

Зв'язок, радіотехніка, радіолокація, акустика та навігація

УДК 621.396.96

Д.С. Калугін

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ НЕВІДОМОЇ ФОРМИ ПРИ НАДШИРОКОСМУГОВІЙ ЛОКАЦІЇ

У статті запропоновані алгоритми виявлення надширокоосмугових сигналів відеоімпульсного типу при повній відсутності апріорної інформації та при відомому періоді повторення зондуючих сигналів. Отримані оптимальні адаптивні алгоритми за критерієм Неймана-Пірсона та побудовані характеристики виявлення.

Ключові слова: надширокоосмуговий сигнал, алгоритм.

Вступ

Постановка проблеми. Традиційно в радіолокації використовуються вузькосмужні імпульсні або безперервні гармонійні сигнали. Бажання отримати більше інформації про об'єкти, які зондуються, призвело до використання в радіолокаційних системах надширокоосмугових (НШС) радіолокаційних сигналів. Особливості випромінювання, поширення та відображення НШС сигналів веде до неможливим застосування оптимальних алгоритмів виявлення вузькосмугових сигналів для виявлення НШС радіолокаційних сигналів.

При синтезі оптимальних і квазіоптимальних алгоритмів виявлення вузькосмугових сигналів використовується апріорне знання амплітуди, тривалість, частоти заповнення, початкової фази, а зміною цих параметрів в процесі зондування або нехтують, або ці зміни враховуються статично.

Головною ж відмінністю використання НШС зондуючих імпульсів від гармонійних вузькосмугових сигналів є зміна форми і тривалості НШС сигналу в процесі зондування протяжної цілі з радіальною довжиною, що перевищує роздільну здатність зондуючого імпульсу в просторі $ctz/2$ (де c – швидкість світла, tz – тривалість зондуючого імпульсу). Оскільки не можливо передбачити всі умови, що впливають на форму сигналу (описати всі можливі варіанти) при рішенні задачі виявлення, – форма відбитого імпульсу НШС на вході приймача вважається невідомою.

Аналіз літератури. Завдання виявлення сигналів, прихованих в шумах, досліджене досить детальний [1 – 7]. Проте синтезовані оптимальні виявлювачі призначені, в основному, для виявлення вузькосмугових сигналів відомої форми (або випадкових сигналів з відомим законом щільності розподілу вірогідності), що гармонійної несе.

НШС сигнали ультракороткої тривалості відеоімпульсного типу не містять коливань, що несуть, і, як правило, задовольняють умові

$$\frac{2L}{ct_i} \gg 1,$$

де t_i – тривалість імпульсу; c – швидкість світла; L – протяжність цілі.

Форма надширокоосмугових сигналів (НШС) неодноразово міняється в процесі випромінювання, віддзеркалення і прийому [8, 9]. Ці зміни визначаються як структурою антени РТС і кутовим положенням цілі, так і кількістю і розташуванням відбивачів "блискучих крапок" на поверхні цілі, ефективною поверхнею розсіяння відбивача, його імпульсною і поляризаційною характеристиками. Зміна форми імпульсного сигналу виявляється в зміні його тривалості, числа максимумів, їх положення, амплітуди і полярності. Форма відбитого від складної багатокрапкової цілі НШС луносигналу несе інформацію про конфігурацію і інші властивості цілі. Проте при рішенні задачі виявлення такий сигнал є невідомим. Відсутність інформації про форму луносигналу не дозволяє застосувати для його виявлення класичні алгоритми виявлення.

Мета статті. Є розробка алгоритмів виявлення сигналів невідомої форми при НШС локації.

Основна частина

Вживання НШС сигналів наносекундної тривалості для виявлення видалених об'єктів вимагає збільшення енергетичного потенціалу РЛС, що можна забезпечити двома шляхами: за допомогою формувачів зондуючих сигналів з мегаваттними рівнями, заснованих на нових фізичних принципах, або за допомогою накопичення енергії когерентної послідовності імпульсів.

