

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

И. Н. Пресняков, О. В. Сытник

(Харьков, Украина)

КОМБИНИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Предлагается метод вторичной обработки изображений, полученных в системах дистанционного зондирования поверхности Земли с синтезированием апертуры антенны. Процедура обработки включает фильтрацию исходного изображения при помощи двумерного медианного и низкочастотного фильтров. Обсуждается проблема выбора характеристик фильтров для получения минимального уровня спекл-шума при приемлемом размытии границ детерминированных объектов на изображении. Алгоритм допускает распараллеливание вычислений и реализацию в виде спецпроцессора.

Радиолокационные станции с синтезированием апертуры (РСА) — одно из основных средств дистанционного зондирования земных покровов [1]. В результате обработки сигналов в РСА формируются двумерные изображения подстилающей поверхности с достаточно высоким пространственным разрешением. Разрешение по дальности обеспечивается использованием широкополосных сигналов с большой базой, а разрешение по азимуту реализуется путем синтезирования большого антенного раскрытия с помощью излучения когерентной последовательности импульсов, последующего запоминания амплитуд и фаз отраженных сигналов и когерентной их обработки. Присущий когерентным системам спекл-шум [2], или шум когерентности, уменьшает возможность разрешения мелких деталей на РСА-изображениях. Особенностью этой мультипликативной помехи является то, что спекл-шум нельзя уменьшить путем увеличения мощности излучаемого сигнала.

Для подавления спекл-шума существует несколько методов, которые можно разделить на две группы [3]. Первая группа — это методы, основанные на когерентном усреднении независимо полученных радиолокационных изображений одного и того же участка подстилающей поверхности, а вторая — на апостериорной обработке уже сформированных изображений. Причем первая группа методов требует, как правило, сложных аппаратурных решений при обработке в реальном времени и мощных вычислительных средств при наземной обработке сигналов РСА. Методы из второй группы базируются на разнообразных подходах к фильтрации изображений, в частности, гомоморфной [4], медианной [5], винеровской [4], калмановской [6] фильтрации и др. Эта группа методов позволяет найти компромисс между сложностью бортовой и наземной обработок сигналов РСА и качеством изображений.

Задача обработки РСА-изображений подстилающей поверхности существенно осложняется при наличии внешних помех. Представим модель радиолокационного изображения, получаемого в РСА, в виде интегральной свертки

$$Y(x, y) = \text{mod} \left\{ \int \int_{\lambda \in R^2} B((x - \tilde{x}), (y - \tilde{y})) H(\tilde{x}, \tilde{y}) d\tilde{x} d\tilde{y} \right\}, \quad (1)$$

где $Y(x, y)$ — пространственная функция яркости радиолокационного изображения (РЛИ); $B(x, y) = A(x, y)\xi(x, y)$; $A(x, y)$ — пространственная функция

яркости участка поверхности, которую необходимо восстановить; $\xi(x, y)$ — мультипликативная помеха; $H(\tilde{x}, \tilde{y})$ — опорная функция тракта передачи и обработки сигнала РСА.

Предположим, что функция яркости $A(x, y)$, соответствующая однородным участкам подстилающей поверхности, стационарна и имеет равномерную спектральную плотность. Используя это предположение и модель (1), будем строить оптимальный в смысле минимума среднеквадратичной ошибки фильтр. Целевой функционал такой оптимизационной задачи запишем в виде

$$\epsilon^2 = E \left\{ \left[A(x, y) - \iint_{\lambda \in R^2} Y(x - \tilde{x}, y - \tilde{y}) P(\tilde{x}, \tilde{y}) d\tilde{x} d\tilde{y} \right]^2 \right\}, \quad (2)$$

где ϵ^2 — средний квадрат ошибки; $E\{\cdot\}$ — оператор вычисления математического ожидания; $P(\tilde{x}, \tilde{y})$ — импульсный отклик искомого фильтра. Задача сводится теперь к поиску такой функции $P(\tilde{x}, \tilde{y})$, которая обеспечивает минимум функционала (2). Используя свойства преобразования Фурье, запишем (2) в виде

$$S_\epsilon^2(f_x, f_y) = S_A^2(f_x, f_y) - 2M_\xi S_A(f_x, f_y) \otimes [S_A(f_x, f_y) S_H(f_x, f_y) S_P(f_x, f_y)] + S_Y(f_x, f_y) S_P(f_x, f_y) S_P^{*T}(f_x, f_y) S_Y^{*T}(f_x, f_y), \quad (3)$$

