

УДК 621.396.96

Д.С. Калугін

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПАЧКИ НАДШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ ВІДЕОІМПУЛЬСНОГО ТИПУ НАНОСЕКУНДНОЇ ТРИВАЛОСТІ

У роботі запропоновано метод огляду простору у разі використання надширокосмугових сигналів, запропонована методика розрахунку багатовимірної функції невизначеності пачки відеоімпульсів, що випромінюються активними антенними решітками, і проаналізовані її властивості.

Ключові слова: надширокосмуговий сигнал, функція невизначеності.

Вступ

Постановка проблеми. Останнім часом підвищений інтерес до можливостей надширокосмугової (НШС) радіолокації це продиктоване тим, що за певних умов традиційні РЛС не можуть на високому якісному рівні вирішувати такі завдання спостереження радіолокації, як: виявлення цілей, що летять низько і малопомітних, однозначний вимір швидкості і дальності малорозмірних цілей, побудова радіозображень об'єктів, що лоціруються [1, 2].

Аналіз літератури. Ефективність сучасних РЛС багато в чому залежить від їх здатності визначати місце розташування і швидкість мети в просторі з досить високою точністю. Тому являється необхідність пошуку сигналів радіолокації з функцією невизначеності (ФН), що має досить низький рівень бічних пелюсток (побічних максимумів) і явно виражений вузький головний пік [3]. Окрім цього, в умовах застосування різного роду активних перешкод, протирадіолокаційних ракет від точності і своєчасності цілевказання при рознесеному прийомі-передачі залежить живучість зенітно-ракетних комплексів.

Необхідно відмітити, що синтез радіолокаційних сигналів з оптимальною будовою тіла невизначеності в областях розладів по дальності, кутам і швидкості представляє собою досить складне завдання. Одним з можливих напрямів досліджень є використання НШС сигналів відеоімпульсного типу наносекундної тривалості. Визначення дальності, швидкості і кутового положення об'єктів за допомогою таких сигналів має ряд особливостей, пов'язаних з малим дозволяючим об'ємом по дальності, можливість роботи по нерухомих цілях (відсутність доплерівського зрушення), способом огляду простору.

Метою статті є визначення і розрахунок ФН пачки НШС сигналів та аналіз її властивостей.

Основна частина

При визначенні тіла невизначеності НШС сигналів доцільно розглядати процес генерації, випромінювання і прийому в сукупності, оскільки антена

система через свої дисперсійні властивості чинить вплив на результати обробки будь-якого немонохроматичного сигналу. У свою чергу абсолютна ширина спектру випромінюваного сигналу впливає на спрямовані характеристики антени. Міру цього впливу можна оцінити за допомогою просторово-частотної кореляційної функції (ПЧКФ):

$$\Psi(\Delta\tau, \Delta V, \Delta\Theta, \Delta\Phi) = \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\dot{S}(\omega) \dot{S}^*(\omega, t - \Delta\tau) H_3(\omega, \Delta\Theta, \Delta\Phi) \times \exp\left(j\omega \frac{2\Delta V}{c} t\right) dt d\omega \right) \right] \quad (1)$$

де $\Delta\tau, \Delta V, \Delta\Theta, \Delta\Phi$ – розузгодження по дальності, швидкості і кутовим координатам відповідно, $\dot{S}(\omega)$ – спектральна щільність сигналу, що зондується, $\dot{S}^*(\omega, t - \Delta\tau)$ – комплексно-зв'язана спектральна щільність сигналу, що приймається, з урахуванням розузгодження по дальності, $H_3(\omega, \Delta\Theta, \Delta\Phi)$ – просторово-частотна характеристика антени, c – швидкість світла, ω – циклічна частота.

