

一种使用灰度梯度提取合成孔径雷达 图像灰度边界的方法*

许蔚 陈宗鹭

(中国科学院电子学研究所,北京)

摘要 在合成孔径雷达数字成像的多级成像和合成孔径雷达图像的许多应用中,往往需要提取合成孔径雷达图像的灰度边界特征。人们对于由可见光或红外成像系统获得的普通图像的灰度边界提取已经进行了很多研究。使用灰度梯度提取普通图像的灰度边界非常有效,得到了广泛的应用。但由于在合成孔径雷达图像中存在严重的相干斑噪声,有人认为使用灰度梯度提取合成孔径雷达图像的灰度边界得不到好的结果。在本文中,我们考虑到合成孔径雷达图像的特性,给出了一种比较理想的提取合成孔径雷达图像的灰度边界的方法。这种方法使用相对平均灰度梯度,并且把检测与跟踪结合起来。

关键词 合成孔径雷达; 图像处理; 特征提取; 灰度边界; 灰度梯度; 多级成像

一、引言

在合成孔径雷达(SAR)数字成像的多级成像中,往往需要提取合成孔径雷达图像的灰度边界特征,以确定需要进行下一级成像的区域^[1]。在合成孔径雷达图像的分析与应用中也往往需要提取灰度边界特征。对于从普通图像中提取灰度边界的问题,已提出了许多有用的方法^[2]。利用灰度梯度的方法比较有效,得到了广泛应用。现有的这些方法对由非相干成像系统(如可见光、红外成像系统)所获得的普通遥感图像虽然很有效,但对由相干成像系统(如SAR)所获得的图像却不太有效。原因是在相干图像中存在严重的乘性噪声——相干斑噪声。Giess^[3]做了一些用梯度算子提取SAR图像的边界特征的实验,得出对于相干图像利用梯度算子进行边界检测效果不佳的结论。但是,根据本文的研究,可以利用灰度梯度对SAR图像提取边界特征。在Giess的实验中使用的并不是梯度本身,而是二阶梯度——Laplace算子作用的结果,这两者并不是完全等效的。我们从直接利用梯度检测边界出发,根据SAR图像的特性逐步改进算法。最后,得到了从SAR图像中提取灰度边界特征的比较理想的算法。这一算法利用相对平均灰度梯度来检测并跟踪边界。

* 1989年11月17日收到。

二、利用灰度梯度检测灰度边界

1. 直接利用灰度梯度检测灰度边界

灰度边界是灰度发生突变的位置。所以在灰度边界处应有较大的灰度梯度值。因此检测灰度边界最直观最简单的方法就是根据某一像元处的灰度梯度的模的大小判断该像元是否处在灰度边界上。

对于一幅数字图像 $\{g(i, j) | i = 1, 2, \dots, N_i; j = 1, 2, \dots, N_j\}$, 像元 (i, j) 及它在 3×3 窗口中的邻点如图 1 所示, 该像元处的灰度梯度 $\mathbf{G}(i, j)$ 的定义为

$$\mathbf{G}(i, j) = DJ(i, j)\mathbf{j} + DI(i, j)\mathbf{i} \quad (1)$$

此处 \mathbf{i} 为 i 增加方向的单位矢量, \mathbf{j} 为 j 增加方向的单位矢量, 而 $DI(i, j)$ 和 $DJ(i, j)$ 分别是沿 \mathbf{i} 方向和 \mathbf{j} 方向的差分:

$$DI(i, j) = g(i + 1, j) - g(i - 1, j) \quad (2)$$

$$DJ(i, j) = g(i, j + 1) - g(i, j - 1) \quad (3)$$

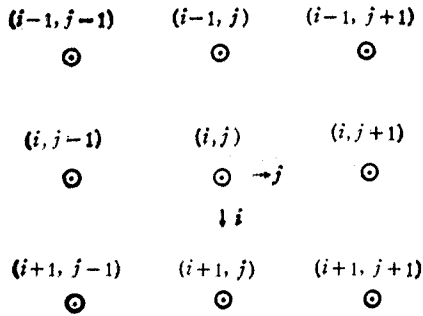


图 1 像元 (i, j) 和它在 3×3 窗口中邻点的几何关系

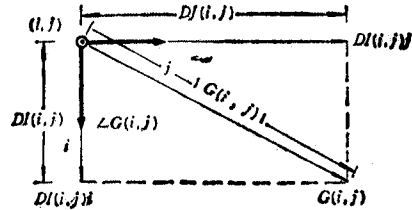


图 2 $\mathbf{G}(i, j)$ 、 $|\mathbf{G}(i, j)|$ 、 $\angle \mathbf{G}(i, j)$ 和 $DI(i, j)$ 、 $DJ(i, j)$ 的几何关系

