

Ігор ЦЕВУХ, Анастасія САКОВИЧ

Україна, Національний університет «Одеська політехніка»

E-mail: itsevukh@op.edu.ua

ОДНОКАНАЛЬНИЙ ЗА ДОПЛЕРІВСЬКОЮ ЧАСТОТОЮ ВИЯВНИК ПАКЕТУ КОГЕРЕНТНИХ ДРУЖНО ФЛУКТУЮЧИХ ІМПУЛЬСІВ В УМОВАХ ГАУСОВИХ ЗАВАД

Розроблено одноканальний за доплерівською частотою сигнал виявник пакету дружно флуктуючих імпульсів в умовах адитивної суміші корельованої (пасивної) та некорельованої (шумової) гаусових завад. Синтезований алгоритм є оптимальним за усередненими по фазі сигналу критеріями відношення правдоподібності та максимуму “показника якості виявлення”. Наведено результати порівняльного аналізу ефективності розробленого алгоритму та потенційної ефективності алгоритму, що формує статистику Готелінга, за указаними критеріями для різних спектрально-кореляційних параметрів адитивної суміші корельованої та некорельованої завад.

Ключові слова: відношення правдоподібності, дружні флуктуації, корельована та некорельована гаусові завади, показник поліпшення, адитивна суміш завад.

Однією з основних вимог до радіолокаційних систем є висока завадозахищеність в умовах складної та апріорно невідомої завадової обстановки. При цьому останнім часом актуалізувалася задача виявлення на малій висоті малорозмірних цілей в умовах високої інтенсивності паразитних відбитків від підстильної поверхні. Вплив таких завад проявляється у придушенні та маскуванні сигналів, відбитих від об'єкта, що спостерігається. Водночас інтенсивність корельованих завад може істотно перевищувати рівень власних шумів приймача та корисного сигналу від цілі, що ускладнює радіолокаційне спостереження, а іноді робить його взагалі неможливим [1–3]. Ще однією проблемою є висока вартість сучасних радіолокаційних систем спостереження, які реалізують складні оптимальні багатовимірні алгоритми. Через це вони не можуть широко використовуватися у випадках, коли необхідно розгорнути мережу радарів задля гарантування повного перекриття контрольованих зон. Тому мобільні радіолокатори, що реалізують простіші, квазіоптимальні алгоритми виявлення, на сьогодні являють собою привабливе та економічне розв'язання цієї проблеми.

Відомо [3, 4], що ефективні системи обробки корисного сигналу на тлі завад необхідно синтезувати з використанням тесту відношення правдоподібності. Отримані таким чином алгоритми певною мірою мінімізують ризик, пов'язаний із застосуванням неправильних рішень, що є важливим при побудові систем, на виході яких приймається рішення про наявність/відсутність у вихідному процесі корисного сигналу. Для гаусових моделей сигналу та завад синтезована у такий спосіб структура оптимального виявника визначається достатньою статистикою [5, 6]

$$l = X^* \theta X, \quad (1)$$

де X — N -мірний вектор вхідного процесу;

θ — матриця обробки, $\theta = [B_3^{-1} - (B_C + B_3)^{-1}]$;

B_C, B_3 — коваріаційні матриці, відповідно, сигналу та завади;

$*$ — знак комплексного спряження та транспонування.

Застосування оптимального алгоритму (1) для розв'язання радіолокаційних задач ускладнюється неможливістю достатньо обґрунтувати завдання ймовірнісних або навіть спектрально-кореляційних характеристик сигналу та завади, а також вимоги до реалізації алгоритмів у реальному масштабі часу зі збереженням їхньої стійкості до асимптотично оптимальних рішень [6, 7]. Так, типовою умовою роботи радіолокаційних систем виявлення є апріорна невизначеність щодо швидкості цілі. Використання в цьому випадку критерію Неймана–Пірсона передбачає багатоканальну побудову виявника з подальшим відбором максимального значення вирішальної статистики. Однак для наближення робочих характеристик таких алгоритмів до оптимальних потрібна наявність великої кількості каналів обробки, що збільшує обчислювальні витрати та ускладнює їх використання на практиці. У [8–12] наведено приклади реалізації спрощених з погляду обчислювальної складності алгоритмів виявлення корисного сигналу в умовах завад як у класі параметричних структур, так і непараметричних. Доцільно знати, якою мірою запропоновані квазіоптимальні алгоритми поступаються оптимальним у своєму класі за ефективністю для можливих моделей сигналу та завад на вході системи.

Для низки радіотехнічних додатків допустимим виявляється застосування замість оптимальної багатоканальної системи обробки спрощеної одноканальної за доплерівською частотою корисного сигналу системи. Крім того, у радіолокаційній практиці досить широко використовується модель пакету гаусових дружно флюктуючих імпульсів* з нульовим вектором середніх значень та невідомою матрицею коваріації.

Метою цієї роботи є синтез одноканального за доплерівською частотою оптимального виявника гаусового сигналу на тлі адитивної суміші некорельованої та корельованої гаусових завад в умовах обмежень на дружні флюктуації імпульсів в пакеті.

