УДК 621.319

АЛГОРИТМ ДВУХЭТАПНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В. К. Клочко

Рязанский государственный радиотехнический университет,
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1
E-mail: KlochkoVK@mail.ru

Предложен алгоритм восстановления двумерных радиолокационных изображений в частотной области, основанный на свойстве аппаратной функции разделения по переменным, позволяющий свести процедуру двумерного восстановления к двухэтапной процедуре одномерного восстановления, что дает выигрыш в быстродействии. Дано сравнение с алгоритмом восстановления в пространственной области.

Ключевые слова: радиолокация, радиолокационное изображение, разрешающая способность РЛС.

Введение. При наблюдении за наземной и воздушной обстановкой с помощью бортовой радиолокационной или радиотеплолокационной станции (РЛС или РТЛС) миллиметрового диапазона в зоне обзора размера $N_1 \times N_2$ элементов дискретизации по углу места (j_1) и азимуту (j_2) создается режим наблюдения, при котором в элементах разрешения дальности формируется матрица $Y = \{y(j_1, j_2)\}$ двумерного амплитудного радиолокационного изображения (РЛИ) зоны обзора. Каждый элемент $y(j_1, j_2)$ матрицы Y характеризует суммарную по ширине диаграммы направленности (ДН) приемного канала интенсивность поля отражения или излучения. Для одноканальных сканирующих, а также для многоканальных РЛС и РТЛС из-за перекрытия ДН изображение получается смазанным по строкам и столбцам.

Повышение разрешающей способности смазанных двумерных изображений достигается их алгоритмической обработкой с привлечением оптимальных методов восстановления изображений, указанных, например, в работах [1–4]. Однако открытой остается проблема повышения быстродействия алгоритмов восстановления, особенно актуальная для бортовых РЛС и РТЛС.

Цель работы — показать, что быстродействие алгоритма восстановления РЛИ в частотной области повышается за счет более рациональной организации вычислений для РЛС и РТЛС, у которых ДН описываются функцией с разделяющимися переменными.

Модель измерений и постановка задачи. Рассматривается интегральная (суммарная) модель измерений вида

$$y(j_1, j_2) = \sum_{i_1=j_1-m_1}^{j_1+m_1} \sum_{i_2=j_2-m_2}^{j_2+m_2} \alpha(j_1 - i_1, j_2 - i_2)\, x(i_1, i_2) + w(j_1, j_2), \qquad (1)$$

$$j_1 = \overline{0, N_1 - 1}, \quad j_2 = \overline{0, N_2 - 1},$$

где $y(j_1,\, j_2)$ — измерение, полученное в j_1-м и j_2-м угловых направлениях; $(2m_1 + 1)\times$ $\times(2m_2 + 1)$ — размер окна измерений, определяемый шириной ДН приемного канала на уровне 0,5 мощности $(2m_1 + 1 < N_1,\ 2m_2 + 1 < N_2)$; $\alpha(i_1, i_2)$ — нормированные коэффициенты ДН (аппаратная четная функция) приемного канала; $x(i_1, i_2)$ — искомые элементы поля X, характеризующие его интенсивность в i_1-м и i_2-м элементах дискретизации; $w(j_1, j_2)$ — помеха типа белого гауссова шума.

В общем случае все составляющие модели (1) — комплексные величины, характеризуемые амплитудой и фазой.

Задача предлагаемой работы заключается в восстановлении или поиске оценок $\hat{x}(i_1, i_2)$ элементов поля X зоны обзора в частотной или пространственной области. Применение частотных методов позволяет использовать быстрое преобразование Фурье на базе специализированных (сигнальных) процессоров бортовых ЭВМ. Решение подобных задач в классе линейных оценок, отвечающих повышенным требованиям быстродействия бортовых РЛС и РТЛС, базируется на критериях минимума среднеквадратического отклонения ошибки восстановления, максимума отношения сигнал/шум, максимума апостериорной плотности, методах максимального правдоподобия и наименьших квадратов (МНК). Все эти подходы для модели (1) в пространственной области приводят к линейным оценкам в форме свертки измерений с весовыми коэффициентами, что в частотной области реализуется с помощью линейного восстанавливающего фильтра. Далее рассматривается алгебраический подход к синтезу восстанавливающего частотного фильтра и предлагается метод повышения его быстродействия в сравнении с пространственным фильтром.

