

УДК 519.21

Іван Іванович ЧЕСАНОВСЬКИЙ,
начальник кафедри зв'язку, автоматизації та захисту інформації
Національної академії Державної прикордонної служби України
імені Богдана Хмельницького, м. Хмельницький

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МОДЕЛІ КАНАЛУ КОГЕРЕНТНОЇ МІЖПЕРІОДНОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ В СИСТЕМАХ З ІМПУЛЬСНИМИ РАДІОЛОКАЦІЙНИМИ КАНАЛАМИ

У статті досліджено модель каналу міжперіодної кореляційної обробки некогерентних вузькосмугових радіолокаційних сигналів для підвищення ефективності імпульсних радіолокаційних систем. Показано, що при застосуванні кореляційної обробки в каналі міжперіодної обробки імпульсних радіолокаційних сигналів, навіть за умови випадковості комплексної характеристики розсіюючої поверхні цілі і низької когерентності радіолокаційного каналу, такий підхід у разі застосування як опорних сигналів з сусідніх періодів зондування дає змогу в разі підвищити ефективність обробки віддзеркалених від цілей сигналів.

Ключові слова: модель, радіолокація, когерентність, кореляційна обробка, міжперіодна обробка, імпульсний сигнал.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Комплексна характеристика ефективної розсіювальної поверхні (ЕРП) реальних радіолокаційних цілей, як правило, носить випадковий характер. Через це

© Чесановський І. І.

параметри віддзеркалених радіолокаційних сигналів носять випадковий характер як за амплітудною, так і за фазовою структурою, що обумовлює складність побудови ефективних (неенергетичних) алгоритмів виявлення. Особливо гостро ця проблема постає у вузькосмугових радіолокаційних системах, де випромінюваний сигнал має форму відрізка гармонійного або квазігармонійного коливання. Просторова довжина сигналу зазвичай набагато перевищує “просторову довжину” цілі і при відбитті від окремих “яскравих елементів” сигнал перетворюється на суму коливань, що мають випадкові амплітуди і фази. Ці параметри можуть також випадково змінюватись (швидко або повільно) від сигналу до сигналу через динаміку самої ЕРП цілі. Проте, відбитий від цілі сигнал зберігає форму гармонійного коливання, оскільки сума будь-яких гармонійних коливань однієї частоти також є гармонійним коливанням. Це дозволяє виконувати міжперіодну, у тому числі і кореляційну, обробку сигналу, хоча відсутність інформації про його параметри знижує ефективність такої обробки і для збереження якості виявлення цілей доводиться збільшувати енергетику зондуючих сигналів або розширювати смугу частот [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми. У теорії радіотехнічних систем і сигналів [2] відома велика кількість методів, спрямованих на вирішення проблеми підвищення ефективності некогерентних імпульсних радіолокаційних систем, проте всі вони [3–5] передбачають підвищення когерентності радіолокаційного каналу шляхом застосування більш досконалих сигналів, що є неприпустимим для імпульсних радіолокаційних систем.

Метою статті є розробка та дослідження моделі міжперіодної кореляційної обробки сигналів в імпульсних радіолокаційних каналах.

Виклад основного матеріалу дослідження. При застосуванні некогерентних радіолокаційних сигналів з внутрішньою флуктуаційною кутовою модуляцією їх спектр та форма значно відрізняються від гармонійного коливання і, відповідно, застосування звичайних алгоритмів обробки є малоєфективним. У процесі радіолокаційного зондування сигнал багаторазово змінює свою форму, у тому числі й при

відбитті від елементів цілі. У результаті він перетворюється на сигнал, що займає широку смугу частот і має випадкові параметри [3]. Приклад такого сигналу показаний на рис. 1. Наявність пульсацій обумовлена просторовою геометрією цілі і її ракурсом, при цьому амплітуди пульсацій залежать від ЕПР відповідних блискучих крапок цілі, просторового їх розподілу, від електричних властивостей матеріалу, який відбиває сигнал та ін. На первісну форму імпульсів впливають і резонансні властивості блискучої крапки цілі.

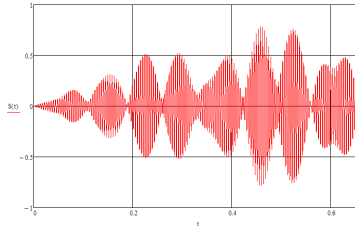


Рис. 1. Форма вузькосмугового некогерентного сигналу, відбитого багатоелементною ціллю

У процесі локації вузькосмуговий детермінований сигнал змінює свої параметри, але зберігає форму, а в складного недетермінованого сигналу змінюються не тільки параметри, але й первісна форма і структура.