Синтез алгоритму обробки

Представимо матрицю, зворотну сумі коваріаційних матриць для прийнятих моделей сигналу та завади:

$$(B_C + B_3)^{-1} = (\sigma_c^2 S S^* + B_3)^{-1} = B_3^{-1} - \frac{\sigma_c^2 B_3^{-1} S S^* B_3^{-1}}{1 + \sigma_c^2 S^* B_3^{-1} S}, \quad (2)$$

де $B_C = \sigma_c^2 S S^*$

S^* — N -мірний вектор дружно флюктуючого пакету імпульсів, $S^* = [1, e^{-j\varphi_c}, e^{-j2\varphi_c}, \dots, e^{-j(N-1)\varphi_c}]$;

σ_c^2, φ_c — потужність та фаза сигналу відповідно.

Перетворимо вираз (1) з урахуванням (2) так:

$$l = X^* \left(B_3^{-1} - B_3^{-1} + \frac{\sigma_c^2 B_3^{-1} S S^* B_3^{-1}}{1 + \sigma_c^2 S^* B_3^{-1} S} \right) X = \frac{\sigma_c^2}{1 + \sigma_c^2 S^* B_3^{-1} S} X^* B_3^{-1} S S^* B_3^{-1} X.$$

З точністю до несуттєвих констант, що входять до порогу виявлення, отримаємо:

$$l = X^* B_3^{-1} S S^* B_3^{-1} X = |X^* B_3^{-1} S|^2, \quad (3)$$

Ігноруючи роздільну здатність за доплерівською частотою і припускаючи рівномірну щільність розподілу фази сигналу φ_c в інтервалі $(0, 2\pi)$, запишемо

$$c = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \theta(\varphi_c) d\varphi_c = X^* B_3^{-1} I B_3^{-1} X^*, \quad (4)$$

де I — одинична матриця розміром $N \times N$.

Представимо (4) у вигляді

$$c = X^* B_3^{-2} X. \quad (5)$$

Синтезований алгоритм (5), оптимальний за критерієм усередненого по φ_c відношення правдоподібності, збігається з алгоритмом, отриманим у [14] для гаусових сигналу та завад без обмеження на дружні флюктуації корисного сигналу та в припущенні, що

*У пакеті дружно флюктуючих імпульсів зміна амплітуди є однаковою для всіх імпульсів, і пачка може розглядатися як один складний сигнал з початковою фазою та амплітудою, що випадково змінюються [13, с. 247].

рівень сигналу малий у порівнянні з рівнем корельованих завад.

Відомо також [15], що для гаусових моделей сигналу та завад оптимізація алгоритму виявлення може бути зведена до максимізації величини γ — так званого показника якості виявлення сигналу:

$$\gamma = \frac{M(\lambda/1) - M(\lambda/0)}{\delta^{1/2}(\lambda/0)}, \quad (6)$$

де $M(\lambda/1), M(\lambda/0), \delta^{1/2}(\lambda/0)$ — умовні математичні очікування та середньоквадратичне відхилення статистики $\lambda = X^* Q X$ з деякою матрицею обробки Q за наявності $(\lambda/1)$ та відсутності $(\lambda/0)$ корисного сигналу.

Для матриці обробки $Q = [B_3^{-1} - (B_C + B_3)^{-1}]$ умовні моменти розподілу ймовірностей статистики λ :

$$M(\lambda/0) = \text{Tr}(Q B_3), \quad M(\lambda/1) = \text{Tr}[Q(B_C + B_3)],$$

$$\delta(\lambda/0) = \text{Tr}[(Q B_3)^2],$$

де $\text{Tr}[\square]$ — слід матриці.

Тоді для прийнятої моделі корисного сигналу показник γ можна представити у вигляді

$$\gamma = \frac{\text{Tr}(Q S S^*)}{\sqrt{\text{Tr}(Q B_3)^2}}.$$

Відмовляючись від роздільної здатності за доплерівською частотою і припускаючи рівномірну щільність розподілу фази сигналу в інтервалі $(0, 2\pi)$, отримаємо

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \gamma(\varphi_c) d\varphi_c = \frac{\text{Tr} Q}{\sqrt{\text{Tr}(Q B_3)^2}}.$$

Таким чином, завдання синтезу одноканальної системи обробки в класі нелінійних структур зводиться до вибору матриці обробки Q , що максимізує $\bar{\gamma}$.

Використовуючи нерівність Коші – Буняковського – Шварца, запишемо

$$\frac{\text{Tr} Q}{\sqrt{\text{Tr}(Q B_3)^2}} \leq \sqrt{\text{Tr}(Q B_3^{-1})^2}. \quad (7)$$

Рівність у формулі (6) досягається при

$$Q = (B_3^{-1})^2 = B_3^{-2}. \quad (8)$$

Тоді достатню статистику можна надати у вигляді

$$\bar{\gamma} = X^* B_3^{-2} X. \quad (9)$$

Порівнюючи вирази (5) і (9), можна побачити, що для прийнятих у роботі моделей сигналу та завад алгоритм (5), крім сказаного вище, є також оптимальним за критерієм максимуму усередненого по φ_c показника якості виявлення.