Для проведення аналізу ПЧКФ (1) необхідно визначитися з типом антенної системи, а також способом огляду простору. У разі використання НШС сигналів послідовний огляд простору на передачу і прийом є малоприйнятним, оскільки може привести до "імпульсного голоду". Через це паралельний огляд є більш відповідним і що легко реалізується за допомогою активних антенних решіток (ААР). При цьому необхідно, проте, виконання умови ортогональності передавальних каналів, тобто випромінювані сигнали не повинні інтерферувати між собою

$$r_{mn} = \int \dot{S}_m \left(t + \frac{md}{c} \sin \Theta \right) \times \dot{S}_n \left(t + \frac{nd}{c} \sin \Theta \right) dt = \begin{cases} 1 & m = n, \\ 0 & m \neq n, \end{cases} \quad (2)$$

де m, n – номери каналів, d – крок решітки, Θ – кут місця точки спостереження.

Простим способом забезпечення ортогональності НШС сигналів є неодновременність їх випромінюван-

ня в простір елементами ААР. Припустимо, що ААР має M елементів. При виконанні умови ортогональності ($\tau_n \ll T$, де T – період повторення випромінюваних сигналів в пачці) кожен з N сигналів пачки випромінюватиметься в широку область простору, відповідну парціальній діаграмі випромінювача.

Для накопичення енергії відбитих сигналів необхідно організувати оптимальну просторово-часову обробку $M \times N$ очікуваних напрямів, що еквівалентно багатопроменевому діаграмостворенню. Оскільки кожен НШС сигнал пачки, що випромінює, через неодноразовність випромінювання, малий роздільній здатності по дальності і наявність радіальної швидкості відбивається від різних точок мети, то "вузькість" діаграм спрямованості на прийом може бути забезпечена за рахунок обліку зміщення центрів випромінювання сигналів по простору, що еквівалентно алгоритму синтезування апертури (СА). Формальна схожість з традиційною системою з СА [4] обумовлено тим, що неодноразове випромінювання сигналів передавальної ААР можна розглядати як рух передавача з радіальною швидкістю $V_r = d \sin \Theta / T_0$. Виходячи зі [3] припустимо, що режим прийому у вимірювальних системах НШС буде побудований таким чином:

1. Як приймальна антена можна використовувати слабонаправлену поодинокую антену, спрямованість якої узгоджена із спрямованістю передавальної ААР.

2. Просторово-часова обробка на виході повинна враховувати зміщення центрів випромінювання по простору, момент випромінювання, а також тимчасову структуру сигналу, що приймається.

3. Також як і в системах з СА необхідно враховувати зміну дальності до об'єкту під час огляду.

Припустимо, що в далекій зоні ААР знаходиться мета, що не спотворює сигнал, рухома з радіальною швидкістю V_r . При використанні пачки, що складається з N НШС сигналів, що випромінюються M - елементною ААР, з урахуванням ортогональності сигналів, що випромінюють, на виході приймальної антени m -й імпульс зондування, приведений до тривалості НШС сигналу τ_n матиме вигляд

$$S_n^m(t^{np}, \tau, V_r, \Theta) = S_0 \left[t - \tau - (n+m) \Phi(T_0, V_r, \Theta) \right], \quad (3)$$

де $t^{np} = t/\tau_n$ – приведений час, $\tau = 2R/(c\tau_n)$ – приведений час затримки сигналу, $n = 1..N$ – номер імпульсу в пачці, $m = 1..M$ – номер елемента ААР, $\Phi(T_0, V_r, \Theta) = \left(1 + \frac{2V_r}{c} \right) \frac{T_0^{np}}{\tau_n} + \frac{d}{c\tau_n} \sin \Theta$ – функція, що враховує частотно-тимчасове перетворення тривалості сигналу і тривалості пачки для рухомої цілі, T_0 – період прийнятої послідовності, d – крок решітки.