Будемо вважати, що за рахунок першого етапу обробки внутрішньоперіодна когерентність обробки значно підвищилась, на основі припущення незмінності ЕРП цілі за час періоду зондування можна реалізувати міжперіодну когерентну обробку. Якщо при реалізації класичної кореляційної схеми обробки як опорний сигнал використовується апріорно відома форма зондуючого сигналу, то в міжперіодній обробці складних флукутаційних сигналів через недетермінованість ЕРП цілі (навіть за умови повної компенсації недетермінізму в фазовій та амплітудній структурі радіолокаційного сигналу) застосування цієї форми є малоєфективним. У даному випадку значно більший вигравш можна отримати від застосування як опорного сигналу, затриманого на період зондування. У результаті прийнятий сигнал порівнюється не з зондуючим радіосигналом, який у класичному кореляторі вико-

ристовується як опорний, а з таким же сигналом, відбитим від цілі. При цьому шуми на фоні яких прийняті сигнали у двох сусідніх періодах повторення, будуть не корельованими. Параметром, що визначає ефективність такого кореляційного приймача, стає виключно форма комплексної обвідної сигналу в межах смуги пропускання приймача. Такий вид обробки умовно можна назвати міжперіодною кореляційною (МПК) обробкою.

Звичайно, на якість МПК обробки буде впливати низка факторів: переміщення цілі за час T ; поточна роздільна здатність по кутових координатах, просторовий розподіл і розміри цілі; справедливість застосування нормального розподілу для опису білого шуму в розширеній смузі частот і т. д. Оцінка цих факторів буде зроблена пізніше. А спочатку для визначення загальних закономірностей, розглянемо МПК обробку сигналу, прийнятого від нерухомої цілі. При цьому на обидва входи корелятора надходять некорельовані шуми, що мають однаковий нормальний розподіл з нульовим математичним очікуванням і дисперсією $\sigma^2 = N_0 \Delta f$, де Δf – смуга пропускання приймача (ширина спектру сигналу), N_0 спектральна щільність потужності шуму.

Для оцінки ефективності МПК обробки застосуємо критерій Неймана-Пірсона, оскільки ймовірність наявності сигналу в кожному елементі розрізнення, як і в середині періоду зондування, залишається невизначеною. Характеристики виявлення, отримані при МПК обробці, порівняємо з характеристиками виявлення повністю відомого сигналу (без внутрішньої модуляції) з фіксованою тривалістю на фоні білого шуму, отриманими для класичного оптимального виявляча. Відомо, що такий виявляч формує відношення правдоподібності, з якого знаходиться алгоритм оптимального виявлення, реалізований у вигляді кореляційного інтеграла

$$u_{\text{вих}}(T) = \frac{2}{N_0} \int_0^T u(t)u_{\text{он}}(t)dt, \quad (1)$$

де $u(t)$ і $u_{\text{он}}(t)$ – прийнятий і опорний сигнал.

Характеристики виявлення визначаються взаємним розташуванням функцій розподілу напруги на виході корелятора за відсутності і наявності прийнятого сигналу та рівнем порога. Оскільки шум на вході має нормальний розподіл і закон цього розподілу в даній схемі не змінюється при проходженні шуму через елементи корелятора, функція розподілу шуму на виході залишається нормальною і визначається середнім значенням і дисперсією.

За відсутності прийнятого сигналу

$$u_{bux}(T) = \frac{2}{N_0} \int_0^T u_H(t)u_{on}(t)dt. \quad (2)$$

Функція розподілу цієї напруги має нульове середнє значення, а її дисперсія лінійно залежить від величини опорного сигналу. Тобто опорний сигнал впливає на рівень порогу, що визначає задану ймовірність хибної тривоги. За наявності прийнятого сигналу

$$u_{bux}(T) = \frac{2}{N_0} \left[\int_0^T u_{on}(t)dt + u_{np} + \int_0^T u_{on}(t)dt + u_{uu}(t)dt \right]. \quad (3)$$

Перший інтеграл у цьому виразі визначає ненульове середнє значення, яке приймає вихідна функція розподілу W_1 . Другий інтеграл визначає дисперсію цієї функції, яка дорівнює дисперсії функції W_0 .