Восстановление изображений в частотной области. Изображение оригинала (1) по теореме Бореля о свертке в двумерной области целочисленных частот n_1, n_2 дает алгебраическое уравнение относительно неизвестного X :

$$Y(n_1, n_2) = A(n_1, n_2)X(n_1, n_2) + W(n_1, n_2), \quad n_1 = \overline{0, N_1 - 1}, \quad n_2 = \overline{0, N_2 - 1}, \tag{2}$$

где Y, A, X, W — образы двумерного дискретного преобразования Фурье (ДПФ), причем Y и A вычисляются следующим образом:

$$Y(n_1, n_2) = \sum_{j_1=0}^{N_1-1} \sum_{j_2=0}^{N_2-1} y(j_1, j_2) \exp\{-2\pi i(j_1 n_1/N_1 + j_2 n_2/N_2)\}, \tag{3}$$

$$A(n_1, n_2) = \sum_{j_1=0}^{N_1-1} \sum_{j_2=0}^{N_2-1} \alpha(j_1, j_2) \exp\{-2\pi i(j_1 n_1/N_1 + j_2 n_2/N_2)\}. \tag{4}$$

Решение уравнения (2) без учета $W(n_1, n_2)$ приводит к выражениям

$$\hat{X}(n_1, n_2) = Y(n_1, n_2)H(n_1, n_2), \quad H(n_1, n_2) = \frac{1}{A(n_1, n_2)}R(n_1, n_2), \tag{5}$$

где $n_1 = \overline{0, N_1 - 1}$; $n_2 = \overline{0, N_2 - 1}$; $H(n_1, n_2)$ — заранее вычисляемая передаточная функция восстанавливающего фильтра, на вход которого подается $Y(n_1, n_2)$.

Функция $H(n_1, n_2)$ обратно зависит от спектральной характеристики ДН $A(n_1, n_2)$ и прямо зависит от стабилизирующего множителя $R(n_1, n_2)$, который предотвращает резкое увеличение $H(n_1, n_2)$ в нулях $A(n_1, n_2)$ и подавляет помеху $W(n_1, n_2)$ на краях спектра ДН [1]:

$$R(n_1, n_2) = |A(n_1, n_2)|^2/(|A(n_1, n_2)|^2 + \delta\Omega(n_1, n_2)).$$

Здесь δ — параметр регуляризации, практически выбираемый подбором из соображений приемлемого качества восстановленного изображения, при этом достигается компромисс между зашумленностью изображения и узнаваемостью изображений объектов, после чего зашумленность убирается с помощью нелинейных пространственных фильтров [3];

$\Omega(n_1, n_2)$ — возрастающая функция n_1 и n_2, например степенная $\Omega(n_1, n_2) = n_1^{2r} + n_2^{2s}$, где r и s — порядки регуляризации, обычно равные 1 или 2.

Фильтр (5) почти без искажений пропускает низкочастотные составляющие входного сигнала и усиливает высокочастотные (на спаде характеристики ДН), увеличивающие четкость изображения.

Оценка искомого изображения $\hat{x}(i_1, i_2)$ находится с помощью обратного двумерного ДПФ:

$$\hat{x}(i_1, i_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \hat{X}(n_1, n_2) \exp\{-2\pi i(i_1 n_1/N_1 + i_2 n_2/N_2)\},$$
$$i_1 = \overline{0, N_1 - 1}, \quad i_2 = \overline{0, N_2 - 1}. \tag{6}$$

Метод двухэтапного восстановления в частотной области. Увеличить быстродействие восстанавливающего фильтра (5) можно за счет более рациональной организации вычислений, основанной на свойстве аппаратной функции $\alpha(i_1, i_2)$ как функции с разделяющимися переменными:

$$\alpha(i_1, i_2) = a(i_1) b(i_2), \tag{7}$$

где $a(i_1)$ и $b(i_2)$ — четные функции одной переменной.

Учет (7) в составе (1) позволяет представить двойную сумму в виде повторной:

$$y(j_1, j_2) = \sum_{i_2=j_2-m_2}^{j_2+m_2} b(j_2 - i_2) \sum_{i_1=j_1-m_1}^{j_1+m_1} a(j_1 - i_1) x(i_1, i_2) + w(j_1, j_2) \tag{8}$$

или в виде двух одномерных сверток:

$$y(j_1, j_2) = \sum_{i_2=j_2-m_2}^{j_2+m_2} b(j_2 - i_2) z(j_1, i_2) + w(j_1, j_2), \quad z(j_1, i_2) = \sum_{i_1=j_1-m_1}^{j_1+m_1} a(j_1 - i_1) x(i_1, i_2)$$

с изображениями

$$Y(n_1, n_2) = B(n_2) Z(n_1, n_2) + W(n_1, n_2), \quad Z(n_1, n_2) = A(n_1) X(n_1, n_2)$$

или без учета помех $W(n_1, n_2)$:

$$Y(n_1, n_2) = B(n_2) Z(n_1, n_2), \quad Z(n_1, n_2) = A(n_1) X(n_1, n_2),$$

где $A(n_1)$ и $B(n_2)$ — изображения множителей $a(i_1)$ и $b(i_2)$ функции (7).

