

УДК 621.396.965.621.391.26

С.В. Полішко

Національний університет оборони України, Київ

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ОПТИМАЛЬНОЇ МІЖПЕРІОДНОЇ ОБРОБКИ ГАУСІВСЬКИХ СИГНАЛІВ ТА ДЕЯКИХ ВІДХИЛЕНЬ ВІД ОПТИМАЛЬНОЇ ОБРОБКИ

Аналізуються потенційні можливості виявлення когерентних і некогерентних сигналів в системі міжперіодної обробки (МПО) імпульсних радіотехнічних систем (РТС) при певних умовах сигнально-перешкодової обстановки. Показано вплив вибору кратності міжперіодної компенсації перешкод на якість МПО.

Ключові слова: кореляційна матриця, некогерентне накопичення, міжперіодна обробка, перешкоди.

Вступ

Аналіз літератури і постановка задачі. Однією із важливих задач широкого класу імпульсних РТС (в тому числі і радіолокаційних станцій військового призначення) є виявлення сигналів повітряних цілей, що рухаються, на фоні пасивних перешкод різноманітного фізичного походження.

Частіше за все вона вирішується за рахунок використання спектрально-кореляційних відмінностей відбитих корисних і перешкодових сигналів в системах міжперіодної обробки (МПО).

В опублікованих раніше роботах [1 – 4] були розглянуті оптимальні за критерієм Неймана-Пірсона і квазіоптимальні алгоритми виявлення гаусівських когерентних (дружнофлюктуючих) сигналів на фоні гаусівських пасивних перешкод. Однак, складні геометричні розміри цілей, що рухаються, ділянки неоднорідностей атмосфери, іонізовані утворення і т.д., що зустрічаються на шляху розповсюдження сигналів, приводять до трансформації і зміни ступеню когерентності випроміненого РЛС когерентного сигналу. МПО в цьому випадку зводиться до обробки частково когерентних або повністю некогерентних (швидкофлюктуючих) корисних сигналів. Показники якості виявлення частково когерентних сигналів є проміжними і знаходяться в діапазоні характеристик виявлення граничних випадків обробки когерентних і некогерентних сигналів, які (з цієї точки зору) є найбільш цікавими.

Мета статті – проведення аналізу показників якості обробки в оптимальних системах МПО гаусівських когерентних і некогерентних сигналів на фоні гаусівських ПЗ з априорі відомими статистичними характеристиками. Установка меж діапазону зміни показників якості виявлення гаусівських сигналів з довільною отупінню когерентності з використанням загальної методики розрахунку показників якості як для оптимальних так і для квазіоптимальних систем МПО [6]. Аналіз їх ефективності при відхиленні від повної кратності міжперіодної компенсації перешкод.

Основний матеріал

А. Вхідним впливом системи МПО, що аналізується, є M -мірні вектори (пачки)

$$\mathbf{u}_\gamma = \left\{ u_\ell^{(\gamma)} \right\}_{\ell=1}^M = \mathbf{y} + \gamma \cdot \mathbf{s}, \quad \gamma = 0, 1 \quad (1)$$

комплексних амплітуд коливань, прийнятих в M суміжних періодах зондування із кожного елемента розрізнення за дальністю. Ці вектори представляють собою адитивну суміш незалежних M -мірних векторів (пачок) комплексних амплітуд перешкоди $\mathbf{y} = \{y_\ell\}_{\ell=1}^M$ і, можливо (при $\gamma = 1$), корисного сигналу $\mathbf{s} = \{s_\ell\}_{\ell=1}^M$.

При цьому M -мірний комплексний вектор перешкоди $\mathbf{y} = \{y_\ell\}_{\ell=1}^M$ вважається нормальним (гаусівським) з нульовим середнім і кореляційною матрицею (КМ) Φ , тобто

$$\mathbf{y} \sim \text{CN}(0, \Phi), \quad \bar{y} = 0, \quad \overline{\mathbf{y} \cdot \mathbf{y}^*} = \Phi, \quad (2)$$

де

$$\Phi = \overline{\mathbf{y} \cdot \mathbf{y}^*} = \mathbf{I}_M + \eta \cdot \rho. \quad (3)$$

Тут і надалі: \mathbf{I}_M – одинична $M \times M$ матриця, що має сенс КМ вектора взаємно незалежних власних шумів з однаковою (одичною) дисперсією компонент в M суміжних періодах зондування, η – вхідне енергетичне відношення перешкода/шум (ВЗШ), $\rho = \{\rho_{ij}\}_{i,j=1}^M$ – нормована ($\rho_{ii} = 1, i \in 1, M$) КМ міжперіодних флюктуацій зовнішньої перешкоди.