В умовах коли апріорна невизначеність спектрально-кореляційних характеристик завади має характер параметричної одним зі шляхів її подолання є

використання адаптивного підходу Байєса [16]. У нашому випадку це зводиться до заміни в виразах (5) і (9) коваріаційної матриці завади B_3 оцінкою максимальної правдоподібності

$$\hat{B}_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i X_i^*,$$

де X_i — n -мірний вектор вибіркового відліку вхідного процесу;

n — обсяг навчальної вибірки.

Тоді для виявлення гаусових дружно флуктуючих сигналів на тлі гаусових завад з невідомими кореляційними властивостями вирішальну статистику можна записати у вигляді

$$C^2 = X^* \hat{B}_3^{-2} X. \quad (10)$$

У [17] для випадку виявлення когерентного сигналу з невідомою амплітудою та випадковою початковою фазою на тлі гаусової завади з невідомими кореляційними властивостями запропоновано використовувати статистику Готелінга

$$T^2 = X^* \hat{B}_3^{-1} X. \quad (11)$$

Цей алгоритм, як показано у [17, 18], є оптимальним за критерієм Неймана – Пірсона для перевірки гіпотези H_0 : X належить гаусовому розподілу $G(0, B_3)$ (тільки завада), проти альтернативи H_1 : вибірка належить гаусовому розподілу $G(\mu, B_3)$, $\mu \neq 0$ (завада + сигнал) для невідомої коваріаційної матриці завади B_3 та скінченного обсягу вибірки n .

Аналіз ефективності синтезованого алгоритму обробки

Проведемо порівняльний аналіз потенційної ($n \rightarrow \infty$) ефективності двох нелінійних одноканальних систем виявлення корисного сигналу, що реалізують статистики (10) та (11) в умовах адитивної сумиш некорельованої та корельованої гаусових завад.

При $n \rightarrow \infty$ алгоритм (10) можна подати у вигляді

$$t^2 = X^* B_3^{-1} X, \quad (12)$$

і тоді при $n \rightarrow \infty$ порівнюватимуться ефективності алгоритмів (5) і (12), які мають вигляд квадратичної форми (1) з різними матрицями обробки. Зазначимо, що знання виду розподілу квадратичного функціоналу (КФ) (1) дозволяє при радіолокаційному спостереженні об'єкта вирішувати низку практично важливих завдань, таких як обчислення ймовірностей правильного виявлення і помилкової тривоги для забезпечення необхідних показників якості розв'язуваної задачі; вибір потрібних порогів прийняття рішення; керування тривалістю процесу прийняття рішення при використанні послідовних вирішальних правил тощо.

У [19] було отримано точний аналітичний вираз для функції розподілу ймовірностей КФ від стаціонарного гаусового процесу. Запропонована методика, заснована на обчисленні значень характеристич-

ної функції у площині комплексної змінної за допомогою теорії відрахувань, характеризується складністю реалізації та є обмежено придатною у разі наявності близьких за величиною власних чисел матриці θ . У [20] замість точних аналітичних виразів запропоновано спосіб обчислення законів розподілу КФ комплексних гаусових векторів шляхом їх інтегральних уявлень, що чисельно інтегруються стандартними функціями математичних програм сучасних комп'ютерів.

У цій нашій роботі для визначення ймовірнісних характеристик порівнюваних алгоритмів використувався метод статистичного моделювання.

Дослідження ефективності алгоритмів, що реалізують статистики (5) і (12), а також порівняння їх з ефективністю оптимальної процедури (3), коли фаза сигналу, що виявляється, відома і дорівнює $\varphi_c = \pi$, проведемо за ймовірнісними показниками — ймовірністю правильного виявлення корисного сигналу D при заданій ймовірності F помилкової тривоги залежно від відношення сигнал/завада q на вході системи. При проведенні досліджень враховувалося, що конкретний вид елементів коваріаційної матриці завади залежить від виду апроксимації її спектральної щільності та нормованої ширини $\Delta f T$ (де Δf — ширина спектра завади, T — період повторення радіолокаційної системи). Міжперіодні коефіцієнти кореляції завади, які є функцією від $\Delta f T$, обчислювалися залежно від форми спектра флуктуацій за формулами:

— для гаусової

$$r_{ji} = \exp \left\{ -\frac{\pi^2}{2,3} \Delta f^2 T^2 (j-i)^2 \right\};$$

— для резонансної

$$r_{ji} = \exp \left\{ -\frac{2\pi}{3} \Delta f T |j-i| \right\}.$$

Зазначимо, що гаусова та резонансна апроксимації спектральної щільності завади відповідають граничним випадкам швидкого та повільного спаду спектру.

На рис. 1 представлено залежності ймовірності правильного виявлення корисного сигналу D від відношення сигнал/завада q , розраховані методом статистичного моделювання для указаних параметрів. Моделювання проводилося для пасивних завад гаусової ($\beta = 1$) або резонансної ($\beta = 2$) форми спектра флуктуацій при значеннях модуля першого міжперіодного коефіцієнта кореляції $R_1 = 0,99$ та $R_1 = 0,95$. Кожна точка характеристик була отримана у серії з 10 000 незалежних випробувань.

