РАДІОЛОКАЦІЯ І РАДІОТЕХНІКА

УДК 681.3.06.543

В.А. Дружинін

Державний університет телекомунікацій, Київ

ПРОЦЕДУРИ КОМПЕНСАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ ВТРАТ ПРО ОБ'ЄКТИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ В РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ІЗ ЗМІННОЮ ПРОСТОРОВОЮ КОНФІГУРАЦІЄЮ

У роботі розглянутий один із напрямів компенсації інформаційних втрат про об'єкти спостереження в радіолокаційних системах із змінною просторовою конфігурацією за рахунок урахування інформації про форму амплітуди сигналів віддзеркалення від об'єктів у залежності від фрактальної розмірності їх поверхонь відбиття. Вважається, що амплітуда сигналу віддзеркалення від об'єктів значно перевищує рівень завад і амплітуду сигналу відбиття від фону поверхні.

Ключові слова: *радіолокаційні системи із змінною просторовою конфігурацією, об'єкти спостереження, радіолокаційні сигнали.*

Вступ

Один із напрямів компенсації інформаційних втрат про об'єкти спостереження в радіолокаційних системах із змінною просторовою конфігурацією (РЛС ЗПК) при підвищенні роздільної здатності [1-3] за азимутом заснований на елементах теорії виявлення та оцінювання параметрів сигналів [4] з урахуванням інформації щодо форми послідовності амплітуд сигналів віддзеркалення від об'єктів спостереження в залежності від їх фрактальної розмірності поверхні відбиття. Це дає можливість реалізувати досить прості й надійні процедури відновлення полів $x(i,j)$ шляхом виявлення та відновлення послідовностей амплітудних сигналів віддзеркалення від об'єктів в реальному масштабі часу. У роботі пропонуються процедури, засновані на реалізації процедур виявлення радіолокаційних зображень (РЛЗ) об'єктів за інтегральними спостереженнями з урахуванням інформації про форму амплітуди сигналів віддзеркалення від об'єктів із урахуванням їх фрактальної розмірності поверхні відбиття [5]. Вважається, що амплітуда сигналу віддзеркалення від об'єктів значно перевищує рівень завад й амплітуду сигналу відбиття від фону поверхні.

Основна частина

Модель i, j-го амплітудного сигналу $y_k(i,j)$ на виході k-го приймального каналу РЛС ЗПК описується наступною залежністю [1]:

$$y_k(i,j)=\sum_{j=-m}^{m}\alpha_k(i,j_1)x(i,j+j_1)+w_k(i,j), \qquad (1)$$

де $\alpha_k(i,j)$ - відомі коефіцієнти діаграми спрямованості (ДС) (апаратні коефіцієнти) k-го каналу, що залежать від i і j [кут місця θ променя відбиття від i-го елементу дальності на поверхні залежить від дальності і висоти польоту h: $\theta = \arccos\left[h / R_i\right]$; $w_k(i,j)$ - випадкова складова з нульовим середнім, яку з деяким наближенням можна вважати гаусівською.

При спостереженні поверхні в заданому невеликому діапазоні дальності коефіцієнти $\alpha_k(i,j)$ практично можна вважати незалежними від i. Випадкові електромагнітні поля (ЕМП) $x(i,j)$ і $w(i,j)$ у виразі (1) в загальному випадку корельовані за *i* та j, однак практично кореляцією за стробом дальності і можна знехтувати. Тому змінна i в (1) опускається і надалі розглядається модель виміру виду

$$y_k(j) = \sum_{j=-m}^{m}\alpha_k(j_1)x(j+j_1) + w_k(j),\ j=\overline{1,N},k=\overline{1,L}, \qquad (2)$$

Модель i,j-й амплітуди y(i,j) після амплітудного детектування в одному з приймальних каналів РЛС ЗПК описується як окремий випадок (2) при $k=1$ такою залежністю від поля відображення $x(i,j)$:

$$y(i,j)=\sum_{j=-m}^{m}\alpha(i,j)x(i,j+j_1)+w(i,j),i=\overline{1,M},j=\overline{1,N}, \qquad (3)$$