В загальному випадку ця дисперсія також залежить від часу інтегрування T . Однак при узгодженні смуги приймача із тривалістю сигналу ця залежність відсутня. На рис. 2 показане взаємне розташування функцій W_1 і W_0 на виході класичного корелятора залежно від величини опорного й прийнятого сигналів. На рисунку добре видний вплив опорного сигналу на дисперсію цих функцій і на рівень порогу.

У випадку МПК обробки напруга на виході корелятора

$$u_{bux}(T) = \frac{2}{N_0} \int_0^T u(t)u(t-T_n)dt. \quad (4)$$

За відсутності прийнятого сигналу

$$u_{bux}(T) = \frac{2}{N_0} \int_0^T u_H(t)u_H(t-T_n)dt = \frac{2}{N_0} \int_0^T u_{H1}(t)u_{H2}(t)dt. \quad (5)$$

На відміну від класичного корелятора, ця вихідна напруга є добутком двох нормально розподілених і некорельованих шумів, отриманих у двох сусідніх періодах повторення. Функція розподілу цієї напруги визначає величину порогу, необхідного для одержання заданої ймовірності хибної тривоги. Ця величина в МПК обробці постійна, оскільки не залежить від опорного сигналу [1].

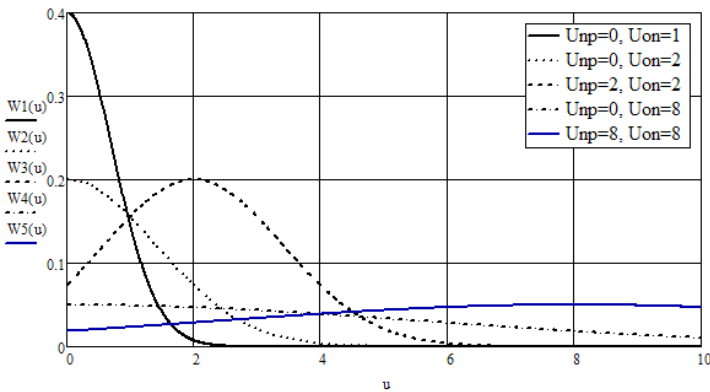


Рис. 2. Взаємне розміщення щільностей розподілу за різних значень порогової і прийнятої напруги

За наявності прийнятого сигналу

$$u_{bux}(T) = \frac{2}{N_0} \left[\int_0^T u_{n@}(t)u_{np}(t)dt + \int_0^T u_{n@}(t)u_{H1}(t)dt + \int_0^T u_{n@}(t)u_{H2}(t)dt + \int_0^T u_{H1}(t)u_{H2}(t)dt \right] \quad (6)$$

Перший інтеграл, як і в попередньому випадку, визначає ненульове середнє значення вихідної функції розподілу W_1 , другий і третій – дисперсію цієї функції на виході корелятора, що виникає за наявності прийнятого сигналу, четвертий – вид цієї функції розподілу.

Для розрахунків характеристик виявлення знайдемо функції W_0 , W_1 і ті, що одержуються при МПК обробці. Для цього розглянемо, як перетворюються функції розподілу нормальних шумів, що надходять на вхід корелятора, при їх проходженні через елементи корелятора: перемножувач і інтегратор.

Функція розподілу добутку нормально розподілених випадкових величин $y = u_1 u_2$, що описує процес на виході перемножувача під час відсутності сигналу, для корельованих випадкових величин u_1, u_2 , що мають коефіцієнт кореляції R і дисперсії σ_1^2, σ_2^2 , має вигляд:

$$W_D(y) = \frac{1}{\pi \sigma_1 \sigma_2 \sqrt{1 - R^2}} e^{Ry / [\sigma_1 \sigma_2 (1 - R^2)]} K_0 \left[\frac{|y|}{\sigma_1 \sigma_2 (1 - R^2)} \right], \quad (7)$$

де $K_0(E)$ — функція Бесселя 2-го роду нульового порядку від комплексного аргументу.

У даному випадку $R = 0, \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ і вираз для $W_D(y)$ суттєво спрощується: $W_D(y) = \frac{1}{\pi \sigma^2} K_0 \left[\frac{|y|}{\sigma^2} \right]$.