Комплексний M -мірний вектор некогерентної пачки (з незалежними (“швидкими”) флюктуаціями імпульсів пачки з однаковими дисперсіями $h_i = h, i \in 1, M$) корисного сигналу $\mathbf{s} = \{s_\ell\}_{\ell=1}^M$ також вважається нормальними (гаусівським) із наступними статистичними характеристиками:

$$\mathbf{s} \sim \text{CN}(0, \Phi_s), \quad (4)$$

де $\Phi_s = \left\{ \phi_{ij}^{(s)} \right\}_{i,j=1}^M = \overline{\mathbf{s} \cdot \mathbf{s}^*} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{h} \cdot \mathbf{X}^* = \mathbf{h} \cdot \mathbf{I}_M;$ (5)

$$\text{rank}(\Phi_s) = M,$$

при цьому коефіцієнти взаємної кореляції імпульсів пачки

$$\rho_{ij}^{(s)} = \left| \phi_{ij}^{(s)} \right| / \sqrt{\phi_{ii}^{(s)} \cdot \phi_{jj}^{(s)}} = 0, \quad (6)$$

$$i \neq j, \quad i, j \in 1, M.$$

В той же час для когерентного сигналу \mathbf{s} (когерентної $\dot{\mathbf{I}}$ - мірної пачки «дружньо» флюктуючих імпульсів з випадковою амплітудою і початковою фазою)* КМ має вигляд

$$\Phi_s = \mathbf{h} \cdot \mathbf{x}_\ell \cdot \mathbf{x}_\ell^*, \quad \text{rank}(\Phi_s) = 1. \quad (7)$$

В цих формулах:

- $\mathbf{X} = \{ \mathbf{x}_\ell \}_{\ell=1}^M$ - $M \times M$ - матриця, що складається з M - мірних векторів \mathbf{x}_ℓ амплітудно-фазових розподілів (АФР) імпульсів пачки M когерентних складових некогерентного корисного сигналу.

- $\mathbf{h} = \text{diag} \{ h_\ell \}_{\ell=1}^M$ - діагональна $M \times M$ матриця відносних інтенсивностей h_ℓ цих когерентних складових (далі \mathbf{h}).

В умовах адитивності (1) суміші сигналу і перешкоди та їх взаємної незалежності випадковий вхідний вектор системи МПО теж вважається нормальним (гаусівським) з нульовим середнім і кореляційною матрицею:

$$u_\gamma \sim \text{CN}(0, \Phi_\gamma),$$

$$\Phi_\gamma = \overline{u_\gamma \cdot u_\gamma^*} = \begin{cases} \Phi_0 = \Phi, & \gamma = 0, \\ \Phi_1 = \Phi_0 + \Phi_s, & \gamma = 1. \end{cases} \quad (8)$$

Відомо [5], що в умовах, які розглядаються (2), (4) оптимальна за критерієм Неймана-Пірсона передпорогова статистика вхідного сигналу (1) з точністю до скалярного множника c дорівнює квадратичній формі:

$$\xi_\gamma = c u_\gamma^* \mathbf{L} u_\gamma, \quad \gamma = 0, 1 \quad (9)$$

з "рішальною" матрицею

$$\mathbf{L} = \{ l_{ij} \}_{ij=1}^M = \Psi_0 - \Psi_1, \quad \text{rank}(\mathbf{L}) = M, \quad (10)$$

$$\Psi_\gamma = \Phi_\gamma^{-1}, \quad \gamma = 0, 1.$$

Ця матриця має сенс матричної імпульсної характеристики (МІХ) системи МПО. Структура і параметри цієї матриці повністю визначають структуру і параметри відповідної системи МПО і тим самим її потенційні можливості.

Б. Потенційні можливості оптимального виявлення сигналів на фоні пасивних перешкод. Розглянемо статистичні характеристики виявлення оптимальної обробки (9) повністю некогерентної прямокутної пачки швидко флюктуючих імпульсів (4) (штрихові криві на рис. 1, 2) та прямокутної пачки

когерентного сигналу (з випадковою амплітудою і відомою фазою), що характеризується матрицею (7), з постійним періодом T , при оптимальній швидкості руху цілі $V_r = V_{r\text{opt}}$ (суцільні криві на рис.1, 2).

Графіки побудовані при умові наявності перешкод з гаусівською ($p \rightarrow \infty$) і експоненційною ($p \rightarrow 1$) кореляційними функціями (КФ). Параметр p - це порядок процесу авто регресії (АР), яким, як відомо [6], зручно описати спектри перешкод, що моделюються в роботі.