1. Виявлення при "повній" відсутності апріорної інформації.

Рахуємо лоцируємий об'єкт просторово-розподіленою метою. Проблема виявлення таких цілей розглянута в [7]. Для зондування використовується вузькосмуговий сигнал тривалості наносекундної. Завдання виявлення вирішується в припущенні, що амплітуда прийнятого сигналу підкоряється релеєвському розподілу, який справедливий у тому випадку, коли у вирішуючому елементі знаходиться декілька "блискучих крапок" з випадковим розташуванням і порівнянню інтенсивністю. Вибірki що огинає сигнал також слідуватимуть релеєвському розподілу як в разі сигналу за наявності шуму, так і в разі одного шуму, але з різними параметрами.

За умови, що цілі містить елементів дозволу, "к" з яких відображають зондуєчий сигнал згідно релеєвському розподілу таким чином, що середня енергія сигналу на елемент складає E/k (E – енергія відбитого сигналу). Останні $N-k$ елементів не є такими, що відображають.

Щільність вірогідності вибірки що огинає для сигналу від елементу, що відображає, визначаються

$$p_i = \frac{x_i}{\sigma_1} \exp\left(-\frac{x_i^2}{2\sigma_1}\right)$$

і для порожнього елементу

$$p_i = \frac{x_i}{\sigma_0} \exp\left(-\frac{x_i^2}{2\sigma_0}\right),$$

де σ_0, σ_1 – дисперсії.

Складений логарифм відношення правдоподібності має вигляд:

$$\Theta(\bar{x}) = \frac{1}{C_N^k} \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_1}\right)^k \times \sum_{i=1}^k \left[\left(\frac{1}{2\sigma_0} - \frac{1}{2\sigma_1}\right) \sum_{i=1}^k x_i^2 \right], \quad (1)$$

де C_N^k – число поєднань.

Отримані по цьому алгоритму криві виявлення представлені в [7] і не обговорюються.

Можливий і інший підхід до визначення якісних показників виявлення.

Оскільки сигнал, що приймається, є портретом цілі, форма якого в загальному випадку невідома і залежить від цілого ряду випадкових параметрів, то сигнал, що приймається, НСШ можна розглядати у вигляді випадкового нормального процесу з нульовим середнім $\langle m_c \rangle = 0$. Дискретизує сигнал відповідно до теореми Котельникова, задамося дисперсією випадкового процесу – σ_c^2 .

Вважаємо, що власним шумом тракту є випадковий стаціонарний процес гауса з нульовим середнім $\langle m_p \rangle = 0$ і дисперсією σ_p^2 . Передбачаємо, що в

смузі пропускання каналу різні дискретні некорельовані між собою.

Таким чином, завдання виявлення НСШ сигналу можна звести до відомого завдання виявлення некорельованої послідовності на тлі іншої некорельованої послідовності. Алгоритм рішення подібної задачі описаний [10].

Подібне завдання ставиться таким чином: на підставі наявної послідовності треба вирішити, чи є вона сумішшю корисного сигналу і перешкоди ($y_i = x_i + n_i$) або чистої перешкоди ($y_i = n_i$).

Функція правдоподібності для завдання виявлення має вигляд:

$$\Theta = \frac{p_{сп}(y)}{p_p(y)} = \frac{\sigma_c^K}{\sigma_p^K} \exp\left(-\frac{S}{2}\right), \quad (2)$$

$$\text{де } S = \frac{\sigma_c^2}{\sigma_p^2 (\sigma_c^2 + \sigma_p^2)} \sum_{i=1}^K y_i^2. \quad (3)$$

Рішення про наявність або відсутність сигналу можна прийняти по величині S , оскільки Θ є монотонно зростаюча функція S . Формула (3) показує, що оптимальний приймач виявлення шумоподібного сигналу є нелінійним пристроєм. В даному випадку приймач повинен підсумовувати квадрати вибірок вихідного сигналу.

