

2002, том 38, № 4

УДК 621.319.26

В. К. Клочко, А. А. Ермаков

(Рязань)

**АЛГОРИТМЫ ФИЛЬТРАЦИИ И СЕГМЕНТАЦИИ ТРЕХМЕРНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Предлагаются алгоритмы пространственно-временной фильтрации и сегментации трехмерных радиолокационных изображений поверхности по данным бортовой импульсно-доплеровской радиолокационной станции.

**Введение.** При обработке трехмерного радиолокационного изображения (РЛ-изображения) поверхности, полученного по данным бортовой импульсно-доплеровской радиолокационной станции (РЛС), возникает проблема доведения его до уровня, удобного для восприятия на экране индикатора. Задача имеет важное практическое значение, так как полеты в сложных метеоусловиях и ночное время надежно может обеспечить только РЛС (в отличие от оптических и тепловизионных систем). Технической базой для решения подобной задачи является создание специального режима быстрого и непрерывного электронного сканирования зоны обзора РЛС узким лучом диаграммы направленности антенны (ДНА) построчно с одновременным использованием узкополосной доплеровской фильтрации [1]. В результате периодически (период составляет десятые доли секунды) на вход алгоритмов обработки информации программно-вычислительного комплекса в моменты времени  $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$  поступают трехмерные РЛ-изображения в виде массивов данных  $S_n(R_i, \varphi_j, \theta_k)$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ , представляющих амплитуду отраженного сигнала в каждом  $i$ -,  $j$ -,  $k$ -м элементе разрешения ДНА, где  $R_i$  – дальность,  $\varphi_j$  – азимут,  $\theta_k$  – угол места. Элементы разрешения, в которых зафиксирован (при первичной обработке) отраженный сигнал, запоминаются и представляются в прямоугольной системе координат  $(x, y)$  матрицами амплитуд  $S_n(x, y)$  и высот  $h_n(x, y)$  (например, максимальные значения высоты в элементах разрешения, наиболее важные для безопасности полета) с привязкой к  $n$ -му моменту времени ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ). Для исключения ошибок дискретизации элементы разрешения  $\Delta x = \Delta y$  матриц  $S_n$  и  $h_n$  выбираются меньше элементов разрешения РЛС. Массивы  $S_n(i, j)$  и  $h_n(i, j)$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ , (нумерация  $i, j$  соответствует уже прямоугольной сетке) поступают на алгоритмы вто-

ричной обработки информации с целью восстановления изображения поверхности.

Наличие матриц высот  $h_n(i, j), n = 0, 1, 2, \dots$ , является существенной особенностью, которая отличает концепцию РЛ-наблюдения поверхности с помощью электронного управления лучом [1] от известных методов, основанных на механических системах, например [2].

Ошибки РЛ-системы наблюдения можно разбить на два типа: а) ошибки, связанные с флуктуацией отраженного сигнала; б) ошибки, связанные с незакрепленным положением РЛС в пространстве, пересчетом координат и дискретизацией. Ошибки первого типа обуславливают необходимость фильтрации по амплитуде, второго типа – по высоте.

Для подавления этих ошибок предлагается следующий метод пространственно-временной обработки РЛ-изображений [1].

1. Последовательно во времени осуществляется рекуррентная фильтрация изображений независимо по амплитуде и высоте с пересчетом массивов на основе данных о движении объекта-носителя РЛС. В результате усредняются амплитуды и высоты элементов последовательности матриц  $S_n(i, j)$  и  $h_n(i, j), n = 0, 1, 2, \dots$ , принадлежащих одним и тем же фрагментам изображения.

2. Отфильтрованное во времени РЛ-изображение в каждый текущий момент времени  $t_n$  дополнительно подвергается пространственной фильтрации с одновременной сегментацией изображения на связные по амплитуде и высоте области. Тем самым осуществляется совместная обработка по амплитуде и высоте.

3. Отфильтрованное во времени и пространстве изображение зоны обзора РЛС выводится на экран в виде уровней цветности соответственно уровням высоты. Выделенные сегменты передаются на алгоритмы идентификации (совмещения с картой местности).