Односторонню функцію розподілу $W_D(y)$ представлена на рис. 3. Там же наведена функція розподілу нормальної випадкової величини $W_H(u)$, нормована по площі з $W_D(y)$. Порівняння цих функцій показує, що добуток нормальних шумів має менший розкид щодо середнього значення в порівнянні з вхідним нормальним шумом, що присутній на вході корелятора. Фізично це пояснюється тим, що викиди одного шуму при перемножуванні нівелюються низьким рівнем іншого шуму. Збіг викидів двох незалежних шумів має дуже малу ймовірність. Проте, така ймовірність існує, і це призводить до того, що довжина “хвостів” функції розподілу $W_D(y)$ значно перевищує довжину “хвостів” функції розподілу $W_H(u)$ (рис. 3, а, б).

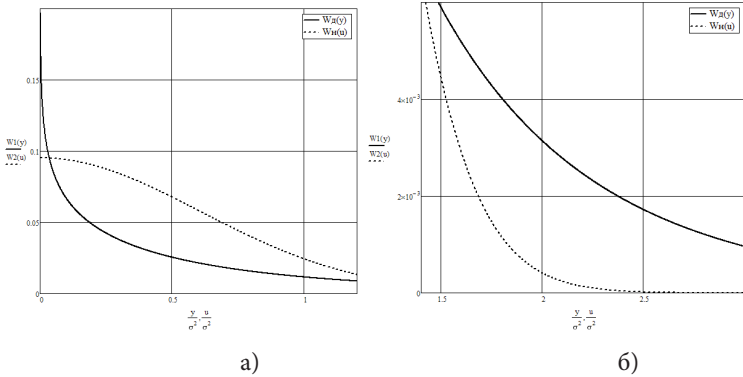


Рис. 3. Спектральні щільності добутку шумів та нормального випадкового процесу в різних масштабах (а, б, в)

Ця обставина досить важлива для МПК обробки, оскільки при заданій ймовірності хибної тривоги рівень необхідного порогу, обумовлений функцією $W_D(y)$, може виявитися значно вище того ж рівня, що визначається функцією $W_D(u)$. Отриманий в перемножувачі добуток шумів подається в інтегратор. Вигляд функції розподілу цього добутку на виході інтегратора залежить від часу інтегрування T . Відповідно до центральної граничної теореми при інтегруванні ця функція розподілу буде усе більше наближатися до нормальної, а її дисперсія буде рости пропорційно часу інтегрування.

У випадку МПК обробки вужькосмугового складного сигналу час інтегрування визначається не тривалістю випроміненого сигналу, як це має місце при класичній кореляційній обробці сигналу, а кількістю періодів зондування, у межах яких ЕРП цілі зберігається відносно незмінною, або сигнали залишаються корельованими між собою не нижче заданого рівня. При великих періодах зондування цього часу може виявитися недостатньо для повної нормалізації функції розподілу добутку нормальних шумів $W_D(y)$. Тому вона буде носити проміжний характер між функціями розподілу добутку шумів і нормальним, усе більш наближаючись до нормальної в міру збільшення часу інтегрування.

Одержання аналітичного розв'язку, що описує функцію розподілу на виході інтегратора при вхідній функції розподілу, що має закон, який відрізняється від нормального, становить значні труднощі. Прийняттю для практичного використання точного розв'язку цієї задачі дотепер немає. Тому для одержання функцій розподілу W_0 і W_1 на виході схеми МПК обробки і побудови за ними характеристик виявлення використано математичне моделювання.

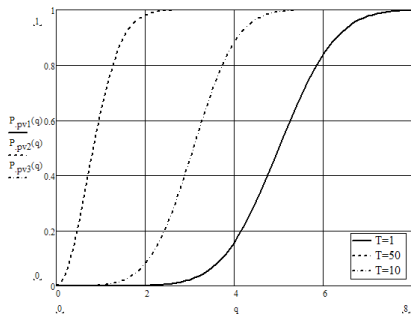


Рис. 4. Характеристики виявлення сигналів при застосуванні МПК обробки для різної кількості періодів зондування

Характеристики виявлення при МПК обробці для сигналу, відбитого від нерухомої цілі, що не змінює ракурсу і положення в 10 і 50 періодах зондування, при ймовірностях хибної тривоги 10^{-4} наведені на рис. 4.

Для порівняння на цьому рисунку дані характеристики виявлення класичного корелятора для детермінованого (повністю відомого) сигналу при тих же ймовірностях хибної тривоги ($T=1$).