Двухэтапное решение задачи восстановления в частотной области сводится к последовательному нахождению оценок

$$\hat{Z}(n_1, n_2) = H_2(n_2) Y(n_1, n_2), \quad H_2(n_2) = R_2(n_2)/B(n_2),$$

$$\hat{X}(n_1, n_2) = H_1(n_1) \hat{Z}(n_1, n_2), \quad H_1(n_1) = R_1(n_1)/A(n_1),$$

где $R_1(n_1), R_2(n_2)$ — стабилизирующие множители.

Алгоритм двухэтапного восстановления сводится к следующему.

1. Заранее вычисляются одномерные ДПФ коэффициентов диаграммы направленности антенны:

$$A(n_1) = \sum_{i_1=0}^{N_1-1} a(i_1) \exp\{-2\pi i(i_1 n_1/N_1)\}, \quad n_1 = \overline{0, N_1-1}, \tag{9}$$

$$B(n_2) = \sum_{i_2=0}^{N_2-1} b(i_2) \exp\{-2\pi i(i_2 n_2/N_2)\}, \quad n_2 = \overline{0, N_2-1}, \tag{10}$$

и передаточные функции одномерных восстанавливающих фильтров:

$$H_1(n_1) = \frac{1}{A(n_1)} R_1(n_1), \quad H_2(n_2) = \frac{1}{B(n_2)} R_2(n_2), \tag{11}$$

где стабилизирующие множители в (11)

$$R_1(n_1) = |A(n_1)|^2/(|A(n_1)|^2 + \delta n_1^{2k}), \quad R_2(n_2) = |B(n_2)|^2/(|B(n_2)|^2 + \delta n_2^{2k})$$

необходимы для устойчивой работы фильтров; δ — параметр регуляризации, выбираемый заранее; $k = 1$ или 2.

2. В процессе формирования n_1-х строк, $n_1 = \overline{0, N_1-1}$, матрицы РЛИ в частотной области находится одномерное ДПФ измерений, взятых по строке:

$$Y(n_1, n_2) = \sum_{j_2=0}^{N_2-1} y(n_1, j_2) \exp\{-2\pi i(j_2 n_2/N_2)\}, \quad n_2 = \overline{0, N_2-1}. \tag{12}$$

Одновременно вычисляется ДПФ промежуточных оценок:

$$\hat{Z}(n_1, n_2) = H_2(n_2) Y(n_1, n_2). \tag{13}$$

3. Затем независимо или параллельно в каждом n_2-м столбце, $n_2 = \overline{0, N_2-1}$, вычисляется ДПФ искомых оценок:

$$\hat{X}(n_1, n_2) = H_1(n_1) \hat{Z}(n_1, n_2), \quad n_1 = \overline{0, N_1-1}. \tag{14}$$

4. Обратным ДПФ восстанавливается искомое изображение $\hat{x}(i_1, i_2)$ по формуле (6). На экран индикатора выводятся оценки $\hat{x}(i_1, i_2)$, $i_1 = \overline{m_1, N_1-1-m_1}$, $i_2 = \overline{m_2, N_2-1-m_2}$, обладающие наибольшей точностью восстановления.

5. В случае комплексных измерений (1) берутся модули комплексных оценок $\hat{x}(i_1, i_2)$, совокупность которых $\{|\hat{x}(i_1, i_2)|\}$ представляет собой восстановленное амплитудное изображение наземной или воздушной обстановки в зоне обзора РЛС с повышенной разрешающей способностью по углу места i_1 и азимуту i_2, которое выводится на экран индикатора.

Рассмотрим аппроксимацию действительной части коэффициентов ДН экспоненциальной функцией с квадратичным показателем степени:

$$a(i_1) = \exp\{-c i_1^2/\Delta_1^2\}, \quad b(i_2) = \exp\{-c i_2^2/\Delta_2^2\},$$

где Δ_1 и Δ_2 — ширина ДН (в осевом сечении) по азимуту и углу места на уровне 0,5 мощности: $\Delta_1 = 2m_1 + 1$, $\Delta_2 = 2m_2 + 1$; c — коэффициент аппроксимации (например, $c = 1{,}694$ или $c = 0{,}694$ для более широкой ДН).