З рис. 1 видно, що для об'єкта, який знаходиться на швидкості, що відповідає $\varphi_c = \pi$, ефективність одноканального за доплерівською частотою сигналу алгоритму (5) за ймовірнісними характеристиками для вибраних параметрів сигналу і корельованої завади у всьому діапазоні досліджуваних відношень

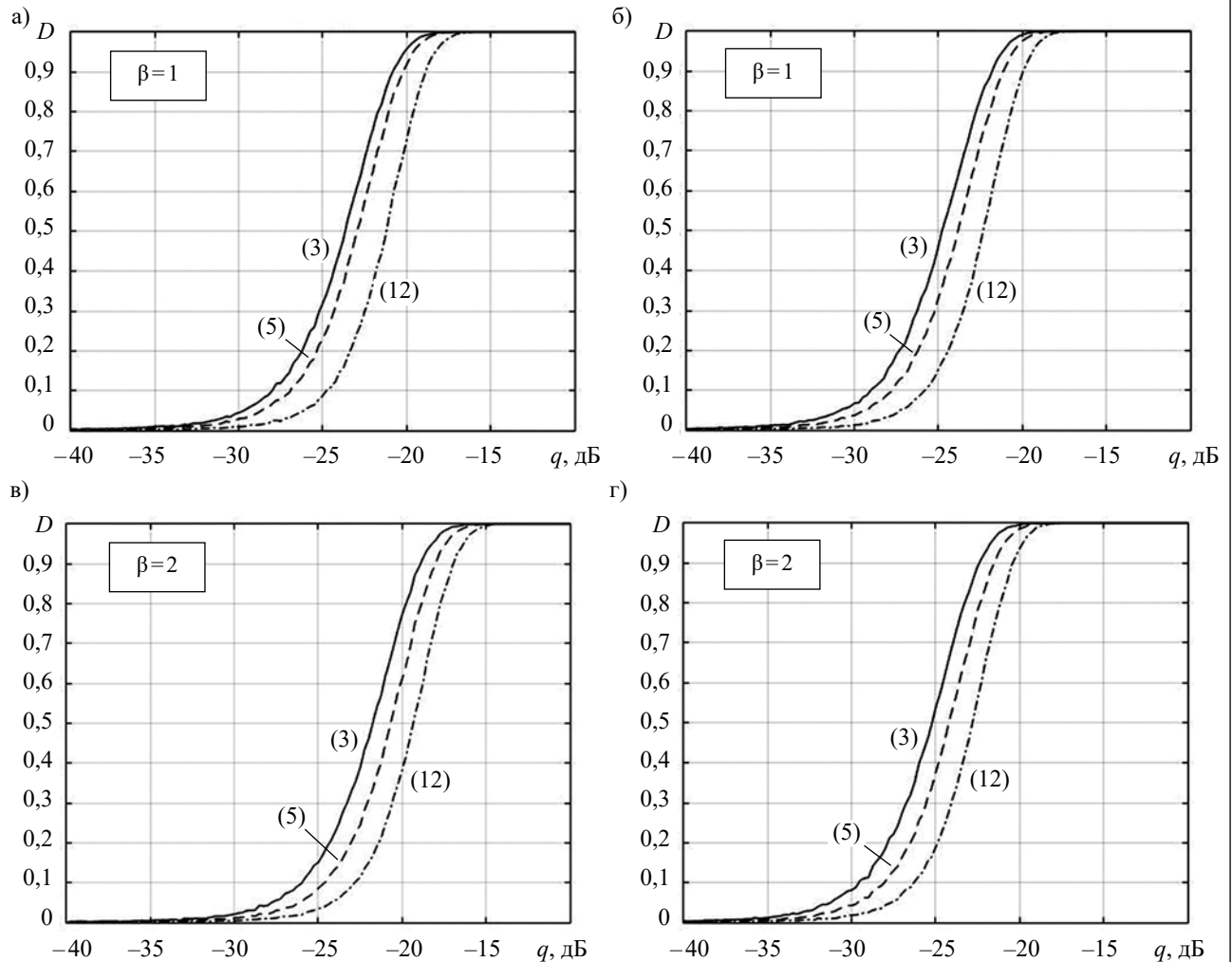


Рис. 1. Залежність ймовірності правильного виявлення корисного сигналу алгоритмів (3), (5) і (12) від відношення сигнал/завада q на вході системи при $F=10^{-3}$, $N=4$, $\varphi_c=\pi$, $\alpha=-30$ дБ для різних завадових ситуацій:

a — $R_1=0.99$, $\beta=1$; $б$ — $R_1=0.95$, $\beta=1$; $в$ — $R_1=0.99$, $\beta=2$; $г$ — $R_1=0.95$, $\beta=2$

сигнал/некорельована завада є вищою, ніж алгоритму (12), який також є інваріантним до доплерівської фази сигналу, але поступається, що зрозуміло, ефективності алгоритму (3), для якого фаза корисного сигналу заздалегідь відома.

На **рис. 2** наведено результати моделювання потенційної ($n \rightarrow \infty$) ефективності алгоритмів (5) і (12) за ймовірнісними показниками для тих самих завадових ситуацій, що і на **рис. 1**, при певному відношенні сигнал/завада q залежно від фази φ_c корисного сигналу, що змінюється в діапазоні від 0 до π . Рівень відношення сигнал/завада для покращення інформативності графіків задавався різним в інтервалі $-20 \dots -5$ дБ. Кожна точка характеристик була отримана в серії з 10000 незалежних випробувань.