Ниже предлагаются алгоритмы реализации этого метода.

#### Алгоритм временной фильтрации РЛ-изображений.

1. При первом поступлении массива  $M_0 = (S_0(i, j), h_0(i, j))$  от алгоритма формирования РЛ-изображения элементам усредненных матриц  $\tilde{S}_0(i, j), \tilde{h}_0(i, j)$  присваиваются соответствующие значения амплитуд и высот:  $\tilde{S}_0(i, j) = S_0(i, j), \tilde{h}_0(i, j) = h_0(i, j), \forall i, j$ .

2. При каждом следующем поступлении массивов выполняется усреднение входной информации  $M_1, M_2, \dots, M_n$  с имеющимися данными методом рекуррентного сглаживания по формулам:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_n(i_n, j_n) &= \tilde{S}_{n-1}(i_{n-1}, j_{n-1}) + \eta(S_n(i_n, j_n) - \tilde{S}_{n-1}(i_{n-1}, j_{n-1})), \\ \tilde{h}_n(i_n, j_n) &= \tilde{h}_{n-1}(i_{n-1}, j_{n-1}) + \eta(h_n(i_n, j_n) - \tilde{h}_{n-1}(i_{n-1}, j_{n-1})), \end{aligned} \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, i_{\max}, \quad j = 1, 2, \dots, j_{\max}.$$

где  $\eta$  – коэффициент сглаживания, при расчете которого может использоваться методика нечеткой фильтрации [3, 4].

3. Связь индексов  $i_n, j_n$  матриц  $M_n = (S_n, h_n)$  и индексов  $i_{n-1}, j_{n-1}$  матриц  $M_{n-1} = (S_{n-1}, h_{n-1})$  осуществляется путем пересчета координат по формулам:

$$i_{n-1} = [i_n \cos \varphi - j_n \sin \varphi + V_x \Delta t / \Delta x + \alpha(i_n, j_n)]_{\text{цц}}, \quad (2)$$

$$j_{n-1} = [i_n \sin \varphi + j_n \cos \varphi + V_y \Delta t / \Delta y + \beta(i_n, j_n)]_{\text{цц}},$$

где  $V_x$  и  $V_y$  – составляющие вектора скорости движения носителя РЛС;  $\varphi = \omega_n \Delta t$ ,  $\omega_n$  – угловая скорость вращения вектора скорости в горизонтальной плоскости;  $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ .

Если номера элементов  $i_{n-1}, j_{n-1}$  не выходят за границы зоны обзора матриц  $M_{n-1}$ , то осуществляется фильтрация в соответствии с (1) и усредненные значения амплитуд и высот присваиваются соответствующим элементам матриц  $\tilde{S}_n(i_n, j_n)$ ,  $\tilde{h}_n(i_n, j_n)$ . В случае выхода  $(i_{n-1}, j_{n-1})$  за пределы указанных границ фильтрация не производится, а соответствующие элементы  $(i_n, j_n)$  матриц  $M_n$  рассматриваются как вновь появившиеся элементы изображения с установкой начальных значений амплитуды и высоты.

Фильтрация по формулам (1), (2) осуществляется последовательно для каждого сектора ДНА по мере просмотра зоны обзора секторами с учетом движения и поворота носителя РЛС. Этот процесс периодически повторяется. Совокупность осредненных элементов секторов, заполняющих всю зону обзора РЛС, представляет полный массив осредненного изображения  $\tilde{M}_n = (\tilde{S}_n(i, j), \tilde{h}_n(i, j))$ , привязанный к текущему моменту времени  $t_n$  и подлежащий дальнейшей пространственной обработке.

На рис. 1 иллюстрируется матрица изображения и секторы ДНА, заполняющие ее при электронном сканировании.