Так как при переводе в частотную область начальная точка отсчета (i_{01}, i_{02}) в пространственной системе координат (i_1, i_2) может быть выбрана произвольно, то при вычислении (9), (10) целесообразно координаты (i_{01}, i_{02}) выбирать по центру $N_1 \times N_2$-окна измерений: $i_{01} = (N_1 - 1)/2$, $i_{02} = (N_2 - 1)/2$, где N_1, N_2 — нечетные числа, тогда

$$a(i_1) = \exp\{-c(i_1 - i_{01})^2/\Delta_1^2\}, \quad b(i_2) \exp\{-c(i_2 - i_{02})^2/\Delta_2^2\}.$$

Метод двухэтапного восстановления изображения в пространственной области. Для модели измерений в виде двойной суммы (1) решение задачи восстановления $x(i_1, i_2)$ в пространственной области приводит к МНК-алгоритму оценивания [4], который можно представить двойной суммой в виде свертки измерений с весовыми коэффициентами:

$$\hat{x}(i_1, i_2) = \sum_{j_1=i_1-k_1}^{i_1+k_1} \sum_{j_2=i_2-k_2}^{i_2+k_2} h(i_1 - j_1, i_2 - j_2) y(j_1, j_2),$$
$$i_1 = \overline{k_1, N_1 - 1 - k_1}, \quad i_2 = \overline{k_2, N_2 - 1 - k_2}, \tag{15}$$

где $K_1 \times K_2 = (2k_1 + 1) \times (2k_2 + 1)$ — размер окна оценивания: $k_1 \geq m_1$, $k_2 \geq m_2$; $h(i_1, i_2)$ — элементы матрицы весовых коэффициентов МНК-алгоритма, пронумерованные соответственно свертке. В частотной области преобразованию (15) соответствует операция (5) прохождения $Y(n_1, n_2)$ через двумерный восстанавливающий фильтр с передаточной функцией $H(n_1, n_2)$.

Для модели измерений в виде повторной суммы (8) МНК-алгоритм также представляется в виде повторной суммы

$$\hat{x}(i_1, i_2) = \sum_{j_1=i_1-k_1}^{i_1+k_1} h_1(i_1 - j_1) \sum_{j_2=i_2-k_2}^{i_2+k_2} h_2(i_2 - j_2) y(j_1, j_2)$$

и реализуется двухэтапной процедурой. Вначале обработка данных ведется независимо в каждой i_1-й строке, $i_1 = \overline{0, N_1 - 1}$, по мере образования строк матрицы РЛИ:

$$\hat{z}(i_1, i_2) = \sum_{j_2=i_2-k_2}^{i_2+k_2} h_2(i_2 - j_2) y(i_1, j_2), \quad i_2 = \overline{k_2, N_2 - 1 - k_2},$$

и затем независимо (параллельно) в каждом i_2-м столбце, $i_2 = \overline{k_2, N_2 - 1 - k_2}$:

$$\hat{x}(i_1, i_2) = \sum_{j_1=i_1-k_1}^{i_1+k_1} h_1(i_1 - j_1) \hat{z}(j_1, i_2), \quad i_1 = \overline{k_1, N_1 - 1 - k_1}.$$

Данному преобразованию соответствуют операции (13), (14) прохождения изображения $Y(n_1, n_2)$ последовательно через два одномерных восстанавливающих фильтра с передаточными функциями $H_2(n_2)$ и $H_1(n_1)$.

В вычислительном плане для получения точечных оценок (15) в пространственной области достаточно $K_1 \times K_2$-окна измерений, размеры которого меньше размеров зоны обзора: $K_1 < N_1$, $K_2 < N_2$, что позволяет вести обработку в процессе поступления данных в режиме скользящего окна. Аналогично организуются вычисления и в частотной области. В этом случае символы N_1, N_2 в формулах (3), (4), (9), (10) и др. заменяются символами K_1, K_2 и объем вычислительных операций значительно снижается.

Заключение. Применение двухэтапной процедуры в частотной области позволяет уменьшить объем вычислительных операций бортовой ЭВМ при $N_1 = N_2 = N$ с $2N^4 + N^2 \sim 2N^4$ обобщенных операций до $N^4 + N^3 + 2N^2 \sim N^4$, т. е. примерно в 2 раза. Это соотношение сохраняется и при использовании $K_1 \times K_2$-скользящего окна в частотной области. В случае применения двухэтапной процедуры в пространственной области объем вычислительных операций при $K_1 = K_2 = K$ уменьшается с N^2K^2 обобщенных операций до $N^2 2K$, т. е. в $K/2$ раза, что при $K = 10$ и 20 составляет соответственно 5 и 10 раз. Таким образом, предложенные в данной работе алгоритмы двухэтапного восстановления дают выигрыш в быстродействии как в частотной, так и в пространственной области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Василенко Г. И., Тараторин А. М.** Восстановление изображений. М.: Радио и связь, 1986. 304 с.
2. **Грузман И. С., Киричук В. С., Косых В. П. и др.** Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 352 с.
3. **Воскобойников Ю. Е.** Комбинированный нелинейный алгоритм восстановления контрастных изображений при неточно заданной аппаратной функции // Автометрия. 2007. **43**, № 6. С. 3–16.
4. **Клочко В. К.** Методы формирования трехмерных изображений поверхности в бортовых системах радиовидения // Автометрия. 2009. **45**, № 1. С. 23–33.

Поступила в редакцию 30 июня 2009 г.