где $S_\epsilon^2(f_x, f_y)$ — пространственный спектр ошибок фильтрации; f_x, f_y — пространственные частоты; M_ξ — математическое ожидание процесса ξ ; $S_H(f_x, f_y)$ — частотная характеристика тракта передачи и обработки сигнала РСА; $S_P(f_x, f_y)$ — частотная характеристика фильтра; $S_A(f_x, f_y)$, $S_Y(f_x, f_y)$ — пространственные спектры $A(x, y)$ и $Y(x, y)$; \otimes — знак интегральной свертки. Далее, вычисляя производную $\partial S_\epsilon^2(f_x, f_y) / \partial S_P(f_x, f_y)$, приравнявая ее нулю и решая относительно S_P , получаем

$$S_P(f_x, f_y) = M_\xi S_A(f_x, f_y) [S_A(f_x, f_y) \otimes S_\xi(f_x, f_y)]^{-1} S^{-1}(f_x, f_y). \quad (4)$$

Соотношение (4) определяет частотную характеристику оптимального в смысле минимума среднеквадратичной ошибки фильтра. Причем, как следует из (4), для получения оптимальной характеристики в общем случае необходимо знать $S_A(f_x, f_y)$ и $S_\xi(f_x, f_y)$. Если справедливо сделанное вначале предположение относительно равномерности спектральной оценки $S_A(f_x, f_y)$, то единственным неизвестным числом в (4) является $S_\xi(f_x, f_y)$. Следует отметить, что спектральная функция $S_\xi(f_x, f_y)$ в общем случае может иметь произвольный вид, так как определяется характером и свойствами внешней помехи. Поэтому целесообразно значения $S_\xi(f_x, f_y)$ в (4) заменить на их оценки $\hat{S}_\xi(f_x, f_y)$, полученные непосредственно в процессе обработки изображения. Найти оценки $\hat{S}_\xi(f_x, f_y)$ по наблюдаемой сцене оказывается затруднительным из-за сложности реальных сцен, поэтому необходимо предварительно преобразовать изображение, сведя его к однородному шумовому полю, исключив постоянный фон. Наиболее удобно использовать для этого комбинацию медианного [5] и низкочастотного [4] фильтров.

Двумерный медианный фильтр эффективен в подавлении шумов и импульсных помех на изображениях при минимальных искажениях границ. Однако если окно фильтра достаточно велико, что необходимо для сильно зашумленных изображений, такой фильтр приводит к сглаживанию углов и границ объектов сцены. С другой стороны, медианный фильтр не является оптимальным для подавления гауссовых шумов, присутствующих практически в любой реальной сцене. В этом отношении оптимальным является простой низкочастотный фильтр, однако в отличие от медианного он сильно размывает границы детерминированных объектов. Поэтому необходимо вначале так обработать сцену, чтобы удалить из нее детерминированные объекты.

Рассмотрим эту процедуру более подробно. Зашумленное РСА-изображение $Y(x, y)$ вначале подвергается обработке медианным фильтром $Y_M(x, y) = \text{Med}\{Y(x, y)\}$ с целью подготовки этого изображения для сегментации. Далее сегментация выполняется путем обработки дифференциальным оператором выделения границ. Затем из исходного изображения $Y(x, y)$ вычитается предварительно обработанное изображение $Y'_M(x, y)$, что позволяет снизить влияние детерминированных фрагментов сцены на оценку $S_\xi(f_x, f_y)$. Полученная разность $Z(x, y) = Y(x, y) - Y'_M(x, y)$ уже может быть использована для вычисления оценок $S_\xi(x, y)$. Для этого будем аппроксимировать полученное разностное поле авторегрессионной моделью вида [7]

$$Z(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mn} Z(x - x_m, y - y_n) + \varepsilon(x_m, y_n), \quad (5)$$