Оптимальне правило рішення матиме вигляд:

якщо $S \geq S^*$, то рахуємо $y = x + n$;

якщо $S < S^*$, то рахуємо $y = n$.

Для визначення характеристик виявлення по критерію Неймана-Пірсона (вірогідності помилкової тривоги F і правильного виявлення D) вважатимемо що величина S підкоряється χ^2 – розподілу з $2L$ мірами свободи [10], що має вигляд

$$p(S, \sigma^2) = \frac{1}{2\sigma^2 \Gamma(L)} \times \left(\frac{S}{2\sigma^2}\right)^{L-1} \exp\left(-\frac{S}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

де $\Gamma(L)$ – гамма-функція; $L = K/2$ – параметр форми; K – кількість імпульсів в пачці; $\sigma^2/2$ – параметр масштабу.

Вірогідність помилкової тривоги і правильного виявлення буде

$$F = \int_{Kx_p}^{\infty} p(S, \sigma_p^2) dS = f(x_{пор}); \quad (5)$$

$$D = \int_{Kx_p}^{\infty} p(S, \sigma_c^2) dS = f\left(\frac{x_{пор}}{1+\mu}\right), \quad (6)$$

де $f(x) = \exp(-x) \sum_{i=0}^{K-1} \frac{x^i}{i!}$ – функція "вживання" розподіли Ерланга з $\sigma^2 = 1$ [11];

$\mu = \frac{\sigma_c^2}{\sigma_p^2}$ – енергетичне співвідношення сигнал-шум;

$x_p = x_{пор} \sigma_p^2$ – фіксований рівень, що забезпечує задану вірогідність помилкової тривоги F (5).

Енергія одного імпульсу, що відбитого від цілі і приймається РТС невелика. Щоб виділити сигнал на тлі шумів, РТС повинна опромінювати ціль послідовністю імпульсів, які згодом накопичуються в приймачі, завдяки чому покращується співвідношення сигнал-шум. Чим більше накопичується імпульсів, тим більше це відношення.

При випромінюванні послідовності з K імпульсів

$$x'_{пор} = \frac{x_{пор}}{K}.$$

На рис. 1 для наборів значень $F = 10^{-2} \dots 10^{-10}$ показане сімейство залежностей від K -параметра, що показують необхідну міру перевищення граничного рівня для забезпечення заданої вірогідності помилкової тривоги F . Спостережуване зменшення $x'_{пор}$ із зростанням K обумовлено зменшенням "хвостів" розподіли (4).

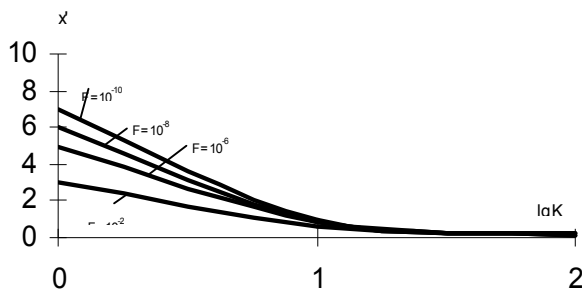


Рис. 1. Сімейство залежностей для забезпечення заданої вірогідності помилкової тривоги F

На рис. 2 приведені розраховані по (6) характеристики виявлення $D\left(\frac{\sigma_c^2}{\sigma_p^2}\right)$ для декількох значень вірогідності помилкової тривоги і об'ємів вибірки K . Для $K > 1$ вони ілюструють поліпшення характеристик виявлення за рахунок накопичення K незалежних значень сигналу.