$\mathbf{G}(i, j)$ 的模 $|\mathbf{G}(i, j)|$ 和相角 $\angle \mathbf{G}(i, j)$ 分别为:

$$|\mathbf{G}(i, j)| = \sqrt{[DJ(i, j)]^2 + [DI(i, j)]^2} \quad (4)$$

$$\angle \mathbf{G}(i, j) = \arctg[DI(i, j)/DJ(i, j)] \quad (5)$$

$\mathbf{G}(i, j)$ 、 $|\mathbf{G}(i, j)|$ 、 $\angle \mathbf{G}(i, j)$ 和 $DI(i, j)$ 、 $DJ(i, j)$ 的几何关系如图 2 所示。

理论上, $|\mathbf{G}(i, j)|$ 的值越大, 像元 (i, j) 位于边界上可能性就越大。所以可以适当地设置一个门限 T , 对于任一像元, 如果该像元处梯度的模达到这个门限, 我们就判断该像元位于边界上。记边界点的集合为 S_e , 则上述方法的数学表示为

$$(i, j) \in S_e, \text{ 当 } |\mathbf{G}(i, j)| \geq T \quad (6)$$

直接使用灰度梯度检测灰度边界的过程如图 3 所示。

2. 利用平均灰度梯度检测灰度边界

实际上, 任何图像中都存在噪声。在有噪声的情况下, 由 (2)、(3) 式计算得到的沿 \mathbf{i} 方向的差分和沿 \mathbf{j} 方向的差分不再能完全反映实际地物的灰度变化。对于 SAR 图像, 这个问题由于相干斑的存在而尤为严重。为了减弱噪声对边界特征提取的影响, 应该

使用平均灰度梯度。因为沿 i 方向的差分 $DI(i, j)$ 表示平行于 j 方向的灰度边界，而沿 j 方向的差分 $DJ(i, j)$ 表示平行于 i 方向的灰度边界，所以应该对 $DI(i, j)$ 沿 j 方向进行平均，而对 $DJ(i, j)$ 沿 i 方向进行平均。因此定义平均灰度梯度 $G_a(i, j)$ 为

$$G_a(i, j) = DJ_a(i, j)j + DI_a(i, j)i \quad (7)$$

式中

$$DI_a(i, j) = E\{DI(i, j') \mid |j' - j| \leq \delta\} \quad (8)$$

$$DJ_a(i, j) = E\{DJ(i', j) \mid |i' - i| \leq \delta\} \quad (9)$$

(8)、(9) 式中的 δ 是决定平均区域大小的参数。一种简单的取法是取 δ 为 1。 δ 越小，平均区域就越小。当 δ 为零时 $G_a(i, j)$ 就退化为常规的梯度 $G(i, j)$ 。所以 δ 不能太小，如果 δ 太小就不能有效地抑制噪声。但 δ 也不能太大，如果 δ 太大，在边界转弯之处就会把边界以外的像元的灰度也平均进来，而且运算量也会增大。因而 δ 必须取一个合适的折衷值。(8)、(9) 式中的取平均 $E\{\cdot\}$ 也可以有不同的取法。它可以是简单平均，也可以是加权平均。如果 $E\{\cdot\}$ 表示简单平均，则

$$DI_a(i, j) = \left[\sum_{j'=j-\delta}^{j+\delta} DI(i, j') \right] / (2\delta + 1) \quad (10)$$

$$DJ_a(i, j) = \left[\sum_{i'=i-\delta}^{i+\delta} DJ(i', j) \right] / (2\delta + 1) \quad (11)$$

在简单平均的情况下，远离 (i, j) 的像元灰度的变化占有较大的比重。考虑到边界有可能转弯，远离 (i, j) 的像元灰度的变化只应占有较小的比重，所以加权平均比较合适。如果 $E\{\cdot\}$ 表示加权平均，则

