

АЛГОРИТМ ВІДНОВЛЕННЯ ПОЛІВ МЕТОДОМ ВИЯВЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ОБ'ЄКТІВ В СИСТЕМАХ РАДІОБАЧЕННЯ З БАГАТОПОЗИЦІЙНИМ ПРИЙОМОМ ІНФОРМАЦІЇ

В роботі представлений алгоритм відновлення поля $x(i, j)$, заснований на методі виявлення радіозображень об'єктів за інтегральними спостереженнями з урахуванням інформації про форму амплітуди сигналів віддзеркалення від об'єктів. Вважається, що амплітуда сигналу віддзеркалення від об'єктів значно перевищує рівень завад і амплітуду сигналу відбиття від фону поверхні.

Ключові слова: система радіобачення, об'єкт, сигнал, амплітуда, завада, алгоритм відновлення.

Вступ. Одним із напрямків вирішення проблеми відновлення зображень радіоконтрастних об'єктів на поверхні при підвищенні роздільної здатності [1-3] систем радіобачення (СРБ) за азимутом засноване на елементах теорії виявлення та оцінювання параметрів сигналів [4] з урахуванням інформації щодо форми послідовності амплітуд сигналів віддзеркалення від об'єктів спостереження. Це дає можливість синтезувати досить прості й надійні алгоритми відновлення поля $x(i, j)$ шляхом виявлення та відновлення послідовностей амплітудних сигналів віддзеркалення від об'єктів в реальному масштабі часу. В роботі пропонується алгоритм, заснований на методі виявлення радіозображень об'єктів за інтегральними спостереженнями з урахуванням інформації про форму амплітуди сигналів віддзеркалення від об'єктів. Вважається, що амплітуда сигналу віддзеркалення від об'єктів значно перевищує рівень завад і амплітуду сигналу відбиття від фону поверхні.

Постановка задачі

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

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

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 елемента дальності на поверхні залежить від дальності і висоти польоту h : $\theta = \arccos\left[\frac{h}{R_i}\right]$; $w_k(i, j)$ - випадкова

складова з нульовим середнім, яку з деяким наближенням можна вважати гауссівською. При спостереженні поверхні в заданому невеликому діапазоні дальності коефіцієнти $\alpha_k(i, j)$ практично можна вважати незалежними від i . Випадкові поля $x(i, j)$ і $w(i, j)$ у виразі (1) в загальному випадку коррелюванні 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

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

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

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

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

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

в кожній i -й строчці ($i = \overline{1, M}$) матриці радіозображень (РЗ) $y(i, j), i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}$, незалежно від інших рядків.

При спостереженні ряду відомих об'єктів на поверхні доцільно завдання відновлення поля $x(i, j)$ вирішувати як завдання виділення зображень об'єктів з урахуванням форми послідовності амплітуд сигналу віддзеркалення від об'єктів. В якості простої моделі такої послідовності у довільній i -й рядку матриці зображення зручно взяти кусочно-постійну гратчасту функцію виду

$$x_s(j) = A_s, j \in \{j_1(s), \dots, j_2(s)\}, j_2 \geq j_1, \text{ чи } x_s(j) = 0, j \notin \{j_1(s), \dots, j_2(s)\},$$

де A_s - амплітуда сигналу відбиття від s -го об'єкта (або s -го ділянки апроксимації);

$j_1(s), j_2(s)$ - початкова та кінцева точки s -ої ділянки, причому амплітуда відбиття від об'єкта значно вище амплітуди відбиття від підстилаючої поверхні.

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 s -м об'єктом, без урахування перешкоди $w(j)$.

Завдання полягає у виявленні початкових $j_1(s)$ і кінцевих точок шуканих послідовностей $\{j_1(s), \dots, j_2(s)\}, s = \overline{1, r}$, тобто перебуванні оцінок $\hat{j}_1(s), \hat{j}_2(s), s = \overline{1, r}$, 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 $w(j) = 0, \forall j = \overline{1, N}$.