Результати розрахунку ефективності міжперіодної обробки, що проводиться для АР-перешкод з гаусівською ($p \rightarrow \infty$) та експоненційною ($p = 1$) КФ встановлюють межі, в яких лежить ефективність МПО в умовах перешкод, що апроксимуються АР-процесами інших порядків з унімодальними спектрами міжперіодних флуктуацій.

Матриця \mathbf{L} оптимальної обробки некогерентного сигналу може бути представлена [5, 6]:

$$\mathbf{L} = \Psi(\mathbf{I}_1 + \mathbf{h}\Psi)^{-1} \Psi = \mathbf{R} \cdot \mathbf{R}^*. \quad (11)$$

Матриця \mathbf{L} оптимальної обробки когерентного сигналу може бути представлена [5]:

$$\mathbf{L} = \Psi \mathbf{x} = \mathbf{H}^* \mathbf{H} \mathbf{x} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{R}^*, \quad \mathbf{R} = \Psi \mathbf{x} = \mathbf{H}^* \mathbf{H} \mathbf{x}. \quad (12)$$

Методика розрахунку наведених в статті статистичних характеристик розкрита в [7] і проводиться за допомогою щільності розподілу:

$$p_{\xi_\gamma}(x) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^\infty A(t) \cdot \cos(xt) dt =$$

$$= \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^\infty B(t) \sin(xt) dt, \quad x \geq 0; \quad p_\xi(x) = 0, \quad x < 0, \quad (13)$$

де

$$A(t) = \mathbf{R}(t) / (\mathbf{R}^2(t) + \mathbf{I}^2(t)), \quad (14)$$

$$B(t) = -\mathbf{I}(t) / (\mathbf{R}^2(t) + \mathbf{I}^2(t)) -$$

реальна і уявна частини детермінанту

$$|\mathbf{B}(t)| = |\mathbf{I}_n - \mathbf{j} \cdot t \cdot \tilde{\mathbf{Q}}| =$$

$$= \prod_{i=1}^n (1 - \mathbf{j} \cdot t \cdot \lambda_i) = \mathbf{R}(t) + \mathbf{j} \cdot \mathbf{I}(t), \quad (15)$$

де

$$\tilde{\mathbf{Q}}_\gamma = \mathbf{R}^* \Phi_\gamma \mathbf{R} = \begin{cases} \tilde{\mathbf{Q}}_0 = \mathbf{R}^* \Phi \mathbf{R}, & \gamma = 0, \\ \tilde{\mathbf{Q}}_1 = \tilde{\mathbf{Q}}_0 + \mathbf{R}^* \Phi_s \mathbf{R}, & \gamma = 1, \end{cases} \quad (16)$$

λ_i - елементи діагональної матриці власних чисел Λ_γ матриці:

$$\mathbf{G}_\gamma = \Phi_\gamma^{*/2} \cdot \mathbf{L} \cdot \Phi_\gamma^{1/2}. \quad (17)$$

Статистичними показниками виявлення за критерієм Неймана-Пірсона є імовірність правильного виявлення (ПВ) [1 - 4]:

* Для спрощення запису залежність сигналу від доплерівської частоти f опускається.

$$D = \int_{x_0}^{\infty} p_{\xi_1}(x) dx = 1 - \int_0^{x_0} p_{\xi_1}(x) dx \quad (18)$$

та імовірності хибної тривоги (IXТ) F [1-4]:

$$F = \int_{x_0}^{\infty} p_{\xi_0}(x) dx = 1 - \int_0^{x_0} p_{\xi_0}(x) dx \quad (19)$$

при фіксованому значенні порога x_0

Для розрахунку статистичних показників виявлення $D(h)$ рис.1, 2 оптимальної МПО когерентних та некогерентних сигналів на фоні перешкод з гауссівською КМ Φ використовуються одні і ті ж вхідні дані:

- розмірність пачки $M = 8$;
- IXТ - $F = 10^{-3}$;
- радіальна швидкість джерел перешкод - $V_{\zeta} = 0$ км/год;
- енергетичне відношення перешкода/шум - $\eta = 40$ дБ;
- вобуляція періоду зондування (для когерентного сигналу) – відсутня.

Залежність $D(h)$ на рис. 1 розрахована при коефіцієнті міжперіодної кореляції $\rho = 0.99$, а на рис. 2 – при $\rho = 0.99$.

Наведені характеристики кількісно ілюструють низку фактів, в тому числі і відомих [2, 4].