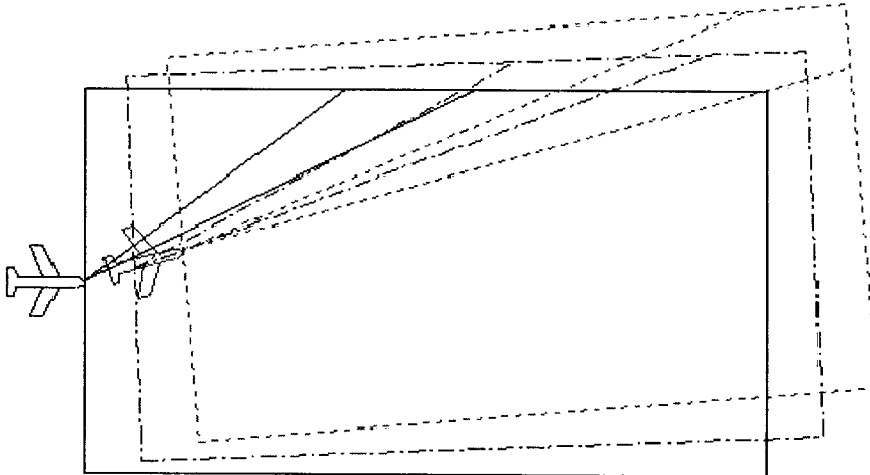


Рис. 1

**Алгоритм пространственной фильтрации–сегментации.** Сегментация выполняет разделение матрицы изображения на непересекающиеся под-области, элементы которых (взяты в любом сечении по строке или столбцу) удовлетворяют уравнению связности типа калмановского [5].

В соответствии с данной моделью осуществляется фильтрация изображения по строкам и столбцам с обнаружением моментов «разладки», когда рассматриваемый элемент матрицы не соответствует модели.

1. Рассматривается  $i$ -я строка матриц  $\tilde{M}_n$  ( $i=1,2,\dots,i_{\max}$ ). Устанавливаются начальные значения оценок амплитуды и высоты:  $\hat{S}_0 = \tilde{S}_n(i, j_0)$ ,  $\hat{h}_0 = \tilde{h}_n(i, j_0)$ ,  $j_0 = 1$ , а также начальное значение показателя связности  $I_{j_0} = 0$ .

2. Для следующего  $j$ -го элемента строки вычисляются оценки амплитуды и высоты по рекуррентным формулам, аналогичным (1):

$$\hat{S}_j = \hat{S}_{j-1} + \lambda \Delta S_j, \quad \hat{h}_j = \hat{h}_{j-1} + \gamma \Delta h_j, \quad (3)$$

$$\Delta S_j = \tilde{S}(i, j) - \hat{S}_{j-1}, \quad \Delta h_j = \tilde{h}(i, j) - \hat{h}_{j-1},$$

где  $\Delta S_j$  и  $\Delta h_j$  – разладки по амплитуде и высоте;  $\lambda$  – коэффициент сглаживания по амплитуде;  $\gamma$  – коэффициент сглаживания по высоте.

3. Вычисляется значение показателя однородности по формуле

$$I = \alpha \frac{(\Delta S_j)^2}{\Delta \bar{S}^2} + \beta \frac{(\Delta h_j)^2}{\Delta \bar{h}^2}, \quad (4)$$

где  $0 < \alpha < 1$ ,  $0 < \beta < 1$ ,  $\alpha + \beta = 1$ ;  $\Delta \bar{S}^2$  и  $\Delta \bar{h}^2$  – средние квадраты невязок, полученные по всему массиву амплитуд и высот. Весовые коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  выбираются в соответствии с информативностью данных по амплитуде и высоте, например,  $\alpha = 0,7$ ;  $\beta = 0,3$ .

4. Если  $I_j \leq \xi$  ( $\xi$  – порог), то операции п. 2 повторяются для следующего  $(j+1)$ -го элемента  $i$ -й строки, в противном случае ( $I_j > \xi$ ) формируется  $k$ -й участок связности по строке ( $k=1,2,\dots$ ) путем присвоения элементам вспомогательного массива меток  $M1(i, j_0)$ ,  $M1(i, j_0 + 1)$ ,  $M1(i, j_0 + 2), \dots, M1(i, j)$  метки  $k$ . В результате каждому элементу матрицы  $M1(i, j)$  присваивается метка принадлежности тому или иному участку связности по строке. Параллельно и независимо подобные операции п.п. 1–4 выполняются по столбцам (индексы  $i$  и  $j$  меняются местами). В результате образуется массив  $M2(i, j)$  участков связности по столбцам. Полученные участки связности по строкам и столбцам объединяются в сегменты по следующему правилу.

