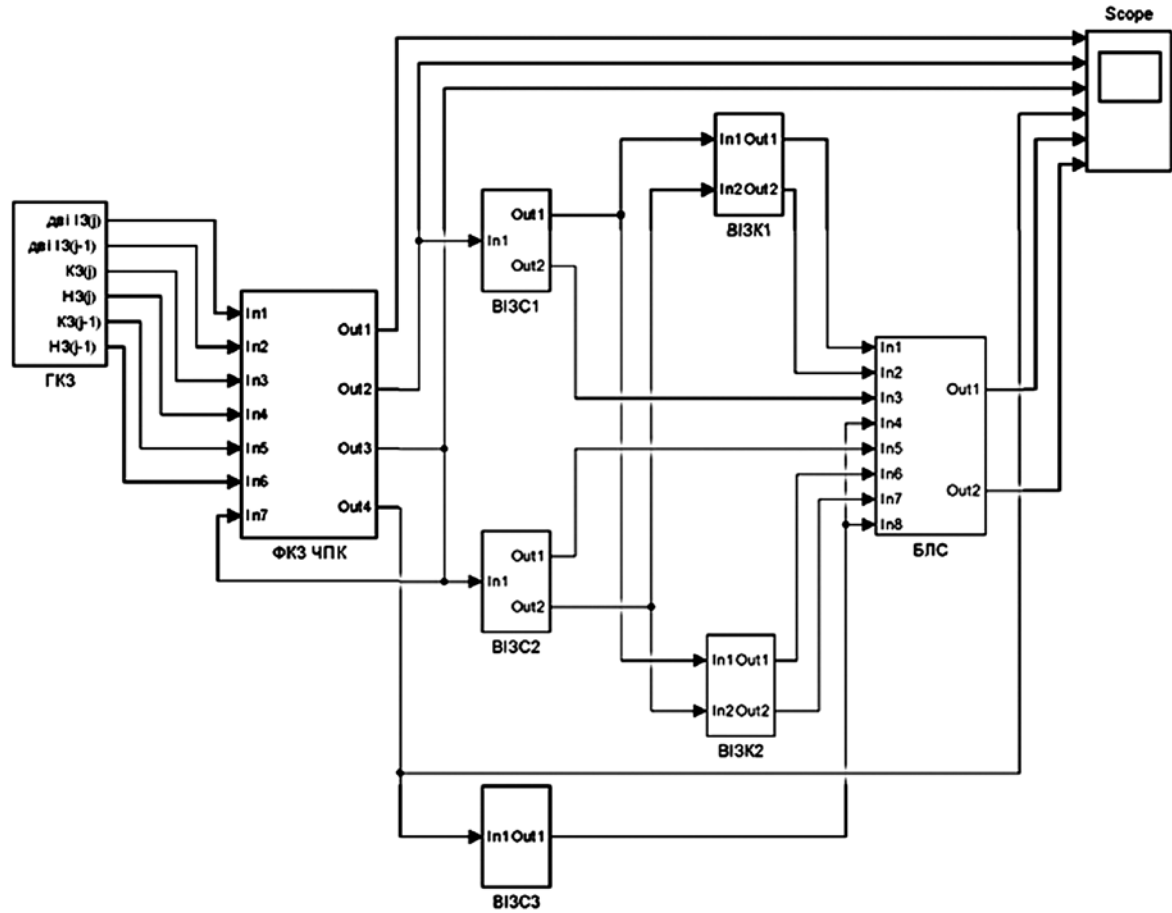


Рис. 3. Модель виявника імпульсної завади в програмі Matlab/Simulink:

ГКЗ — генератор комбінованої завади; ФКЗ ЧПК — формувач комбінованої завади для j -го та $(j-1)$ -го періодів повторення та черезперіодної компенсації; ВІЗС1...ВІЗС2 — блоки виявлення імпульсної завади; БЛС — блок логічних сполучень