При гауссівській КФ перешкод необхідний рівень порогового сигналу істотно нижче, ніж при експоненційній (в наведених умовах – на 15÷22 дБ), що пояснюється різницею їх амплітудно-частотних спектрів у точці що відповідає оптимальній швидкості руху цілі [8]. При великих значеннях ІПВ $D \geq 0.8$ необхідний рівень порогового некогерентного сигналу h може бути нижчим за відповідний рівень когерентного [8]. Показники якості виявлення сигналів з довільною ступінню когерентності при тих же параметрах перешкод лежать у проміжках між суцільними й штриховими кривими.

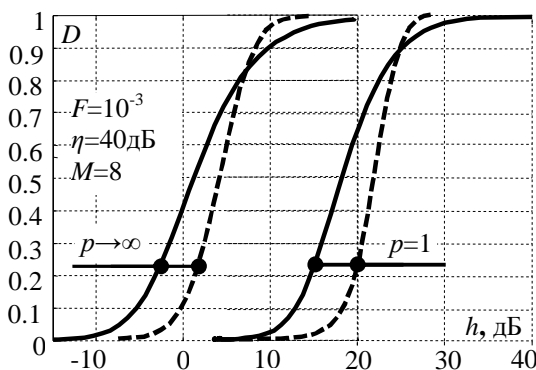


Рис. 1. Характеристики виявлення оптимальної обробки когерентних та некогерентних сигналів при $\rho=0.99$

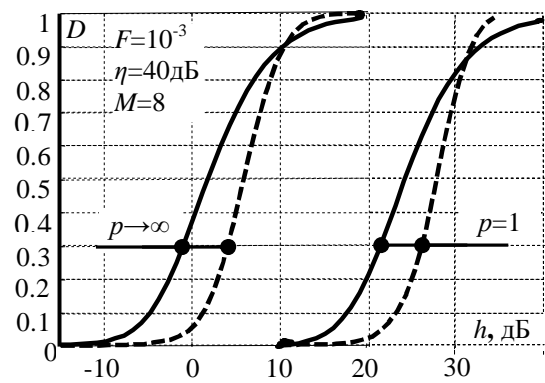


Рис. 2. Характеристики виявлення оптимальної обробки когерентних та некогерентних сигналів при $\rho = 0.96$

В. Вибір інтервала міжперіодної компенсації перешкод. Відомо [6, 7], що для практичної реалізації спрощенні варіанти оптимальної некогерентної МПО є більш простими, оскільки не вимагають наявності множини фільтрів накопичення, «перекриваючих» весь діапазон можливих швидкостей цілі. Тому, для прикладу проаналізуємо розраховані по (18, 19) та показані на рис. 3 суцільними кривими можливості обробки когерентного сигналу (7) в системі МПО з некогерентним накопиченням сигналу (9 при умові 11). Штрихова крива на рис.3 відповідає оптимальній обробці когерентного сигналу (7). Умови розрахунку кривих рис. 3 відповідають умовам кривих (рис. 1, 2) за винятком наступних параметрів: $F = 10^{-6}$, $M = 18$, $\eta = 10^5$ (50 дБ); $\rho = 0.99$. Параметр k сімейства суцільних кривих – це кількість інтервалів (кратність) міжперіодної компенсації перешкод.

Оцінимо можливості спрощення даної системи МПО – відмову [6, 7] від використання повної кратності ($k = M - 1$) на користь $1 \leq k < M - 1$.

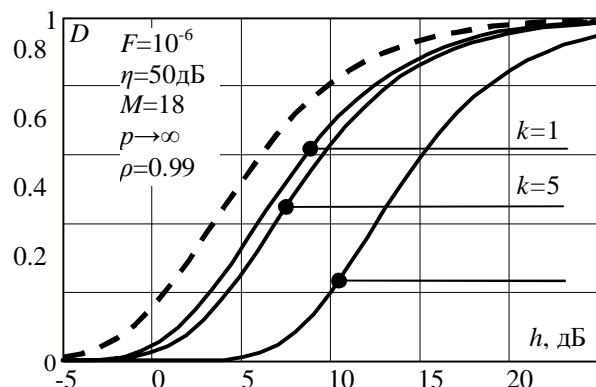


Рис. 3. Характеристики виявлення МПО з некогерентним накопиченням когерентних сигналів при різних значеннях кратності компенсації перешкод k

Як впливає із наведених результатів втрати некогерентної обробки в пороговому сигналі при $D = 0.8$ і $k = 17$ не перевищують $(2 \div 2.5)$ дБ у порівнянні з оптимальною когерентною обробкою.