1. В первую строку массива меток сегментов  $M(i, j)$  переписываются соответствующие значения меток первой строки массива  $M1(i, j)$ ,  $i=1, j=1, j_{\max}$ . Устанавливается начальное значение метки или номера образующегося сегмента:  $s = M1(i, j_{\max}), i=1$ .

2. Рассматриваются последовательно все  $j$ -е элементы  $i$ -й строки ( $i=1,2,\dots,i_{\max}-1$ ):  $j=1,2,\dots,j_{\max}$  матрицы  $M2(i, j)$ . Для каждого элемента  $M2(i, j)$  осуществляется сравнение с соседним элементом по столбцу

1	1	1	1	1	1
2	3	3	3	3	4
5	6	7	7	8	9
10	11	11	11	11	12
13	13	13	13	13	13
14	14	15	15	16	16

1	3	5	10	15	17
1	4	6	11	16	17
1	4	7	12	16	17
1	4	8	13	16	17
2	4	8	13	16	18
2	4	9	14	16	18

1	1	1	1	1	1
1	2	2	2	2	1
1	2	6	6	2	1
1	2	2	2	2	1
2	2	2	2	2	2
2	2	10	10	2	2

Рис. 2

$M2(i+1, j)$ : если  $M2(i, j) = M2(i+1, j)$ , то  $M(i+1, j) = M(i, j)$  иначе  $M(i+1, j) = s+1, s := s+1$ .

3. Рассматриваются последовательно все элементы следующей  $(i+1)$ -й строки матрицы  $M1(i+1, j): j=1, 2, \dots, j_{\max}$ . Для каждого элемента  $M1(i+1, j)$  осуществляется сравнение с соседним элементом по строке  $M1(i+1, j+1)$ : если  $M1(i+1, j) = M1(i+1, j+1)$ , то берется наименьшее значение ранее присвоенной метки сегмента  $M(i+1, j)$  или  $M(i+1, j+1)$  и присваивается элементу  $M(i+1, j)$  или  $M(i+1, j+1)$  с бóльшим значением метки.

При этом старое значение метки запоминается как принадлежность ее сегменту с выбранной меткой. Для этого используется вспомогательный вектор  $\mu(s)$ , где для каждой метки  $s$  запоминается номер  $\mu$ , на который она должна быть переписана. По завершении просмотра всех элементов матрицы  $M(i, j)$  осуществляется переприсвоение меток. Данное правило иллюстрируется рис. 2.

**Выбор порога  $\xi$  в алгоритме пространственной фильтрации-сегментации.** В составе нормированного показателя (4), используемого для обнаружения момента разладки (границы сегмента), случайная величина  $\Delta S_j$  связана с ошибками первичной обработки  $\varepsilon_j$  приближенной линейной зависимостью:  $\Delta S_j = \varepsilon_j + \varepsilon_{j-1} / \sqrt{n}$ , где  $n$  – эффективная память фильтра (3). В рамках гауссовского приближения  $\varepsilon_{j-1}, \varepsilon_j \in N(0, \sigma_\varepsilon)$  и  $\Delta S_j \sim N(0, \sigma_s)$ , а плотность распределения ее квадрата  $y = \Delta S_j^2$ :

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{y}} \exp[-y/2\sigma_s^2], \quad y > 0,$$

аппроксимируется показательной функцией

$$g(y) = \frac{1}{\lambda} \exp[-y/\lambda], \quad y \geq 0,$$

где параметр  $\lambda$  оценивается по выборке  $\{y_k = \Delta S_j^2(k)\}$  ( $k$  – номер реализации) объема  $N$  методом максимального правдоподобия

$$\lambda = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Delta S_j^2(k) \approx \Delta \bar{S}^2.$$