З **рис. 2** видно, що на характер представлених залежностей впливає швидкість спаду (форма спектра флуктуацій β) та нормована ширина спектра завади $\Delta f T$ (модуль першого міжперіодного коефіцієнта кореляції R_1), і при невеликих значеннях фази корисного сигналу в умовах малої ширини $\Delta f T$ алгоритм

(5) може поступатися в ефективності алгоритму, що формує статистику (12), на 10 – 15%.

Зважаючи на описану поведінку D , становить інтерес порівняння ефективності алгоритмів (5) і (12) за якимсь інтегрованим показником. В [21] для порівняльного аналізу ефективності виявників з класу нелінійних структур запропоновано використати усереднений за всіма можливими радіальними швидкостями цілі “показник поліпшення” P_F , що являє собою частку від ділення значення відношення сигнал/завада на виході нелінійної системи до його значення на вході. В [21] показано, що показник поліпшення нелінійної одноканальної системи виявлення сигналу в умовах гаусових завад, що реалізує алгоритм (5), має вигляд

$$P_{FC} = \text{Tr} B_3^{-2} / (\text{Tr} B_3^{-1}), \quad (13)$$

а системи, що реалізує алгоритм (12):

$$P_{FT} = \text{Tr} B_3^{-1} / N.$$

На **рис. 3** наведено дані для порівняльного аналізу ефективності алгоритмів (5) і (12) за показником

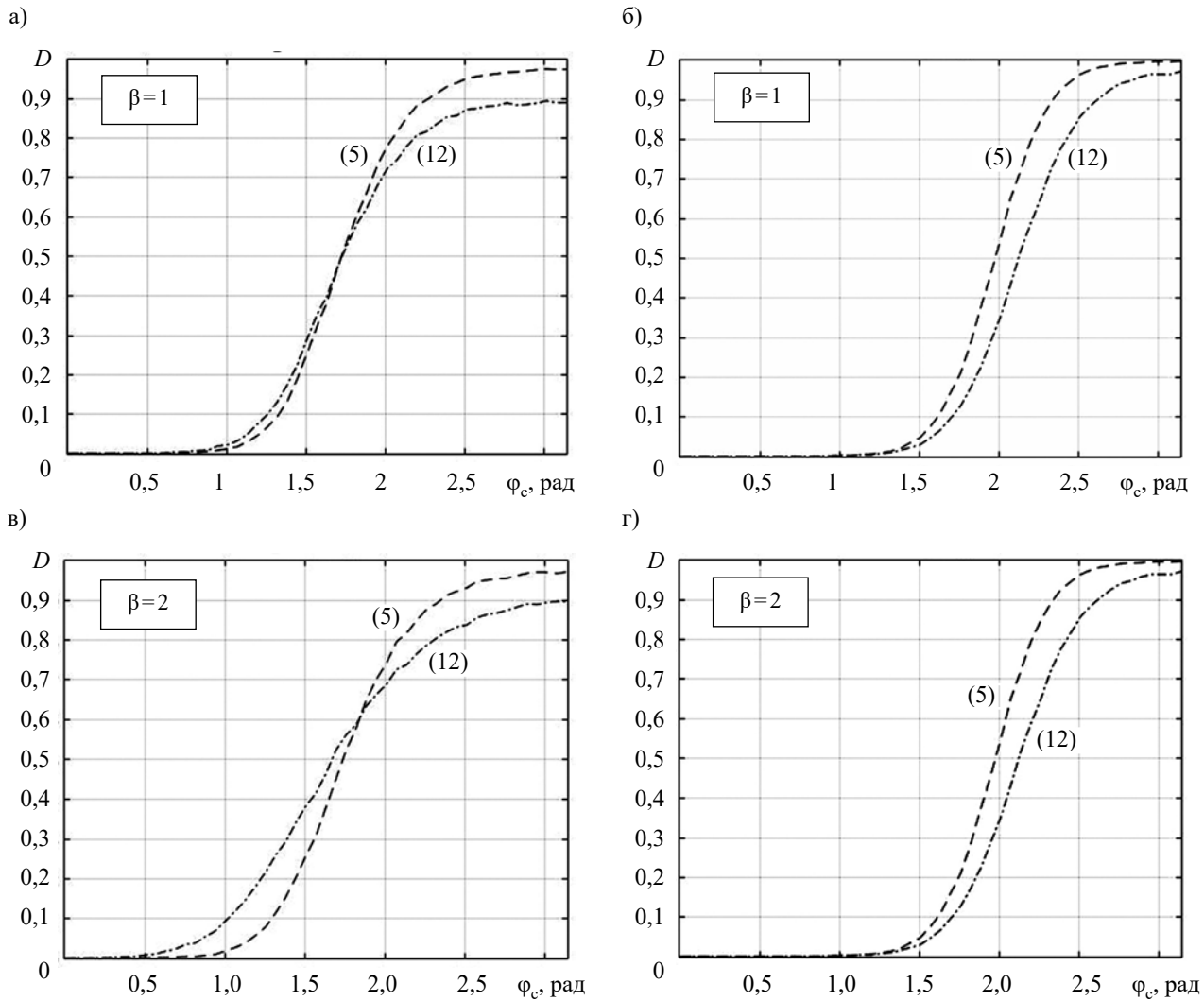


Рис. 2. Залежність ймовірності правильного виявлення корисного сигналу алгоритмів (5) і (12) від фази сигналу при $F=10^{-3}$, $N=4$, $\alpha=-30$ дБ для різних завадових ситуацій:

а — $R_1 = 0.99$, $\beta = 1$, $q = -20$ дБ; б — $R_1 = 0.95$, $\beta = 1$, $q = -18$ дБ; в — $R_1 = 0.99$, $\beta = 2$, $q = -12$ дБ; г — $R_1 = 0.95$, $\beta = 2$, $q = -5$ дБ

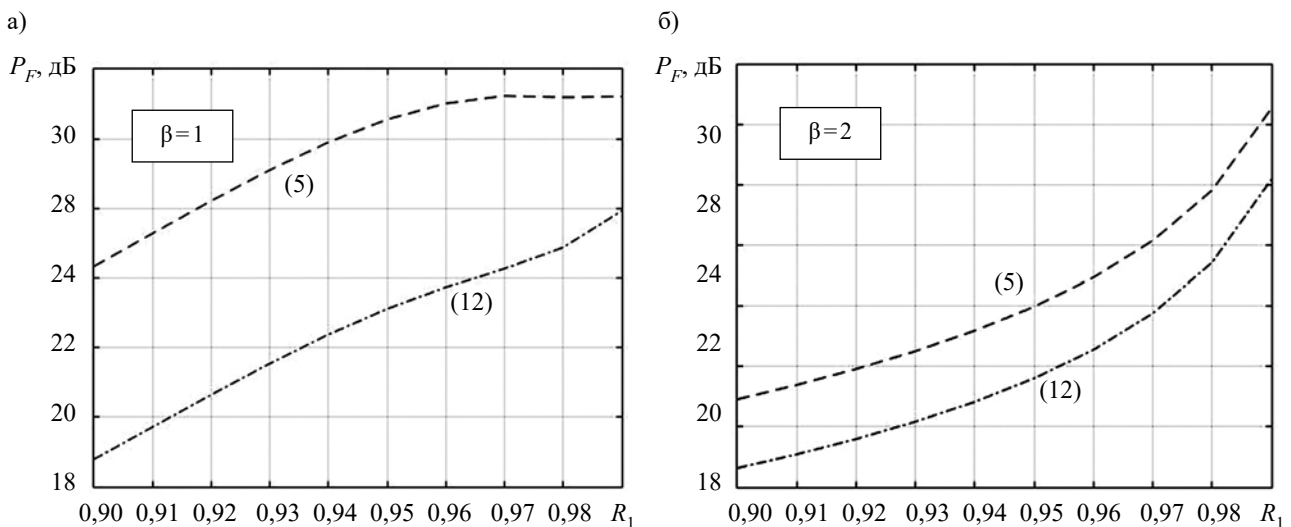


Рис. 3. Залежність показника поліпшення алгоритмів (5) і (12) від модуля першого міжперіодного коефіцієнта кореляції при $F=10^{-3}$, $N=4$, $\alpha=-30$ дБ для корельованої завади гаусової (а) та експоненціальної (б) форми спектру флуктуацій

поліпшення залежно від параметрів адитивної суміші некорельованої та корельованої завад, коли остання має гаусову або резонансну форму спектру флуктуацій. Тут видно, що в обох цих випадках для використаних параметрів завад потенційна ефективність алгоритму (5) за показником поліпшення є вищою, ніж (12), у всьому розглянутому діапазоні значень R_1 .

Висновок

Таким чином, розроблено та досліджено одноканальний за доплерівською частотою виявник гаусового сигналу на тлі адитивної суміші некорельованої та корельованої гаусових завад в умовах обмежень на дружні флуктуації імпульсів в пакеті. Доведено, що цей алгоритм є оптимальним за двома усередненими по фазі сигналу φ_c критеріями, такими як відношення правдоподібності та максимум показника якості виявлення, а також є інваріантним до доплерівських зрушень фази сигналу.

Дослідження дозволили встановити параметри сигналу та адитивної суміші некорельованої та корельованої завад, за яких потенційна ефективність розробленого алгоритму перевищує ефективність алгоритму, що реалізує відому статистику Готелінга, як за ймовірнісними характеристиками, так і за показником поліпшення, усередненим за всіма можливими радіальними швидкостями цілі.