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

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

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

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 перешкод $w(j)$, будуть проявлятися точки максимуму і точки перегину, відповідні шуканим послідовностям, що дозволяє оцінити $j_1(s), j_2(s), A_s, s = \overline{1, r}$. Ця ідея використовується в наступному евристичному алгоритмі (у разі декількох довільно розташованих об'єктів зазначене відповідність не завжди буде виконуватися).

Таким чином, алгоритм відновлення полів розсіювання може бути реалізований за рахунок виконання наступних операцій.

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

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

2. Незалежно в кожному i -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 $y(j), j = 1, 2, \dots, N$ (змінна i опущена) обчислюються оцінки параметрів за формулою

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

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

2.3. У перший момент j появи негативного знаку другої похідної ($a_2(j) < 0$) фіксується точка перегину $j_1 = j$ функції $a_0(j)$, як початок проміжку опуклості $a_0(j)$. Після зміни знаку $a_2(j) (a_2(j) > 0)$ фіксується кінець проміжку $j_2 = j$.

2.4. Додатково на $\{j_1, \dots, j_2\}$ 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 $a_0(j_1) > a_0(j_2)$, або $j_2 := j_2 + \Delta j$, якщо $a_0(j_1) < a_0(j_2)$, 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 п.п. 2.1-2.5 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 радіолокаційне зображення об'єктів на поверхні з підвищеним розділенням за азимутом. Рух по рядку може здійснюватися зліва - направо або справа - наліво. Можлива спільна обробка зображень, отриманих для двох таких незалежних проходів.

4. Моделювання роботи алгоритму здійснюється попередньо з метою підбору параметрів λ і δj шляхом вирішення наступної зворотної задачі (таке рішення в загальному випадку не є єдиним).

4.1. Для даної матриці зображення (поля вимірів) $y(i, j), i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}$, отриманої для групи точкових і протяжних об'єктів на фоні підстилаючої поверхні шляхом натурних спостережень, при фіксованих $\lambda, \delta j$ обчислюються за допомогою розглянутого алгоритму оцінки амплітуд поля 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 зображень $\hat{y}(i, j)$ і $y(i, j), i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}$, наприклад в сенсі евклідового відстані $e(\hat{y}, y)$, або відстані Хеммінга $d(\hat{y}, y)$:

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

4.4. Оптимальні значення $\lambda, \delta j$, відповідні мінімуму функції $d(\hat{y}, y) = \varphi(\lambda, \delta j)$, 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} поля вимірювання в окремому рядку матриці зображення.

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 $j_0: \bar{x} = x(j_0), j \in \{1, \dots, l\}$, й виноситься за знак суми за теоремою про середню; l - довжина об'єкта. Приймавши 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.

Врахування інформації щодо форми послідовності амплітуд сигналів віддзеркалення від об'єктів дає можливість синтезувати алгоритми відновлення радіолокаційного поля шляхом виявлення та відновлення послідовностей амплітудних сигналів віддзеркалення від об'єктів спостереження в реальному масштабі часу.

Перспективним напрямком підвищення роздільної здатності СРБ за кутовими координатами об'єктів спостереження є реалізація класу алгоритмів багатоканального прийому радіолокаційної інформації.

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

Багатопозиційний режим забезпечує: високу роздільну здатність у всій зоні огляду прийомної позиції, у тому числі в передній зоні; скритність роботи прийомних позицій; малі маса, енергоспоживання й вартість апаратури прийомної позиції.

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 РСА всього у два рази.

Найбільш складним завданням при реалізації багатопозиційної РСА є забезпечення синхронізації прийомних позицій з передавальною за несучою частотою, частотою повторення й напрямком ДС антен.

ЛІТЕРАТУРА

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.

Надійшла: 15.12.2012

Рецензент: д.т.н., проф. Козловський В.В.