Аналогічно (2) змінна i в (3) опускається і надалі розглядається модель вимірювань виду

$$y(j)=\sum_{j=-m}^{m}\alpha(j_1)x(j+j_1)+w(j),j=\overline{1,N}, \qquad (4)$$

у кожному i-му рядку $\left(i=\overline{1,M}\right)$ матриці РЛЗ $y(i,j),i=\overline{1,M},j=\overline{1,N}$, незалежно від інших рядків.

При спостереженні ряду відомих об'єктів на поверхні доцільне завдання відновлення ЕМП $x(i,j)$ вирішувати як завдання виділення РЛЗ об'єктів з урахуванням форми послідовності амплітуд сигналу віддзеркалення від об'єктів. В якості простої моделі такої послідовності у довільному і-му рядку матриці зображення зручно взяти кусочно-постійну ґратчасту функцію вигляду

$$x_S(j)=A_S, j\hat{I}\{j_1(s),...,j_2(s)\}, j_2{}^3 j_1,$$

чи $$x_S(j)=0, j\hat{I}\{j_1(s),...,j_2(s)\},$$

де A_S - амплітуда сигналу відбиття від s-го радіолокаційного об'єкта (або s-го ділянки апроксимації) з урахуванням впливу геометрії поверхні віддзеркалення об'єкта спостереження; $j_1(s), j_2(s)$ - початкова та кінцева точки s-ої ділянки, причому амплітуда відбиття від об'єкта значно вище амплітуди відбиття від поверхні підстилання.

Послідовність амплітуд $x_S(j)$ відбиття від декількох об'єктів визначається суперпозицією $x_S(j)$:

$$x(j)=\sum_{s=1}^{r} x_S(j), j=\overline{1,N},$$

де r - невідоме число об'єктів (або кусково-постійних ділянок апроксимації).

Вимір $y(j), j=\overline{1,N}$, надходять від приймального (сумарного) каналу, відповідно до (4) підпорядковані наступної моделі:

$$y(j)=\sum_{j_1=-m}^{m}\sum_{s=1}^{r}\alpha(j_1)x_s(j+j_1)+w(j)=\sum_{s=1}^{r} y_s(j)+w(j), j=\overline{1,N}, \quad (5)$$

де $y_s(j)=\sum_{j_1=-m}^{m}\alpha(j_1)x(j+j_1)$ - s-я складова $y(j)$, обумовлена електричними властивостями s-го об'єкта та геометрією його поверхні, без урахування завади $w(j)$.

Завдання полягає у виявленні початкових $j_1(s)$ і кінцевих точок шуканих послідовностей $\{j_1(s),...,j_2(s)\}, s=\overline{1,r}$, тобто перебуванні оцінок $\hat{j}_1(s), \hat{j}_2(s), s=\overline{1,\hat{r}}$, а також визначенні оцінок $\hat{x}_s(j), j=\overline{\hat{j}_1(s), \hat{j}_2(s)}$, амплітуд цих послідовностей A_s.

Якщо розглядається точковий об'єкт: $j_1(s)=j_2(s)=j_s, A_s=1$, то послідовність $y_s(j_s+j), j=\overline{-m,m}$, є дзеркальним відображенням (щодо j_s) коефіцієнтів ДС $\alpha(j), j=\overline{-m,m}$. Отже, для унімодальних фінітних функцій $\alpha(j), j=\overline{-m,m}$ у разі присутності одиничного точкового об'єкта з координатою точки максимуму функція $y(j)$ збігається з j_s при $w(j)=0, "j=\overline{1,N}$.