Отримані результати дозволяють визначити теоретичну межу удосконалення реальних систем розглянутого класу та напрямки пошуку нових систем для практичного застосування. Зокрема, вони можуть бути використані для аналізу ефективності при проектуванні когерентно-імпульсних радіолокаційних систем виявлення сигналів рухомих цілей на тлі адитивної суміші некорельованої та корельованої завад.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

- Skolnik M. I. *Radar Handbook*. New York: McGraw — Hill, 2008, 1352 p.
- Melvin W. L., Scheer J. A. *Principles of Modern Radar: Advanced Techniques*. New York: SciTech Publishing, IET, Edison, 2013, 846 p.
- Richards M. A. *Fundamentals of Radar Signal Processing, Second Edition*. New York: McGraw — Hill Education, 2014, 618 p.
- 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>
- Besson O., Chaumette E., Vincent F. Adaptive detection of a Gaussian signal in Gaussian noise, *2015 IEEE 6th International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP)*, Cancun, Mexico, 2015, pp. 117–120, <https://doi.org/10.1109/CAMSAP.2015.7383750>
- Liu W., Liu J., Hao C. et al. Multichannel adaptive signal detection: Basic theory and literature review. *Science China: Information Sciences*, 2022, vol. 65, 121301. <https://doi.org/10.1007/s11432-020-3211-8>
- Zhou Z., Wei G., Liu X. et al. Noise and Gaussian clutter background descending dimensional subspace signal detector, *2023 IEEE SENSORS, Vienna, Austria*, 2023, pp. 1–4, <https://doi.org/10.1109/SENSORS56945.2023.10324948>
- 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>
- 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>
- Чмельов В. О., Терещенко О. В., Олійник М. В. Спосіб декореляції сигналів пасивних завад в системі селекції рухомих цілей малої швидкості. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2024, вип. 2, с. 109–115. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-173-2-109-115>
- Altunin S., Bondariev A., Maksymiv I. Simulation of artillery ballistic station, *2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv, Ukraine, 2024, pp. 68–71, <https://doi.org/10.1109/TCSET64720.2024.10755634>
- Lekhovytskyi D. I., Riabukha V. P., Semeniaka A. V. et al. Protection of coherent pulse radars against combined interferences. 1. Modifications of STSP systems and their ultimate performance capabilities. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2019, vol. 62, no. 7, pp. 311–341. <https://doi.org/10.3103/S073527271907001X>
- Финкельштейн М. И. *Основы радиолокации: Учебник для вузов*. М.: Радио и связь, 1983. 536 с.
- Цевух И. В. Алгоритм обработки гауссовых сигналов в условиях гауссовых помех. *Радиоэлектроника*, 1988, № 12, с. 53–54.
- Monzingo R. A., Haupt R. L., Miller T. W. *Introduction to Adaptive Arrays*, 2011, 543 p. <https://doi.org/10.1049/SBEW046E>
- Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М.: Советское радио, 1977. 432 с.
- Бартенев В. Г., Шлома А. М. О построении адаптивного обнаружителя импульсных сигналов на фоне нормальных помех с неизвестными корреляционными свойствами. *Радиоэлектроника*, 1988, № 2, с. 3–8.
- Averochkin V. O., Troyanskiy O. V. the hotelling detector using quadrature channels decorrelation. *Proceedings of the Odessa Polytechnic University*, 2014, vol. 1(43), pp. 225–229. Режим доступу: <https://www.semanticscholar.org/reader/9b30f121a8a42dca536197a559e943f523d33d0f> (дата звернення 26.02.2025)
- Проскурин В. И. Распределение вероятностей квадратичного функционала от гауссовского случайного процесса. *Радиотехника и электроника*, 1985, т. 30, № 7, с. 1335–1340.
- Леховицкий Д. И., Флексер П. М., Полишко С.В. О вычислении законов распределения квадратичных форм комплексных нормальных векторов. *Прикладная радиоэлектроника*, 2011, т. 10, № 4, с. 456–462. Режим доступу: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/9a7b5117-411e-4916-8214-7fbb58ede5ce/content> (дата звернення 26.02.2025)
- Цевух И. В., Сакович А. А., Цевух В. И. Показник поліпшення нелінійних одноканальних систем обробки сигналу в умовах гаусових завад. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2023, № 1–2, с. 9–13. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.1-2.09>

Дата надходження рукопису
до редакції 05.02 2025 р.

SINGLE-CHANNEL DOPPLER FREQUENCY DETECTOR OF COHERENT SYNCHRONOUSLY FLUCTUATING SIGNAL PACKETS UNDER GAUSSIAN NOISE

The need to further simplify the systems for detecting useful signals against a background of complex noises calls for the development of simple algorithms subject to certain restrictions on the detector structure and the type of input signal.

This article presents the developed optimal detection algorithm invariant to Doppler phase shifts of the signal for the class of single-channel Doppler frequency detectors of a Gaussian signal against the background of an additive mixture of uncorrelated and correlated Gaussian noises and under restrictions on synchronous fluctuations of pulses in a packet. The authors prove that the synthesized algorithm is optimal according to the criterion of the likelihood ratio averaged over the signal phase φ_c , as well as according to the criterion of the maximum of the "detection quality indicator" averaged over φ_c when solving the problem of detecting a Gaussian signal that fluctuates synchronously under Gaussian noise. The authors prove that the synthesized algorithm is optimal according to the criterion of the signal phase-averaged likelihood ratio,

A comparative analysis of the efficiency of the developed algorithm with the efficiency of the optimal multi-channel algorithm for a completely defined signal and with the potential efficiency of the algorithm forming the Hotelling statistics for various spectral-correlation parameters of the additive mixture of correlated and uncorrelated noise, both in terms of probabilistic characteristics — the probability of correct detection at a given probability of false alarm depending on the signal / uncorrelated noise ratio at the input of the system, and in terms of the "improvement index", which is the fraction of the signal/noise ratio at the output of the nonlinear system to the signal/noise ratio at its input, averaged over all possible radial velocities of the target. The research established the parameters of the signal and the additive mixture of uncorrelated and correlated noise for which the potential efficiency of the developed algorithm turns out to be higher than the efficiency of the algorithm implementing the known Hotelling statistics.