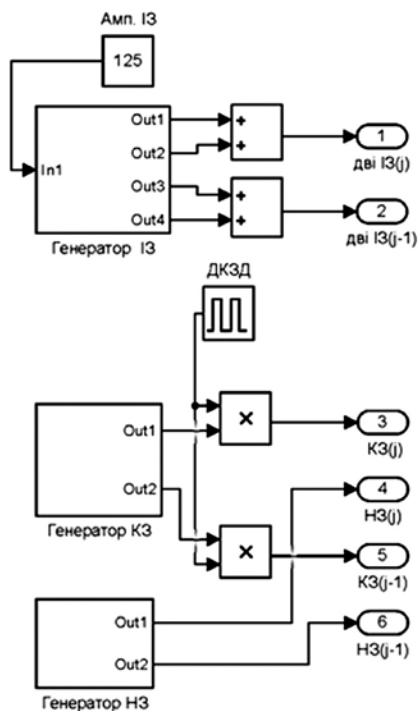


Рис. 4. Підсистема генератора комбінованої завади

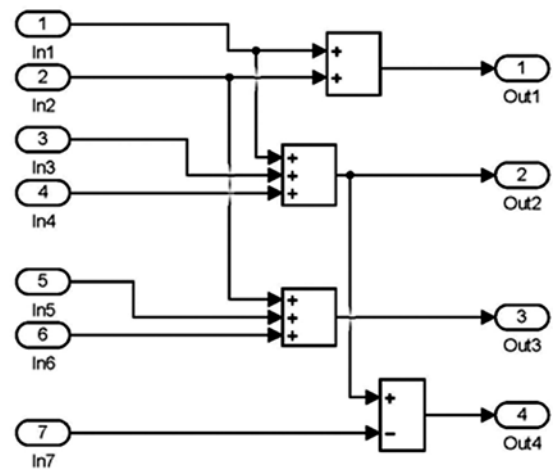


Рис. 5. Підсистема формувача комбінованої завади та черезперіодної компенсації

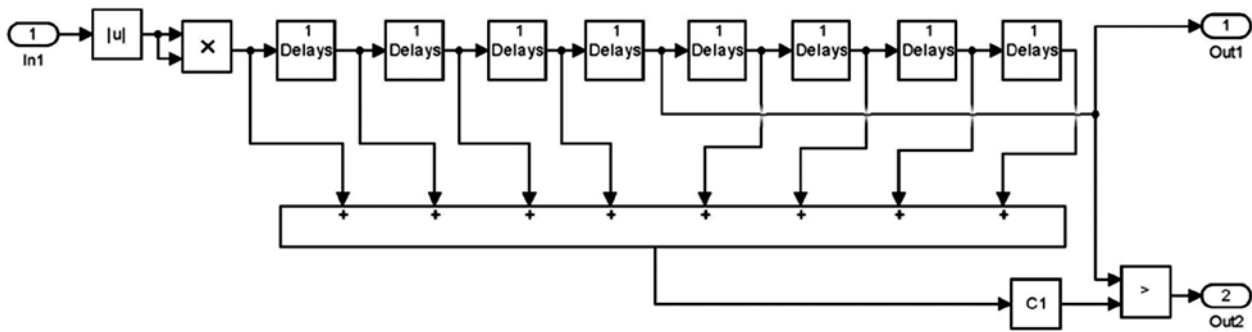


Рис. 6. Підсистема VI3C1

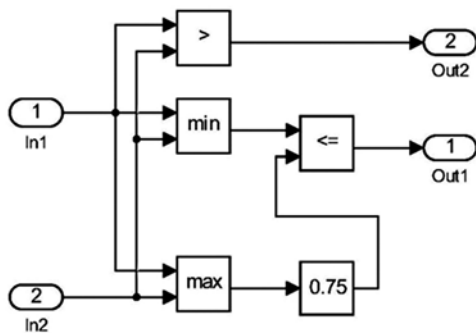


Рис. 7. Підсистема VI3K1

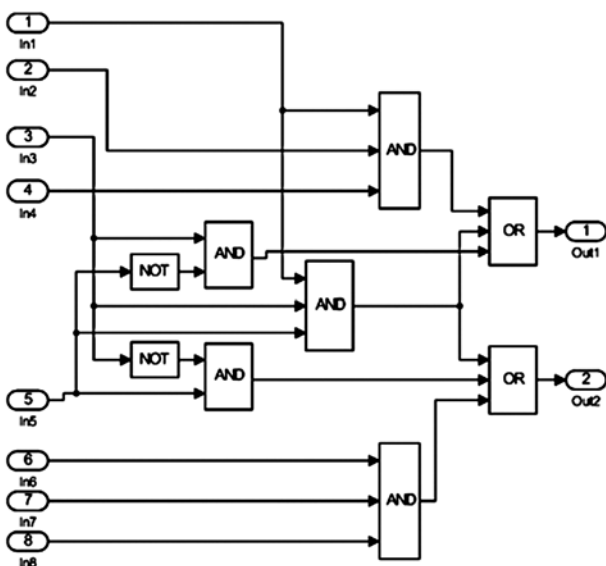


Рис. 8. Підсистема блока логічних сполучень

виконується умова (11), на виході Out2 — якщо рівень сигналу у j -му періоді перевищує рівень у $(j-1)$ -му. Підсистема VI3K2 має аналогічний вигляд, а рівень логічної 1 з'являється на її виході Out2, якщо I3 діє у $(j-1)$ -му періоді повторення.

Підсистема блока логічних сполучень (рис. 8) працює за алгоритмом, описаним вище. Рівень логічної 1

формується на виході Out1, якщо I3 виявлено в аналізованому елементі в j -му періоді повторення, на виході Out2 — якщо у $(j-1)$ -му періоді.

Результати моделювання

З метою перевірки ефективності роботи запропонованого виявника імпульсних завад було проведено моделювання його роботи в середовищі Matlab/Simulink. Розглядалося 2000 елементів роздільної здатності за дальністю у двох сусідніх періодах повторення. У кожному з цих елементів діяла некорельована завада з гаусовою щільністю розподілу ймовірностей, а в елементах з 800 по 960 і з 1600 по 1760 — ще й