Для одиничного протяжного об'єкта, інтегральне зображення якого згідно (5) виходить суперпозицією зображень точкових об'єктів, у разі відсутності завад $(w(j)=0)$ справедливі наступні твердження:

1) Якщо протяжність $l=j_2-j_1$ об'єкта не перевищує ширини ДС $(l \le n, n=2m+1)$, то точка максимуму функції $y(j)$ припадає на середину $\{j_1,...,j_2\}$;

2) Якщо $l \succ n$, то найбільше значення функції $y(j)$ досягається в l-n - точках, розташованих поблизу центру $\{j_1,...,j_2\}$.

При цьому послідовність $y(j)$ має форму згладженої ДС та добре апроксимується параболою в вузькому вікні шириною в кілька пікселів. Отже, якщо провести параболічне згладжування $y(j), j=\overline{1,N}$, то одночасно з придушенням завад $w(j)$, будуть проявлятися точки максимуму і точки перегину, відповідні шуканим послідовностям, що дозволяє оцінити $j_1(s), j_2(s), A_s, s=\overline{1,r}$. Цей підхід використовується в наступній евристичній послідовності виконання операцій (у разі декількох довільно розташованих об'єктів зазначена відповідність не завжди буде виконуватися).

Таким чином, процедура відновлення ЕМП розсіювання може бути реалізований за рахунок виконання наступних операцій:

1. Задається пам'ять 2l+1 фільтра 2-го порядку $(l \prec m)$ і заздалегідь обчислюється $3\times(2l+1)$ - матриця H вагових коефіцієнтів фільтра методом найменших квадратів за формулою

$$H=(F^T F)^{-1}F^T=(h(i,j)), i=0,1,2, j=\overline{-l,l}, F=\begin{bmatrix} ... & ... & ... \\ 1 & j & j^2 \\ ... & ... & ... \end{bmatrix}, j=\overline{-l,l}.$$

2. Незалежно в кожному і-му рядку $(i=\overline{1,M})$ матриці РЗ $y(i,j), i=\overline{1,M}, j=\overline{1,N}$, виконуються наступні операції:

2.1. По мірі надходження даних $y(j), j=1,2,...,N$ (змінна і опущена) обчислюються оцінки параметрів за формулою

$$a_i(j)=\sum_{j_1=-l}^{l} h(i,j)y(j+j_1), i=0,1,2$$

де $a_0(j)$ - згладжене значення $y(j)$; $a_0(j), a_1(j)$ - швидкість і прискорення (1-а і 2-я похідні параболічної моделі) в j-й точці.

2.2. Якщо $a_2(j) \succ 0$, то в якості оцінки ЕМП відображення приймається згладжене значення процесу $y(j)$: $\hat{x}(j)=a_0(j)$.

2.3. У перший момент j появи негативного знаку другої похідної $(a_2(j) \prec 0)$ фіксується точка перегину

$j_1=j$ функції $a_0(j)$, як початок проміжку опуклості $a_0(j)$. Після зміни знаку $a_2(j)(a_2(j)\succ 0)$ фіксується кінець проміжку $j_2=j$.

2.4. Додатково на $\{j_1,...,j_2\}$ перевіряється наявність точки максимуму j_0 за ознакою близькості до нуля першої похідної $a_1(j_0)$. Якщо точка максимуму j_0 існує, то запам'ятовується максимум згладженого процесу: $a_{max}=a_0(j_0)$. В іншому випадку (наявність згладжених східчастих переходів функції $a_0(j)$ при близько розташованих об'єктах) вибирається найбільше значення функції $a_0(j)$ на кінцях j_1,j_2: $a_{max}=\max\{a_0(j_1),a_0(j_2)\}$ і коригуються кордони проміжку: $j_1:=j_1-\Delta j$, якщо $a_0(j_1)\succ a_0(j_2)$, або $j_2:=j_2+\Delta j$, якщо $a_0(j_1)\prec a_0(j_2)$, де $\Delta j=(j_2-j_1)/2$.