The obtained results allow us to determine the theoretical limit of improvement of real systems of this class and directions of search for new systems for practical application. In particular, they can be used to analyze the efficiency in designing coherent-pulse radar systems for detecting signals of moving targets against the background of an additive mixture of uncorrelated and correlated noises.

Keywords: likelihood ratio, sufficient statistics, synchronous fluctuations, correlated and uncorrelated noise, improvement index, additive mixture of noise.

REFERENCES

1. Skolnik M. I. *Radar Handbook*. New York: McGraw — Hill, 2008, 1352 p.
2. Melvin W. L., Scheer J. A. *Principles of Modern Radar: Advanced Techniques*. New York : SciTech Publishing, IET, Edison, 2013, 846 p.
3. Richards M. A. *Fundamentals of Radar Signal Processing, Second Edition*. New York : McGraw — Hill Education, 2014, 618 p.
4. 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>
5. Besson O., Chaumette E., Vincent F. Adaptive detection of a Gaussian signal in Gaussian noise, *2015 IEEE 6th International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP)*, Cancun, Mexico, 2015, pp. 117–120, <https://doi.org/10.1109/CAMSAP.2015.7383750>
6. Liu W., Liu J., Hao C. et al. Multichannel adaptive signal detection: Basic theory and literature review. *Science China: Information Sciences*, 2022, vol. 65, 121301. <https://doi.org/10.1007/s11432-020-3211-8>
7. Zhou Z., Wei G., Liu X. et al. Noise and Gaussian clutter background descending dimensional subspace signal detector, *2023 IEEE SENSORS*, Austria, Vienna, 2023, pp. 1–4, <https://doi.org/10.1109/SENSORS56945.2023.10324948>
8. 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>
9. 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>
10. Chmelov V. O., Tereshchenko O. V., Oliinyk M. V. Decorrelation method for passive interference signals in the selection system of slow-moving targets, *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, 2024, no. 2, pp. 109–115. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-173-2-109-115> (Ukr)
11. Altunin S., Bondariev A., Maksymiv I. Simulation of artillery ballistic station, *2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv, Ukraine, 2024, pp. 68–71, <https://doi.org/10.1109/TCSET64720.2024.10755634>
12. Lekhovytskyi D. I., Riabukha V. P., Semeniaka A. V. et al. Protection of coherent pulse radars against combined interferences. 1. Modifications of STSP systems and their ultimate performance capabilities. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2019, vol. 62, no. 7, pp. 311–341. <https://doi.org/10.3103/S073527271907001X>
13. Finkelstein M. I. [Osnovy radiolokatsii: Uchebnik dlya vuzov] *Basics of Radar*, M.: Radio i svyaz', 1983. 536 p. (Rus)

14. Tsevkukh I. V. An algorithm of the gaussian signal-processing in the presence of gaussian interference. *Radioelectronics*, 1988, no. 12, c. 53–54. (Rus)
15. Monzingo R. A., Haupt R. L., Miller T. W. *Introduction to Adaptive Arrays*, 2011, 543 p. <https://doi.org/10.1049/SBEW046E>
16. Repin V. G., Tartakovsky G. P. *Statisticheskiiy sintez pri apriornoy neopredelennosti i adaptatsiya informatsionnykh sistem* [Statistical synthesis under a priori uncertainty and adaptation of information systems]. M.: Sov. radio., 1977, 432 p. (Rus)
17. Bartenev V. G., Shloma A. M. [On the construction of an adaptive detector of impulse signals against the background of normal noise with unknown correlation properties]. *Radiotekhnika*, 1978, no. 2, pp. 3–8. (Rus)
18. Averochkin V. O., Troyanskiy O. V. the hotelling detector using quadrature chennals decorrelation. *Proceedings of the Odessa Polytechnic University*, 2014, vol. 1(43), pp. 225–229. Available at: <https://www.semanticscholar.org/reader/9b30f121a8a42dca536197a559e943f523d33d0f> (accessed 26.02.2025)
19. Proskurin V. I. [Probability distribution of a quadratic functional from a Gaussian random process]. *Radiotekhnika i elektronika*, 1985, no. 7, pp. 1335–1340. (Rus)
20. Lekhovitskiy D.I., Flekser P.M., Polishko S.V. On calculation of distribution laws of quadratic forms of random complex Gaussian vectors. *Applied Radio Electronics*, 2011, vol. 10, no. 4, pp. 456–462. Available at: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/9a7b5117-411e-4916-8214-7fbb58ede5ce/content> (accessed 26.02.2025) (Rus)
21. Tsevkukh I. V., Sakovich A. A., Tsevkukh V. I. Index of improvement of nonlinear single-channel signal detection systems under Gaussian noise. *Technology and design in electronic equipment*, 2023, no. 1–2, pp. 9–13. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.1-2.09> (Ukr)



Copyright: © 2025 by the authors. 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/>).