Як бачимо, після випромінювання M каналами ААР пачок НШС сигналів, прийматиметься пачка

імпульсів з періодом, залежним від частоти повторення, швидкості мети і кутових координат спостережуваного об'єкту. Для дослідження системи з просторовими і тимчасовими координатами, що не розділяються, необхідно переходити побудові і аналізу властивостей багатовимірних ФН в координатах "дальність - швидкість - кут" [4]. В даному випадку ФН, як і всяка функція розузгодження, визначає відносну реакцію системи на відхилення вказаних параметрів від очікуваних значень дальності, швидкості, кута, з якими узгоджений пристрій обробки.

Враховуючи, що період послідовності, що приймається T_0 , лінійно пов'язаний з радіальною швидкістю і кутовою координатою ($\sin \Theta$) і спільно з ϵ інформаційним параметром, підметом оцінки, представимо пачку сигналів (3), що приймаються, НШС у вигляді

$$S_0(t|\tau_0, T_0) = \sum_{i=0}^N S_0(t - \tau_0 - iT_0). \quad (4)$$

Припустимо, що за час спостереження на вхід приймальної системи поступить суміш корисного сигналу і шуму гауса $n(t)$ з нульовим середнім значенням і спектральною щільністю $N_0/2$:

$$x(t) = S_0(t|\tau_0, T_0) + n(t) = \sum_{i=0}^N S_0(t - \tau_0 - iT_0) + n(t). \quad (5)$$

Оптимальний приймач формує логарифм функціонала правдоподібності параметрів τ, T [5]:

$$L(\tau, T) = \frac{2}{N_0} \int_0^{T_H} x(t) S_0(t|\tau, T) dt - \frac{1}{N_0} \int_0^{T_H} S_0^2(t|\tau, T) dt. \quad (6)$$

Підставляючи (5) в (6) і нормуючи отриманий результат на енергію імпульсу e , отримуємо

$$L(\tau, T) = q_0^2 [\mathfrak{Z}(\tau_0, \tau; T_0, T)] + q_0 N(\tau, T), \quad (7)$$

де $q_0^2 = 2e/N_0$ – енергетичне співвідношення сигнал-шум,

$$\mathfrak{Z}(\tau_0, \tau; T_0, T) = \frac{1}{e} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \int_0^{T_H} S_0(t - \tau_0 - mT_0) \times S_0(t - \tau - nT) dt = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \Psi(\tau_0 - \tau + mT_0 - nT_0) \quad (8)$$

узагальнена ФН пачки НШС сигналів,

$$N(\tau, T) = \int_0^{T_H} n(t) S(t|\tau, T) dt / \left(\sqrt{eN_0/2} \right) - \text{шумова функція статистики на виході оптимального приймача.}$$

У даному алгоритмі (7) оптимальна обробка припускає поєднання просторового накопичення імпульсів з тимчасовим. Тому можливі, в принципі, дві різні схеми, представлені в [3]. У першому варіанті передбачається кореляція прийнятої реалізації з опорними $M \times N$ сигналами, де N – необхідна кількість швидкісних каналів в кожному кутовому каналі. Дру-

гий варіант побудови системи обробки припускає обчислення кореляційного інтеграла після компенсації тимчасового запізнення (створення каналу прийому, налаштованого на швидкість V_r та кут Θ) і підсумовування сигналів у кутошвидкісних каналах прийому, наявність яких можна пояснити таким чином: розузгодження за швидкістю можна представити як зміна часу заповнення СА, а розузгодження по куту - як зміна періоду повторення імпульсів.

Для визначення ФН (8) задамося тимчасовою структурою НШС сигналу у виді [6]

$$S_0(t) = E_0(t/T_s)^p \left\{ \begin{array}{l} Q^{p+1} \exp[-(Qt/T_s)^b] - \\ - \exp[-(t/T_s)] \end{array} \right\} H(t), \quad (9)$$

де E_0 – нормуючий множник; $H(t)$ - одинична функція Хевісайда.

У моделі (9) що має розмірність часу параметр T_s та безрозмірні величини $Q > 1$, $b > 1$, $p > 1$ впливають як на форму, так і на тривалість СШП імпульсу. Для моделі (9) виконується рівність нулю спектру на нульовій частоті і зберігаються переваги, пов'язані з її відповідністю інтуїтивно очікуваному виду початкового імпульсу на виході антенної системи.