2.5. Для виділеної послідовності обчислюється оцінка амплітуди сигналу за формулою $\hat{x}(j)=\lambda a_{max}, j=\overline{j_1,j_2}$, де коефіцієнт вибирається на етапі моделювання. Границі j_1,j_2 можуть додатково коригуватися на постійну величину δj. Далі операції повторюються. Число виділених в рядку послідовностей дає оцінку $\hat{r}$, яка в явному вигляді не використовується.

3. Сукупність оцінок $\hat{x}(i,j),i=\overline{1,M},j=\overline{1,N}$, отриманих після обробки всіх рядків, являє відновлене РЛЗ об'єктів на поверхні з підвищеним розділенням за азимутом. Рух по рядку може здійснюватися зліва - направо або справа - наліво. Можлива спільна обробка РЛЗ, отриманих для двох таких незалежних проходів.

4. Моделювання роботи алгоритму здійснюється попередньо з метою підбору параметрів λ і δj шляхом вирішення наступної зворотної задачі:

4.1. Для даної матриці зображення (ЕМП вимірів) $y(i,j),i=\overline{1,M},j=\overline{1,N}$, отриманої для групи точкових і протяжних об'єктів на фоні поверхні підстилання шляхом натурних спостережень, при фіксованих $\lambda,\delta j$ обчислюються за допомогою розглянутої процедури оцінки амплітуд ЕМП відображення $\hat{x}(i,j),i=\overline{1,M},j=\overline{1,N}$.

4.2. На основі $\hat{x}(i,j),i=\overline{1,M},j=\overline{1,N}$ обчислюються оцінки вимірів (як рішення зворотної задачі) за формулою

$$\hat{y}(i,j)=\sum_{j_1=-m}^{m} a(i,j_1)\hat{x}(i,j+j_1),i=\overline{1,M},j=\overline{1,N}.$$

4.3. Обчислюється міра $\mu(\hat{y},y)$ близькості двох РЛЗ $\hat{y}(i,j)$ і $y(i,j)$, $i=\overline{1,M},j=\overline{1,N}$, наприклад у сенсі евклідового відстані $e(\hat{y},y)$, або відстані Хеммінга $d(\hat{y},y)$:

$$d(\hat{y},y)=\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left|\hat{y}(i,j)-y(i,j)\right|.$$

4.4. Оптимальні значення $\lambda,\delta j$, відповідні мінімуму функції $d(\hat{y},y)=j(\lambda,\delta j)$, знаходяться для заданого числа $n=2m+1$ коефіцієнтів ДС $\alpha(j),j=\overline{-m,m}$, шляхом послідовного перебору $\lambda,\delta j$, або за допомогою відомих процедур оптимізації. При цьому початкове значення $\delta j:\delta j=0$.

4.5. Початкове значення λ приймається рівним коефіцієнту пропорційності між середнім значенням $\bar{x}$ поля відбиття від об'єкта і відповідним середнім значенням $\bar{y}$ ЕМП вимірювання в окремому рядку матриці РЛЗ.

Зв'язок між $\bar{x}$ і $\bar{y}$ встановлюється наступним чином:

$$\bar{y}=\frac{1}{l}\sum_{j=1}^{l}y(j)=\frac{1}{l}\sum_{j=1}^{l}\left[\sum_{j_1=-m}^{m}\alpha(j_1)x(j+j_1)+w(j)\right]=$$
$$=\frac{\bar{x}}{l}\sum_{j=1}^{l}\sum_{j_1=-m}^{m}\alpha(j_1)+\frac{1}{l}\sum_{j=1}^{l}w(j)=\bar{x}\sum_{j_1=-m}^{m}\alpha(j_1)+\bar{w},$$

де середнє значення $\bar{x}$ досягається в деякій точці $j_0:\bar{x}=x(j_0),j\hat{I}\{1,...,l\}$, й виноситься за знак суми за теоремою про середню; l - довжина об'єкта. Прийнявши середнє значення завади $\bar{w}\approx 0$, отримуємо початкове значення параметра λ, рівним λ_0:

$$\bar{x}=\lambda_0\bar{y}\Rightarrow\lambda_0=1/\sum_{j_1=-m}^{m}\alpha(j_1).$$

Висновки

Урахування інформації щодо форми послідовності амплітуд сигналів віддзеркалення в залежності від фрактальної розмірності об'єктів дає можливість реалізувати процедури ефективного відновлення радіолокаційного поля РЛС ЗПК.