корельована завада також з гаусовою щільністю розподілу, відношенням її потужності до потужності некорельованої завади $\lambda_{\text{КН}} = 40$ дБ та модулем комплексного міжперіодного коефіцієнту кореляції $r = 0,99$. Елементи з номерами 875, 1300 першого періоду повторення та елементи 400, 1670 другого періоду уражались імпульсною завадою з величиною $\lambda_{\text{ІН}}$ в діапазоні 42...60 дБ. Розмір “ковзного вікна” дорівнював $m = 9$.

Отримані результати показують, що при $\lambda_{\text{ІН}} > 50$ дБ розроблений пристрій та той, що реалізує алгоритм на рис. 1, мають практично однакову ефективність виявлення імпульсних завад. Однак зі зменшенням $\lambda_{\text{ІН}}$ (наприклад, через обмеження динамічного діапазону приймального тракту РТС) при однаковій частоті помилкового виявлення імпульсної завади точність пропонованого пристрою значно вища.

На рис. 9 наведено сигнали з осцилографа Scope (див. рис. 3), згенеровані у контрольних точках моделі ВІЗ при $\lambda_{\text{ІН}} = 42$ дБ. Дослідження показали, що для розробленого ВІЗ відносна частота правильного виявлення дорівнювала 0,98, тоді як для порівнюваного пристрою вона становила 0,68.

Зауважимо, що робота виявника в умовах, коли один і той самий елемент дозволу по дальності знає впливу хаотичної імпульсної завади одночасно в двох сусідніх періодах повторення, не розглядалася