В той же час при $k = 4$ ці втрати досягають ≈ 8 дБ. Крива $k = 5$ показує можливість використання резервів підвищення ефективності за рахунок збільшення кратності компенсації. Очевидно, що в цьому випадку забезпечується така ж ефективність обробки як і при $k = 17$, тобто значення $k = 5$ вичерпує резерви її підвищення.

Висновки

Показані потенційні можливості виявлення двох граничних моделей корисного сигналу визначають межі, в яких лежать показники виявлення більшості сигналів реальних цілей на фоні пасивних перешкод з гаусівською та експоненційною кореляційними функціями.

Характеристики виявлення (рис. 1, 2) не можуть бути перевищені, оскільки відповідають оптимальній обробці. Ступінь приближення до цих показників характеризує ефективність системи, що аналізується. Наведений порядок розрахунку показників якості може бути використаний для більш простих квазіоптимальних систем і має важливе практичне значення. Для деяких спрощених систем МПО такі розрахунки можуть бути розглянуті в подальшому.

Стосовно вибору параметра k необхідно відмітити, що для перешкод з параметрами, відмінними від тих, що використовувались при розрахунку в даній роботі, значення $k = 5$ може виявитись вичерпним і особливо, коли мова не йде про перешкоди з «розщепленим» спектром (наприклад, спільних віддзеркалень від землі та метеоутворень).

Крім того, з практичної точки зору корисно розглядати значення k для більш простих системи МПО - з некогерентним накопиченням сигналу на виході обліяючого фільтру [6, 7].

Список літератури

1. Теоретические основы радиолокации / Ширман Я.Д., Голиков В.Н., Бусыгин М.Н. и др.; под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.
2. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
3. Вудворд Ф.М. Теория вероятностей и теория информации с применениями в радиолокации / Ф.М. Вудворд. – М.: Сов. радио, 1955. – 89 с.
4. Современная радиолокация / Под ред. Р. Берковитца; пер. с англ. под ред. Ю.Б. Кобзарева. – М.: Сов. радио, 1969. – 143 с.
5. Вопросы статистической теории радиолокации. Т. 1 / П.А. Бакут, Н.А. Большаков и др.; под ред. Г.П. Тартаковского. – М.: Сов. радио. 1963. – 424 с.
6. Леховицкий Д.И. СДЦ в импульсных РЛС: с формулами и картинками. 2. Физический смысл и экстремальные свойства операций оптимальной междупериодной обработки гауссовых сигналов на фоне гауссовых пассивных помех / Д.И. Леховицкий, В.П. Рябуха, Г.А. Жуга // Прикладная радиоэлектроника. – 2008. – Т. 7, № 2. – С. 109 – 123.
7. Леховицкий Д.И. О вычислении законов распределения квадратичных форм комплексных нормальных векторов / Д.И. Леховицкий, П.М. Флексер, С.В. Полишко // Успехи современной радиоэлектроники. – М., 2005 – Вып. 5. – С. 53 – 60.
8. Современная радиолокация / Под ред. Р. Берковитца; пер. с англ. под ред. Ю.Б. Кобзарева. – М.: Сов. радио, 1969. – 143 с.

Надійшла до редколегії 7.02.2012

Рецензент: д-р техн. наук проф. Д.І. Леховицький, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОПТИМАЛЬНОЙ МЕЖДУПЕРИОДНОЙ ОБРАБОТКИ ГАУССОВСКИХ СИГНАЛОВ И НЕКОТОРЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ОТ ОПТИМАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ

С.В. Полишко

Анализируются потенциальные возможности обнаружения когерентных и некогерентных сигналов в системе междупериодной обработки (МПО) импульсных радиолокационных станций (РЛС) при определенных условиях сигнально-помеховой ситуации. Показано влияние выбора кратности междупериодной компенсации помех на качество МПО.

Ключевые слова: корреляционная матрица, некогерентное накопление, междупериодная обработка, помехи.

ANALYSIS OF POSSIBILITIES OF OPTIMUM INTER-PERIOD SIGNAL PROCESSING OF THE GAUSSE SIGNALS AND SOME DEVIATIONS FROM OPTIMUM SIGNAL PROCESSING

S.V. Polishko

Summary. Potential capability of finding coherent and non-coherent signals are analysed in the system of inter-period signal processing of the impulsive radio-location stations at the certain terms of signals and clutters. Influence of order of inter-period compensation of clutter is demonstrated.

Keywords: correlation matrix, non-coherent integration, inter-period signal processing, clutters.