С доверительной вероятностью  $P_0$  (например,  $P_0 = 0,95$ ) величина  $y = \Delta S_j^2$  принимает возможные значения на  $[0, y_0]$ , где

$$y_0 = -\lambda \ln(1 - P_0) \simeq -\ln(1 - P_0) \Delta \bar{S}^2 \simeq 3 \Delta \bar{S}^2.$$

Тогда на множестве реализаций  $\Delta S_j(k)$ , соответствующих модели сегмента, с вероятностью  $P_0 = 0,95$  выполняется неравенство  $\frac{\Delta S_j^2(k)}{\Delta \bar{S}^2} \leq 3$  и аналогично

$$\frac{\Delta h_j^2(k)}{\Delta \bar{h}^2} \leq 3, \text{ соответственно величина показателя (4) } I_j \leq 3, \text{ где порог } \xi = 3. \text{ На}$$

практике эта величина может меняться с учетом изменения памяти фильтра от 1 до  $n$  (например,  $\xi = 2,7; 2,5; 2,3$ ).

Для расчета средних значений  $\Delta \bar{S}^2$  и  $\Delta \bar{h}^2$ , используемых в формуле (4), осуществляется начальный проход матрицы изображения без сегментации с фильтрацией по формулам (3). Путем простого суммирования и осреднения невязок находятся первые приближения  $\Delta \bar{S}_1^2$  и  $\Delta \bar{h}_1^2$  к  $\Delta \bar{S}^2$  и  $\Delta \bar{h}^2$ , причем  $\Delta \bar{S}_1^2 > \Delta \bar{S}^2$  и  $\Delta \bar{h}_1^2 > \Delta \bar{h}^2$  за счет перепадов на границах сегментов. При вторичном проходе этой же (или следующей) матрицы найденные величины  $\Delta \bar{S}_1^2$  и  $\Delta \bar{h}_1^2$  используются в алгоритме сегментации для обнаружения границ сегментов по формуле

$$I = \alpha \frac{\Delta S_j^2}{\Delta \bar{S}_1^2} + \beta \frac{\Delta h_j^2}{\Delta \bar{h}_1^2}; \quad I_j > \xi. \quad (5)$$

Одновременно уточняются (по выборке невязок) средние квадраты  $\Delta \bar{S}_2^2$  и  $\Delta \bar{h}_2^2$ , которые используются в формуле (5) вместо  $\Delta \bar{S}_1^2$  и  $\Delta \bar{h}_1^2$  при обработке следующей матрицы.

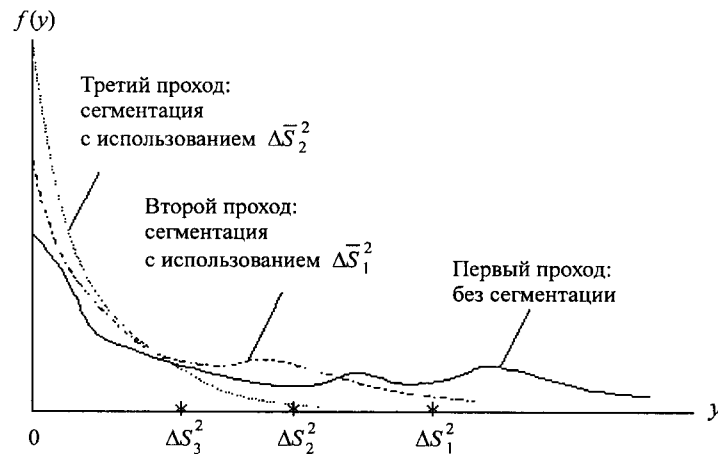


Рис. 3

Адаптация алгоритма по  $\Delta\bar{S}^2$  и  $\Delta\bar{h}^2$  занимает два–три прохода текущих матриц изображения. Начальная установка периодически может повторяться в связи с изменением характера наблюдаемой поверхности.

На рис. 3 показаны гистограммы случайной величины  $y = \Delta S_j^2$ , полученные при трех проходах матрицы изображения.

**Результаты моделирования.** Предложенные алгоритмы реализованы в автономной системе информационного обеспечения полета летательных аппаратов.