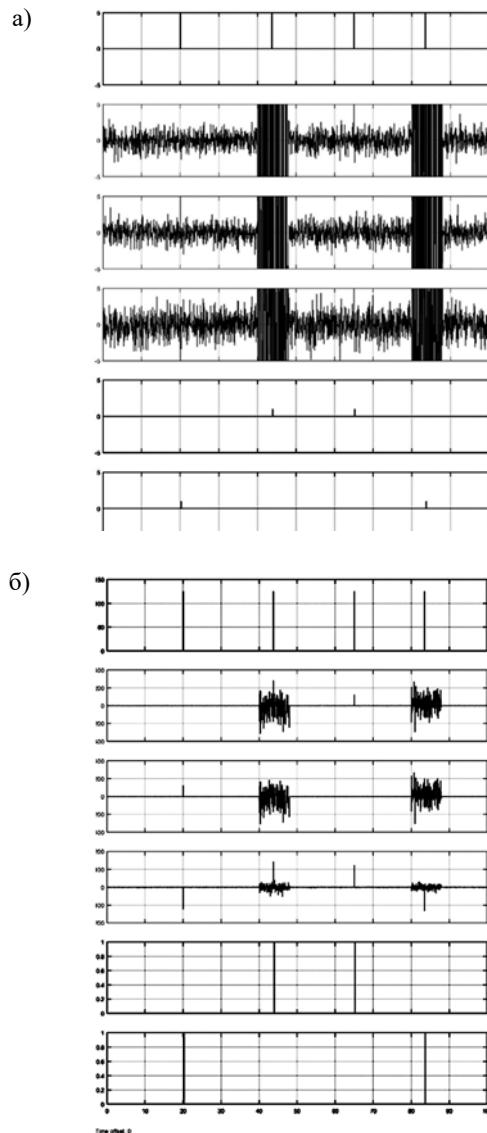


Рис. 9. Сигнали з осцилографа Scope, отримані без оптимізації (а) та після оптимізації (б) масштабу осей

через апіорне припущення про низьку ймовірність виникнення такої ситуації.

Висновок

Таким чином, показано, що розроблений алгоритм виявлення несинхронної імпульсної завади забезпечує ефективну ідентифікацію елементів дозволу за дальністю навіть в умовах складної завадової обстановки, зокрема за наявності адитивної суміші некорельованої та корельованої завад. Структурна схема виявника імпульсної завади з блоком її визначення на виході системи однократної черезперіодної компенсації дозволяє реалізувати алгоритм в апаратному вигляді з урахуванням обмежень на динамічний діапазон приймального тракту РТС. Імітаційне моделювання в середовищі Matlab/Simulink підтвердило

працездатність запропонованого рішення та дозволило визначити параметри завад, за яких ефективність розробленого виявника перевищує ефективність розглянутого аналога.

Отримані результати свідчать про доцільність застосування розробленого алгоритму при проектуванні когерентно-імпульсних радіолокаційних систем виявлення сигналів від рухомих цілей на тлі адитивної суміші імпульсної, некорельованої та дискретної за дальністю корельованої завад.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Скольник М.И. *Радиолокация: Справочник*. М.: Техносфера, 2007. 1352 с.
2. Ширман Я.Д., Багдасарян С.Т., Маляренко А.С. *Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория: Справочник*. Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
3. Бакулев П.А. *Радиолокационные системы*. М.: Радиотехника, 2004. 320 с.
4. Melvin W. L., Scheer J. A., Eds., *Principles of Modern Radar: Advanced Techniques*. Edison: SciTech Publishing, IET, 2013. 846 p.
5. Richards M.A. *Fundamentals of Radar Signal Processing*. New York: McGraw-Hill Education, 2014. 618 p.
6. Diao P.S., Alves T., Poussot B., Azarian S. A review of radar detection fundamentals. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2024, vol. 39, no. 9, pp. 4–24. <https://doi.org/10.1109/MAES.2022.3177395>
7. Леховицкий Д.И., Рябуха В.П., Семеняка А.В. и др. Защита когерентно-импульсных РЛС от комбинированных помех. 1. Разновидности систем ПВОС и их предельные возможности. *Вестн высших учебных заведений. Радиоэлектроника*, 2019, т. 62, № 7, с. 380–412. <https://doi.org/10.20535/S002134701907001X>
8. Попов Д.И. Оптимизация систем выявления сигналов на фоне пассивных помех. *Вісник НТУУ «КПІ». Радіотехніка, радіоапаратобудування*, 2017, № 68, с. 33–37. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/22840>
9. Zhou Z., Wei G., Liu X. и др. Noise and Gaussian clutter background descending dimensional subspace signal detector. *IEEE SENSORS*, Vienna, 2023, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/SENSORS56945.2023.10324948>
10. Dulek B. On GLRT-based detection of one-sided composite signal in unimodal noise. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, vol. 59, no. 1, pp. 695–700. <https://doi.org/10.1109/TAES.2022.3188595>
11. Chen C., Xu W., Pan Y. et al. A nonparametric approach to signal detection in non-Gaussian noise. *IEEE Signal Processing Letters*, 2022, vol. 29, pp. 503–507. <https://doi.org/10.1109/LSP.2022.3143031>
12. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. *Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем*. М.: Сов. радио, 1977. 432 с.
13. Абрамович Ю.И., Горохов А.Ю. К оценке скорости сходимости адаптивных фильтров компенсации помех с персимметрической корреляционной матрицей. *Радиотехника и электроника*, 1993, т. 38, № 1, с. 101–111.
14. Баранов П.С., Цевух І.В., Давидов Д.С. Алгоритм поочередной компенсации различных перешкодок. *Праці Одеського політехнічного університету*, 2004, № 1(21), с. 1–3. Режим доступу: <https://pratsi.op.edu.ua/index.php/pratsi/issue/archive>
15. Цевух І.В., Синяков Д.О. Алгоритм когерентно-некогерентної обробки радіосигналів в умовах комплексу помех *Труди 18-ї МНПІК «Сучасні інформаційні та електронні техно-*