Перерізи тіла невизначеності для ААР, що складається з 5 елементів і пачки, що складається з 10 НШС сигналів по координатах τ/τ_0 та T/T_0 представлені на рис. 1.

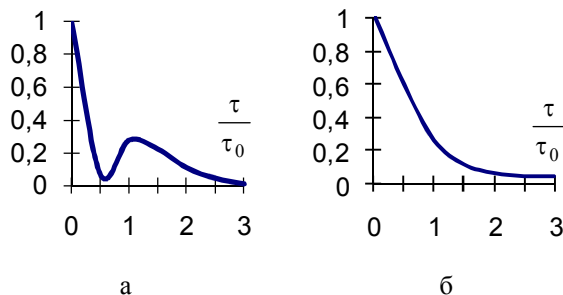


Рис. 1. Переріз тіла невизначеності
а – по дальності, б – по періоду

Проаналізувавши рис. 1 бачимо, що форма тіла невизначеності у перетне "дальність" повторює форму одиночного НШС сигналу, побочні піки відсутні, що пов'язано з ортогональністю сигналів, що випромінюють. При зменшенні періоду повторення імпульсів в пачці вникає додаткові піки, що негативно впливають на надійність оцінок дальності, швидкості та кутів.

Аналіз рис. 2 показує узагальнену залежність амплітуди сигналу у кутошвидкісному каналі. Через пропорційність цієї амплітуди енергії сигналу, можна вважати, що на рис. 2 зображена пікова енергетична діаграма спрямованості ААР, що має безпелосткову структуру і ширину 5^0 по рівню 0,5.

Висновки

Запропонована в роботі схема визначення ФН пачки НШС сигналів, дозволяє синтезувати схему оптимальної обробки реалізації, що приймається, а також оцінити точні властивості рознесеної антенної системи при паралельному огляді простору.

Список літератури

1. Осипов М.Л. *Сверхширокополосная радиолокация* / М.Л. Осипов // *Радиотехника*. – 1995. – № 3. – С. 3–6.
2. Бункин Б.В. *Особенности, проблемы и перспективы субнаносекундных видеоимпульсных РЛС* / Б.В. Бункин, В.А. Кашин // *Радиотехника*. – 1995. – № 4–5. – С. 128–132.
3. Вовшин Б.М. *Сверхширокополосная видеоимпульсная система с синтезированной апертурой для параллельного обзора пространства* / Вовшин Б.М. // *Радиотехника и электроника*. – 1999. – Т. 44, № 12. – С. 1479 – 1486.
4. *Пространственно-временная обработка сигналов* / Под ред. И.Я. Кремера. – М.: Радио и связь, 1984. – 164 с.
5. *Теоретические основы радиолокации* / Под ред Я.Д. Ширмана. Учеб. пособие для вузов. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.

Надійшла до редколегії 11.07.2013

Рецензент: д-р техн. наук проф. В.Д. Карлов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПАЧКИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ ВИДЕОИМПУЛЬСНОГО ТИПА НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Д.С. Калугин

В работе предложен метод обзора пространства в случае использования сверхширокополосных сигналов, предложена методика расчета многомерной функции неопределенности пачки видеоимпульсов, которые излучаются активными антенными решетками, и проанализированы ее свойства.

Ключевые слова: сверхширокополосный сигнал, функция неопределенности.

DETERMINATION OF ФУНКЦИИ VAGUENESS OF СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ ПАК OF VIDEOIMPULSIVE TYPE OF NANOSECOND DURATION

Д.С. Kalugin

The method of review of space in the case of the use of over broadband signals is in-process offered, the method of calculation of multidimensional function of vagueness of pack of videopulses which emanate active arrays is offered, and its properties are analysed.

Keywords: сверхширокополосный сигнал, function of vagueness.