Рис. 4 иллюстрирует работу алгоритма пространственно-временной фильтрации на примере простых геометрических объектов, меняющих положение во времени. Даны изображения (по столбцам): реальное, с помехами, отфильтрованное во времени и отфильтрованное в пространстве с помощью сегментации (с учетом амплитуд и высот).

Уровень искажения изображения показан на примере среза по высоте соответственно указанным этапам обработки (линия сечения помечена на рисунке).

Карта высот составляла  $150 \times 120$  элементов по  $10 \times 10$  м, каждый элемент соответствует одному пикселу (точке) на рисунке. Изображены три компактных объекта разной высоты. Представлены три момента времени: 0, 1 и 4 с (по строкам) движения носителя РЛС с линейной скоростью 300 м/с и угловой 0,23 рад/с.

В результате пространственно-временной обработки уровень помех снижается и качество изображения (четкость, различимость) улучшается.

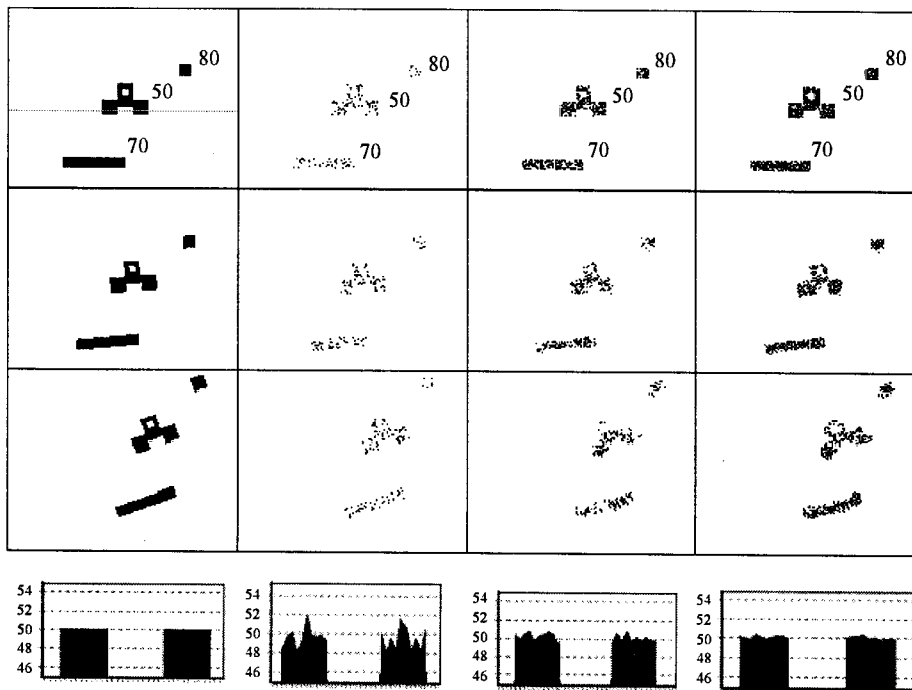


Рис. 4

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ермаков А. А., Клочко В. К., Петряев Г. В., Мойбенко В. И.** Обработка трехмерного радиоизображения // 3-я Междунар. науч.-техн. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань. 6–8 сентября. Рязань: РГРТА, 2000. С. 335.
2. **Самарин О. Ф., Курилкин В. В.** Концепция выполнения полета летательного аппарата с помощью автономных БРЛС // Радиотехника. 1998. № 4. С. 50.
3. **Клочко В. К., Мойбенко В. И.** Нечеткая фильтрация скалярного параметра // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОВР. 1991. Вып. 12. С. 104.
4. **Клочко В. К.** Выделение меняющихся изображений в условиях неопределенности // Автометрия. 1996. № 2. С. 40.
5. **Klochko V. K., Klochko K. K.** Sequential extraction of complex variable images of moving extended objects // Pattern Recognition and Image Analysis. 1992. 2, N 3. P. 276.

*Рязанская государственная  
радиотехническая академия,  
E-mail: VM@RGRTA.RYASAN.RU*

*Поступила в редакцию  
24 марта 2001 г.*

---

**Подписка на наш журнал – залог Вашего успеха!**