где ε_{mn} — стационарный гауссов шум с нулевым средним, удовлетворяющий условно некоррелированности с процессом $Z(x, y)$, т. е.

$$E\{\varepsilon(x, y) Z^{*T}(x_m, y_n)\} = 0$$

и

$$E\{\varepsilon(x, y) \varepsilon^{*T}(x_m, y_n)\} = \begin{cases} \delta & \text{для } (x, y) = (x_m, y_n), \\ 0 & \text{для } (x, y) \neq (x_m, y_n); \end{cases}$$

a_{mn} — параметры модели ($m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$); $M, N \in R^2$ — размерность модели по координатам x и y соответственно. Для вычисления оценок a_{mn} запишем (5) в виде функционала

$$\sum |\varepsilon(x, y)|^2 = \sum \left| Z(x, y) - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mn} Z(x - x_m, y - y_n) \right|^2. \quad (6)$$

Минимизация функционала (6) позволяет найти оптимальное значение параметров модели a_{mn} . Решение этой задачи в частотной области дает возможность получить выражение для частотной характеристики эквивалентного фильтра $H_\xi(f_x, f_y)$ в виде [8]

$$H_\xi(f_x, f_y) = 1 - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_{mn} \exp[-2\pi j(mf_x - nf_y)]. \quad (7)$$

Далее по оценкам выборочных корреляционных функций

$$\hat{R}(x_k, y) = (MN)^{-1} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N Z(x_m, y_n) Z(x_m + k, y_n + i) \quad (8)$$

можно найти набор коэффициентов a_{mn} как решение системы уравнений

$$R_k = \iint \text{mod} \left\{ \frac{d^k H_\xi(f_x, f_y)}{df_x^k df_y^k} \right\}^2 df_x df_y = (2\pi)^{2k} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N m^{2k} n^{2k} a_{mn}^2. \quad (9)$$

После предварительной низкочастотной фильтрации разностного изображения $Z(x, y)$ восстанавливается наблюдаемая сцена, которая затем подвергается фильтрации по алгоритму (4). Данный алгоритм использовался для обработки самолетных изображений участков сельхозугодий, получаемых с помощью РСА-дециметрового диапазона. Экспериментально установлено,

что наилучший выигрыш в соотношении сигнал/шум порядка 12 дБ получается при использовании окна медианного фильтра не более 3—5 элементов разрешения РСА и окна низкочастотного фильтра соответственно 7—10 элементов. При этом сохраняются четкие границы контуров полей. Для количественной оценки качества изображения при фильтрации использовался критерий, введенный в [4]:

$$K = \frac{1}{\max(N_A, N_I)} \sum_{i=1}^{N_A} \frac{1}{1 + \beta d^2}, \quad (10)$$

где N_I , N_A — количество элементов изображения, приходящихся на границу соответственно в идеальном и полученном после обработки изображениях; β — масштабный множитель; d — расстояние между элементом действительной границы и линией, состоящей из элементов идеальной границы, измеренное по нормали к этой линии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиолокационные станции с цифровым интегрированием апертуры системы /Под ред. В. Т. Горяинова.—М.: Радио и связь, 1988.
2. Lee J. S. Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images // SPIE Int. Conf. of Speckle.—1985.—556.—P. 170.
3. Элаши Ш., Бикнелл Т., Джордан Р. Л. и др. Радиолокационные станции с синтезированием апертуры для космической съемки поверхности планеты // ТИИЭР.—1982.—70, № 10.
4. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ.—М.: Мир, 1982.—Т. 1, 2.
5. Nades T. A., Gallagher Jr. N. C. The output distribution of median type filters // IEEE Trans. Commun.—1984.—COM-32, N 5.—P. 532.
6. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана — Бюси: Пер. с нем.—М., 1982.
7. Джайн А. К. Успехи в области математических моделей для обработки изображений // ТИИЭР.—1981.—69, № 5.
8. Gersch W. Some applications of smoothness priors in time series // 26th Conference on Decision and Control.—Los Angeles, 1987.—P. 1684.

Поступила в редакцию 14 октября 1992 г.