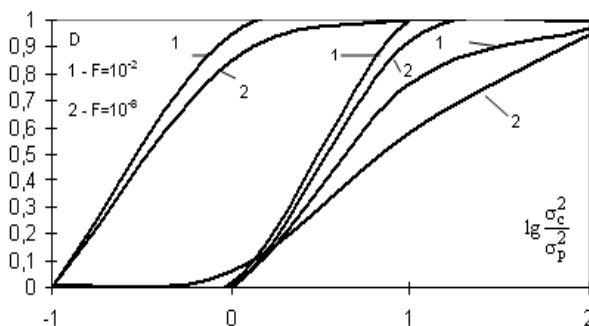


Рис. 2 Характеристики виявлення

При використанні НШС сигналу окрім вживання звичайної лінії затримки з параметром, визначуваному максимальною дальністю цілі, необхідно використовувати адаптивні лінії затримки з відведеннями, оскільки кожен подальший імпульс послідовності відбиватиметься від "іншого" елементу цілі.

2. Виявлення при відомому періоді повторення зондуючих сигналів НШС

Хоча форма сигналів, що приймаються, невідома, передбачимо, що відомий період повторення зондуючих імпульсів T_n . Цю апріорну інформацію можна використовувати для синтезу алгоритму виявлення. Для цього розглянемо завдання виявлення нерухомої цілі і представимо очікуваний луносигнал $u_c(t)$ у вигляді пачки відеоімпульсів

$$u_c(t) = \sum_{i=0}^{K-1} u_0(t - iT_n), \quad (7)$$

де $u_0(t)$ – сигнал невідомої форми, що приймається, відбитий від цілі при кожному зондуванні з енергією

$$E_c = \int_{-\infty}^{\infty} u_0^2(t) dt.$$

Імпульси в пачці є ортогональними, тобто

$$\int_{-\infty}^{\infty} u_0(t - kT_n) u_0(t - mT_n) dt = \begin{cases} E_c, & k = m, \\ 0, & k \neq m. \end{cases} \quad (8)$$

Шум вважатимемо гаусом з нульовим середнім значенням. Передбачимо, що луносигнал є середнє значення суми сигналу і шуму.

$$\ln \Theta = \ln \frac{p_{cm}[u(t)]}{p_m[u(t)]} = \sum_{i=0}^{K-1} \int u(t) u_0(t - iT_n) dt - \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{K-1} \int u_0(t - iT_n) u_0(t - mT_n) dt. \quad (9)$$

Тут $u(t)$ – реалізація суми сигналу і шуму, що приймається, або лише шуму тривалістю

$$T_0 > (K-1)T_n.$$

З обліком (8), (9) набирає вигляду

$$\ln \Theta = \sum_{i=0}^{K-1} \int u(t) u_0(t - iT_n) dt - \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{K-1} \int u_0^2(t - iT_n) dt. \quad (10)$$

Оскільки $u_0(t)$ невідомо, але не випадково, застосуємо адаптивний підхід.

Сенс адаптивного підходу полягає у використанні алгоритму, оптимального при відомих параметрах сигналу, в який замість невідомих параметрів

підставляються їх максимально правдоподібні оцінки [12]. В даному випадку слід оцінювати не окремі параметри сигналу, а сигнал в цілому як функцію часу [13].

Такий підхід дозволяє отримати з (10) оптимальний (по критерію Неймана-Пірсона) адаптивний алгоритм виявлення у вигляді

$$U_{\text{вых}} = \int_0^T \left[\sum_{i=0}^{K-1} u(t + iT_n) \right]^2 dt < (>) U_{\text{пор}},$$

де $U_{\text{пор}}$ – поріг виявлення.

Оптимальний алгоритм в даному випадку зводиться до підсумовування відрізків прийнятої реалізації (тривалістю T кожен) на тих інтервалах часу, де очікуються сигнали, обчисленню енергії цієї суми і порівнянню її з порогом, визначуваним заданою вірогідністю помилкової тривоги.

Загалом, це відомий енергетичний виявлювач, але використовуваний для суми відрізків прийнятих реалізацій [14].

У ряді випадків такий підхід може бути переважнішим, зокрема, відносно вимог до пристроїв обробки.