Висновки дослідження та перспективи подальших розвідок у даному напрямі. Аналіз отриманих характеристик показав, що характеристики виявлення при МПК обробці для відносно великої ймовірності хибної тривоги близькі до характеристик виявлення класичного корелятора. При зменшенні заданої ймовірності хибної тривоги відмінність у положенні характеристик збільшується. Це відбувається через те, що при зменшенні цієї ймовірності збільшується різниця між рівнями порогів МПК обробки і класичного корелятора. Завдяки великій довжині

“хвостів” функції розподілу $W_d(u)$ поріг при МПК обробці підвищується набагато швидше, чим поріг класичного корелятора.

З іншого боку, зі збільшенням часу інтегрування T відбувається нормалізація розподілу $W_H(u)$. Тому характеристики виявлення при МПК обробці будуть залежати від часу інтегрування. Безсумнівною перевагою приймача МПК обробки є можливість оптимальної обробки невідомого сигналу. Це відноситься до будь-яких видів локаційних сигналів, у тому числі і вузькосмугових.

Список використаної літератури

1. Адхам Салим Аль-Муаз. Модель радиолокационного портрета цели в РЛС малой дальности с многочастотным зондирующим сигналом / Адхам Салим Аль-Муаз, С. В. Шаляпин // Доклады БГУИР. – 2007. – № 1. – С. 61–66.
2. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков : учебник. – М. : Высш. школа., 1983. – 536 с.
3. Богданович В. А. Теория устойчивого обнаружения, различения и оценивания сигналов / В. А. Богданович, А. Г. Вострецов. – М. : ФИЗМАТ-ЛИТ, 2004. – 320 с.
4. Вопросы перспективной радиолокации : коллективная монография / под редакцией А. В. Соколова. – М. : Радиотехника, 2003. – 512 с.
5. Воробьев С. Н. Эффективное обнаружение детерминированных сигналов : монография. – СПб. : СПбГУАП, 2003. – 139 с.

Рецензент – доктор технічних наук, професор Шинкарук О. М.

Стаття надійшла до редакції 12.11.2015.

Чесановський І. І. Теоретическое обоснование модели канала когерентной межпериодной обработки сигналов в системах с импульсными радиолокационными каналами

В статье разработана и исследована модель канала межпериодной корреляционной обработки некогерентных узкополосных радиолокационных сигналов, для повышения эффективности импульсных радиолокационных систем. Показано, что при применении корреляционной обработки в канале межпериодной обработки

импульсных радиолокационных сигналов даже при условии случайности комплексной характеристики рассеивающей поверхности цели и низкой когерентности радиолокационного канала такой подход при применении в качестве опорных сигналов из соседних периодов зондирования позволяет в разы повысить эффективность обработки отраженных от целей сигналов.

Ключевые слова: модель, радиолокация, когерентность, корреляционная обработка, межпериодная обработка, импульсный сигнал.

Chesanovskii I. I. The theoretical foundation of channel model with signals coherent interperiod processing in systems with impulse radar channels

The article devoted to the research and development task of interperiod correlation processing channel model that work with incoherent narrow-band radar signals. It helps to improve the efficiency of pulse radar systems. It should be noted that current trends in the development of radar pulse technology aimed at improving the probe signal. Therefore, it is shown that there is an alternative way to improve the efficiency of such systems. Namely, by applying the correlation processing in the secondary (interperiod) processing stage in a separate channel of interperiod pulsed radar signal processing. According to results of the research, use of this approach along with signals from neighboring sensing periods as a reference signals allows to increase the effectiveness of reflected signals processing in several times. This statement is also valid in a number of additional conditions. Such as: randomness of target scattering surface complex characteristic; low radar channel coherence.

In this paper were obtained a number of detection characteristics obtained using the criterion of Neyman-Pearson. pulsed radar channel effects on detection probability, provided relatively large false alarm probability. The detection probability gets closer to the detection characteristics of classical correlator at the coherent reception. The difference in characteristics position is increasing when the given false alarm probability reduces. This is due to the increase in difference between the interperiod correlation processing

threshold levels and classic correlator at a constant reference signal. By cause of the large extent of the resulting noise probability distribution function threshold values at interperiod correlation processing rises much faster than classical correlator threshold.

It is also shown that increasing the integration period in correlation algorithm, effect on normalization of noise instantaneous values probability distribution. Therefore, detection characteristics at such treatment will depend on the integration time (the number of sensing periods taken into account when processing). As established, the advantage of the receiver with the interperiod correlation processing is the possibility of unknown signal optimal processing. It is also correct for any radar signals type, including narrowband.

Keywords: *model, radar, correlation processing, the pulse signal.*