логії», Україна, Одеса, 2019, с. 30–31. Режим доступу: <https://old.tkea.com.ua/siet/archive/2019/10.pdf>

16. Цевух І.В., Сакович А.А., Безруков Л.В. Обнаружитель импульсной помехи на фоне аддитивной смеси некоррелированной и дискретной по дальности коррелированной гауссовых помех. *Труди 20-ї МНПК «Сучасні інформаційні та електронні технології»*, Україна, Одеса, 2021, с. 11–12. Режим доступу: <https://old.tkea.com.ua/siet/archive/2021/11-13.pdf>

17. Цевух І.В., Сакович А.А., Карпенко О.С. Моделирование алгоритма выявления импульсной завады для системы селекции рухомих цілей. *Труди 21-ї МНПК «Сучасні інформаційні та електронні технології»*, Україна, Одеса, 2022, с. 14–15. Режим доступу: <https://old.tkea.com.ua/siet/archive/2022/14-15.pdf>

Дата надходження рукопису
до редакції 10.02 2025 р.

DOI: 10.15222/TKEA2025.3-4.22
UDC 621.396.965.621.391.26

Igor TSEVUKH, Anastasiya SAKOVICH

Ukraine, Odessa Polytechnic National University
E-mail: itsevukh@opu.edu.ua

DETECTOR OF ASYNCHRONOUS PULSE NOISE IN CONDITIONS OF ADDITIVE MIXTURE OF UNCORRELATED AND DISCRETE IN RANGE CORRELATED GAUSSIAN NOISE

One of the main requirements for radio engineering systems is their ability to withstand high levels of noise in complex, changing and a priori unknown noise environments. Improving the noise immunity of radar systems and the means of radio electronic warfare requires the development of effective noise protection systems with high information content that can operate in the presence of complex, heterogeneous interference. To identify a range-resolution element affected by non-synchronous pulsed noise, an algorithm for detecting pulsed noise has been developed. The algorithm can function effectively in conditions involving an additive mixture of uncorrelated and powerful, discrete in range correlated noise in the presence of restrictions on the dynamic range of the receiving path of the radar system. A structural diagram of a pulsed noise detector has been developed, which additionally includes a block for determining this noise at the output of a single-shot system of over-periodic compensation. To confirm the performance of the developed detector of non-synchronous pulsed interference in the conditions of an additive mixture of uncorrelated and discrete-range correlated Gaussian interference, a simulation model was developed in the Matlab&Simulink software package. The study confirmed the performance of the developed algorithm within the constraints of the dynamic range, and determined the parameters of the additive mixture of pulsed, uncorrelated and correlated interference for which the efficiency of the proposed detector exceeds that of existing detectors. The results obtained can be used to design of coherent-pulsed radar systems for detecting signals from moving targets in complex interference environments.

Keywords: detection algorithm, impulse noise, dynamic range, mixture of correlated and uncorrelated noise.