Перспективним напрямком підвищення роздільної здатності РЛС ЗПК за кутовими координатами об'єктів спостереження є реалізація класу процедур багатопозиційного прийому радіолокаційної інформації.

У багатопозиційних РЛС ЗПК використовується одна передавальна позиція, що рухається за обраною траєкторією, що забезпечує підсвітлювання заданої зони огляду. Взаємно незалежні прийомні позиції, використовуючи відбиті сигнали, формують РЛЗ об'єктів, розташованих у зоні огляду. Число прийомних позицій і траєкторії їх руху визначаються розв'язуваними завданнями.

Багатопозиційний режим забезпечує високу роздільну здатність РЛС ЗПК у всій зоні огляду, у тому числі в її передньому секторі.

Високе розділення за азимутом реалізується навіть при нерухливій (наземній, аеростатній) приймальній позиції незалежно від дальності, за рахунок руху підсвітлювача й зменшується в порівнянні з однопозиційною системою всього у два рази.

Найбільш складним завданням при реалізації багатопозиційних РЛС ЗПК є забезпечення синхронізації прийомних позицій з передавальною за несучою частотою, частотою повторення й орієнтацією в просторі ДСА системи.

Список літератури

1. Кондратенков Г.С. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: учеб. пособ. для вузов / А.Ю. Фролов; под ред. Г.С. Кондратенкова. - М.: «Радиотехника», 2005. - 368 с.

2. Радиолокационные станции бокового обзора / А.П. Реутов, Б.А. Михайлов, Г.С Кондратенков, Б.В. Бойко. - М.: Сов. радио, 1970. - 386 с.

3. Радиолокационные станции обзора Земли / В.А. Потехин, А.П. Реутов, Ю.А. Феоктистов; под. ред. Г.С. Кондратенкова. - М.: Радио и связь, 1983. - 218 с.

4. *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.*

5. Дружинін В.А. Проблеми формування та обробки радіолокаційної інформації в системах радіобачення: монографія / В.А. Дружинін. - К.: Логос, 2013. – 230 с.

Надійшла до редколегії 02.05.2014

Рецензент: д.т.н., проф. С.В. Толюпа, Державний університет телекомунікацій, Київ.

ПРОЦЕДУРЫ КОМПЕНСАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ ОБ ОБЪЕКТАХ НАБЛЮДЕНИЯ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С ПЕРЕМЕННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ

В.А. Дружинин

В работе рассмотрено одно из направлений компенсации информационных потерь об объектах наблюдения в радиолокационных системах с переменной пространственной конфигурацией, за счет учета информации о форме амплитуды сигналов отражения от объектов. Считается, что амплитуда сигнала отражения от объектов значительно превышает уровень помех и амплитуду сигнала отражения от фона поверхности.

Ключевые слова: *радиолокационные системы с переменной пространственной конфигурацией, объекты наблюдения, радиолокационные сигналы.*

PROCEDURES FOR PAYMENT INFORMATION LOSS ON OBJECTS OF SURVEILLANCE RADAR SYSTEMS VARIABLE SPATIAL CONFIGURATION

V. Druzhinin

This article examines one of the areas of compensation information loss about the objects in radar surveillance systems with variable spatial configuration, due to the inclusion of information about the shape of the amplitude of the signal reflected from the object. It is considered that the amplitude of the reflected signal from objects much greater than the noise level and the amplitude of the reflection from the background surface.

Keywords: *radar system with variable spatial configuration, monitoring objects.*