Висновки

Запропоновані алгоритми дозволяють вирішити задачу виявлення НСШ сигналів.

При "повній" відсутності апріорної інформації НСШ сигналів пропонується звести до відомого завдання виявлення некорельованої послідовності на тлі іншої некорельованої послідовності.

При використанні НШС сигналу окрім вживання звичайної лінії затримки з параметром, визначуваному максимальною дальністю цілі, необхідно використовувати адаптивні ноніусні лінії затримки з відведеннями, оскільки кожен подальший імпульс послідовності відбиватиметься від "іншого" елементу цілі.

Як що відомий період повторення зондуючих сигналів НСШ оптимальний алгоритм пропонується звести до відомого енергетичного виявлювача, але використовуваний для суми відрізків прийнятих реалізацій.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ВІЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ НЕІЗВЕСТНОЇ ФОРМИ ПРИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЇ ЛОКАЦІЇ

Д.С. Калугин

В статті пропонується алгоритми виявлення сверхширокополосних сигналів видеоімпульсного типу при повній відсутності апріорної інформації і при відомому періоді повторення зондуючих сигналів. Отримані оптимальні адаптивні алгоритми за критерієм Неймана-Пірсона і побудовані характеристики виявлення.

Ключові слова: сверхширокополосної сигнал, алгоритм.

DEVELOPMENT OF ALGORITHMS OF EXPOSURE OF SIGNALS OF UNKNOWN FORM AT SUPERWIDE-FULL-PAGE LOCATION

D.S. Kalugin

In the article the algorithms of exposure of superwide-bandwidth signals of videoimpulsive type are offered at complete a priori null information and at the known period of reiteration of soundings signals. Optimum adaptive algorithms are got after the criterion of Neyman-pirsona and descriptions of exposure are built.

Keywords: superwide-full-page signal, algorithm.

Список літератури

1. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации / Ю.Г. Сосулин. – М.: Радио и связь, 1992. – 312 с.
2. Теоретические основы радиолокации / под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. радио, 1970. – 561 с.
3. Теоретические основы радиолокации / под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Сов. радио, 1978. – 732 с.
4. Гуткин Л.С. Теория оптимальных методов радиоприема при флуктуационных приемах / Л.С. Гуткин. – М.: Сов. радио, 1972. – 488 с.
5. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.
6. Иммооров И.Я. Сверхширокополосная (СШП) локация: основные особенности и отличия от традиционной радиолокации / И.Я. Иммооров // Электромагнитные волны и электронные системы. – 1997. – Т. 2, №1. – С. 81-88.
7. Обнаружение пространственно-распределенной цели / Ван дер Спек // Зарубежная радиоэлектроника. – 1972. – № 3. – С. 14-21.
8. Иммооров И.Я. Сверхширокополосные радары: новые возможности, необычные проблемы, системные особенности / И.Я. Иммооров // Вестник МГТУ им. Баумана. – 1998. – Вып. 4. – С. 25-55.
9. Вовшин Б.М. Сверхширокополосная видеоимпульсная система с синтезированной апертурой для параллельного обзора пространства / Б.М. Вовшин // Радиотехника и электроника. – 1999. – Т. 44, № 12. – С. 1479-1486.
10. Вайнштейн А.А. Выделение сигналов на фоне случайных помех / А.А. Вайнштейн, В.Д. Зубаков. – М.: Сов. Радио, 1960. – 447 с.
11. Хастингс Н. Справочник по статистическим распределениям / Н. Хастингс, Дж. Пикок. – М.: Наука, 1970. – 90 с.
12. Ретин В.Г. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптации информационных систем / В.Г. Ретин, Г.П. Тартаковский. – М.: Сов. радио, 1977. – 432 с.
13. Черняк В.С. Получение радиоизображений объектов / В.С. Черняк // Радиотехника и электроника. – 1979. – №12. – С. 2454-2463.
14. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.

Надійшла до редколегії 11.07.2013

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