REFERENCES

- [1] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2008.
- [2] Ya. D. Shirman, S. T. Bagdasaryan, and A. S. Malyarenko, *Radioelektronnye sistemy. Osnovy postroeniya i teoriya: Spravochnik* [Radioelectronic Systems. Basics of Construction and Theory: Handbook], Ya. D. Shirman, Ed. Moscow, Russia: Radiotekhnika, 2007. (in Russian)
- [3] P. A. Bakulev, *Radiolokatsionnye sistemy* [Radar Systems], Moscow, Russia: Radiotekhnika, 2004. (in Russian)
- [4] W. L. Melvin, and J. A. Scheer, Eds., *Principles of Modern Radar: Advanced Techniques*, vol. 2. Edison, NJ, USA: SciTech Publishing; Stevenage, U.K.: IET, 2013. doi:10.1049/SBRA020E
- [5] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, 2nd ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2014.
- [6] P. S. Diao, T. Alves, B. Poussot, and S. Azarian, “A review of radar detection fundamentals,” *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 39, no. 9, pp. 4–24, Sept. 2024. doi: 10.1109/MAES.2022.3177395.
- [7] Д. И. Леховицкий, В. П. Рябуха, А. В. Семеняка, Д. В. Атаманский, and Е. А. Катюшин, “Защита когерентно-импульсных РЛС от комбинированных помех. 1. Разновидности систем ПВОС и их предельные возможности” [Protection of Coherent-Pulse Radars from Combined Interference. Part 1: Types of PVOS Systems and Their Limitations], *Известия*
- высших учебных заведений. *Радиоэлектроника*, vol. 62, no. 7, pp. 380–412, Jul. 16, 2019. doi: 10.20535/S002134701907001X. (in Russian)
- [8] D. I. Popov, “Optimizatsiya system vyyavleniya signaliv na foni pasyvykh pomekh” [Optimization of Signal Detection Systems Against Passive Interference], *Visnyk NTUU “KPI”. Radiotekhnika, radioaparobuduvannya*, no. 68, pp. 33–37, 2017. Available: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/22840> (in Ukrainian)
- [9] Z. Zhou, G. Wei, X. Liu et al., “Noise and Gaussian clutter background descending dimensional subspace signal detector,” in *Proc. IEEE SENSORS*, Vienna, Austria, 2023, pp. 1–4. doi: 10.1109/SENSORS56945.2023.10324948.
- [10] B. Dulek, “On GLRT-based detection of one-sided composite signal in unimodal noise,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 59, no. 1, pp. 695–700, 2023. doi: 10.1109/TAES.2022.3188595.
- [11] C. Chen, W. Xu, Y. Pan et al., “A nonparametric approach to signal detection in non-Gaussian noise,” *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 29, pp. 503–507, 2022. doi: 10.1109/LSP.2022.3143031.
- [12] V. G. Repin, and G. P. Tartakovskiy, *Statisticheskiy sintez pri apriornoy neopredelennosti i adaptatsiya informatsionnykh sistem* [Statistical Synthesis Under A Priori Uncertainty and Adaptation of Information Systems]. Moscow, Russia: Sovetskoye radio, 1977. (in Russian)

[13] Yu. I. Abramovich, and A. Yu. Gorokhov, "K otsenke skorosti skhodimosti adaptivnykh filtrov kompensatsii pomekh s persimmetricheskoy korrelyatsionnoy matritsey" [On the Convergence Rate of Adaptive Filters for Interference Compensation with Persymmetric Correlation Matrix], *Radiotekhnika i elektronika*, vol. 38, no. 1, pp. 101–111, 1993. (in Russian)

[14] P. Ye. Baranov, I. V. Tsevukh, and D. Ye. Davydov, "Algoritm poocheerednoy kompensatsii riznoridnykh pereshkod," [Sequential Compensation Algorithm for Heterogeneous Interference], in *Proc. of Odessa Polytechnic University*, no. 1(21), pp. 1–3, 2004. [Online]. Available: <https://pratsi.op.edu.ua/index.php/pratsi/issue/archive>

[15] I. V. Tsevukh, and D. O. Sinyakov, "Coherent–noncoherent processing algorithm for radio signals under complex interference," in *Proc. 18th ISPC "Modern Information and Electronic Technologies"*,

Odesa, Ukraine, 2019, pp. 30–31. [Online]. Available: <https://old.tkea.com.ua/siet/archive/2019/10.pdf> (in Russian)

[16] I. V. Tsevukh, A. A. Sakovich, and L. V. Bezrukov, "Impulse interference detector against additive mixture of uncorrelated and range-discrete correlated gaussian noise," in *Proc. 20th ISPC "Modern Information and Electronic Technologies"*, Odesa, Ukraine, 2021, pp. 11–12. Available: <https://old.tkea.com.ua/siet/archive/2021/11-13.pdf> (in Russian)

[17] I. V. Tsevukh, A. A. Sakovich, and O. S. Karpenko, "Pulse noise detection algorithm for moving target selection systems," in *Proc. 21st ISPC "Modern information and electronic technologies"*, Odesa, Ukraine, 2022, pp. 14–15. Available: <https://old.tkea.com.ua/siet/archive/2022/14-15.pdf> (in Ukrainian)



Copyright: © 2025, The author(s). Licensee: Politekhperiodika, Odesa, Ukraine. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).