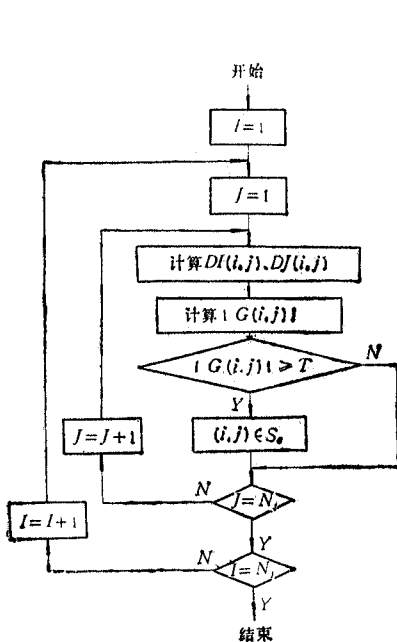


图 3 直接使用灰度梯度检测灰度边界的过程

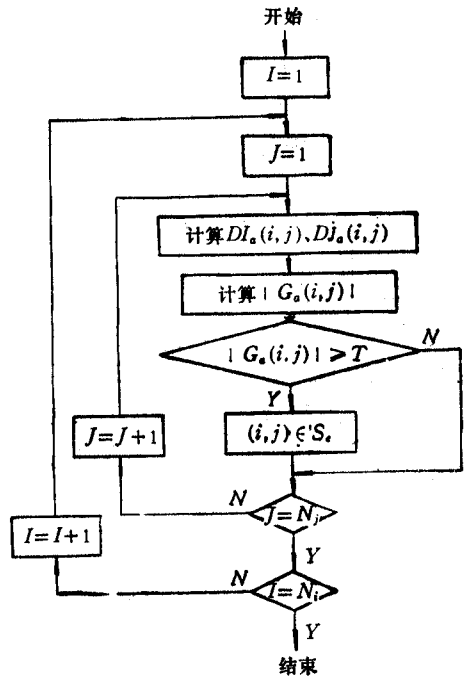


图 4 使用平均灰度梯度检测灰度边界的过程

$$DI_a(i, j) = \sum_{i'=-\delta}^{\delta} w_{i'} DI(i, j + i') \tag{12}$$

$$DJ_a(i, j) = \sum_{i'=-\delta}^{\delta} w_{i'} DJ(i + i', j) \tag{13}$$

(12)、(13)式中的加权系数 $\{w_i | |i| \leq \delta\}$ 满足如下方程:

$$\sum_{i=-\delta}^{\delta} w_i = 1 \tag{14}$$

$\{w_i\}$ 的一种简单取法是:

$$\delta = 1 \tag{15}$$

$$w_1 = w_{-1} = 1/4 \tag{16}$$

$$w_0 = 1/2 \tag{17}$$

使用平均灰度梯度检测灰度边界的过程如图 4 所示。

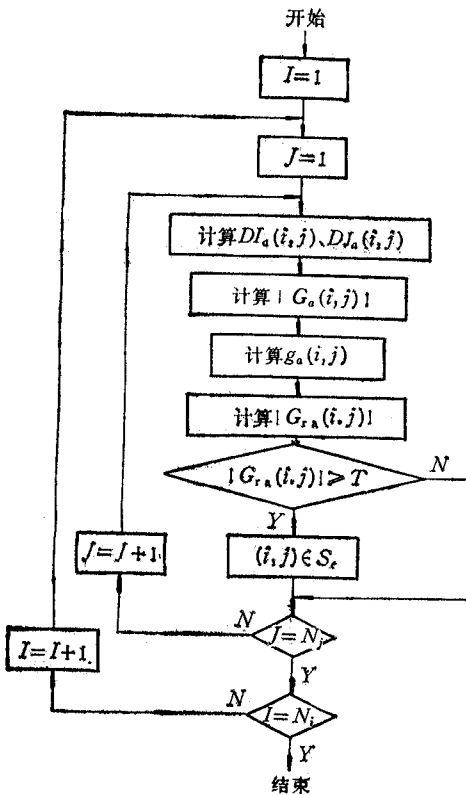


图 5 使用相对平均灰度梯度检测灰度边界的过程

均可。使用相对平均灰度梯度检测灰度边界的过程如图 5 所示。

3. 利用相对平均灰度梯度检测灰度边界

在 SAR 图像和许多其它图像中, 灰度较大的物体的边界处的灰度变化也大, 同时灰度较大的物体中噪声的能量也大。因而, 利用平均灰度梯度在同一门限下检测就会在灰度低的区域中产生严重的漏检, 而在灰度大的区域中产生严重的虚检。对于这类图像, 利用相对平均灰度梯度进行检测会有更好的效果。我们定义相对平均灰度梯度 $G_{r_a}(i, j)$ 为

$$G_{r_a}(i, j) = G_a(i, j) / g_a(i, j) \tag{18}$$

式中 $g_a(i, j)$ 为像元 (i, j) 的邻域中的平均灰度, 即

$$g_a(i, j) = E\{g(i', j') | |i' - i|, |j' - j| \leq \delta\} \tag{19}$$

(19)式中的 δ 一般与 (8)、(9)式中的 δ 取同一值。类似地, (19)式中的平均也可以是简单平均或加权平均。由于平均灰度不象平均灰度梯度那样对边界的转弯敏感, 取简单平均不会造成严重影响, 所以一般取简单平均即可。

三、检测与跟踪的结合

由于噪声的存在, 不论使用哪一种灰度梯度, 光靠检测都不能满意地提取灰度边界特

征。门限高了,漏检概率就大。门限低了,虚检概率就大。将边界检测和边界跟踪相结合是解决上述矛盾的一条途径。有了边界跟踪的辅助,在边界检测时就可以提高检测门限,使得虚检概率尽可能地小,而漏检概率可以大一点,让边界跟踪来弥补漏检造成的错误。比较简单的边界跟踪方法是在已经检测到的边界附近用一个较低的门限进行检测。它与第一步的检测结合构成了双门限检测跟踪方法。下面先简述双门限检测跟踪方法,然后提出效果更好的直接跟踪方法。

1. 双门限检测跟踪方法

由于边界是连续的,在已经检测到的边界附近,存在边界的可能性就比较大。因此在

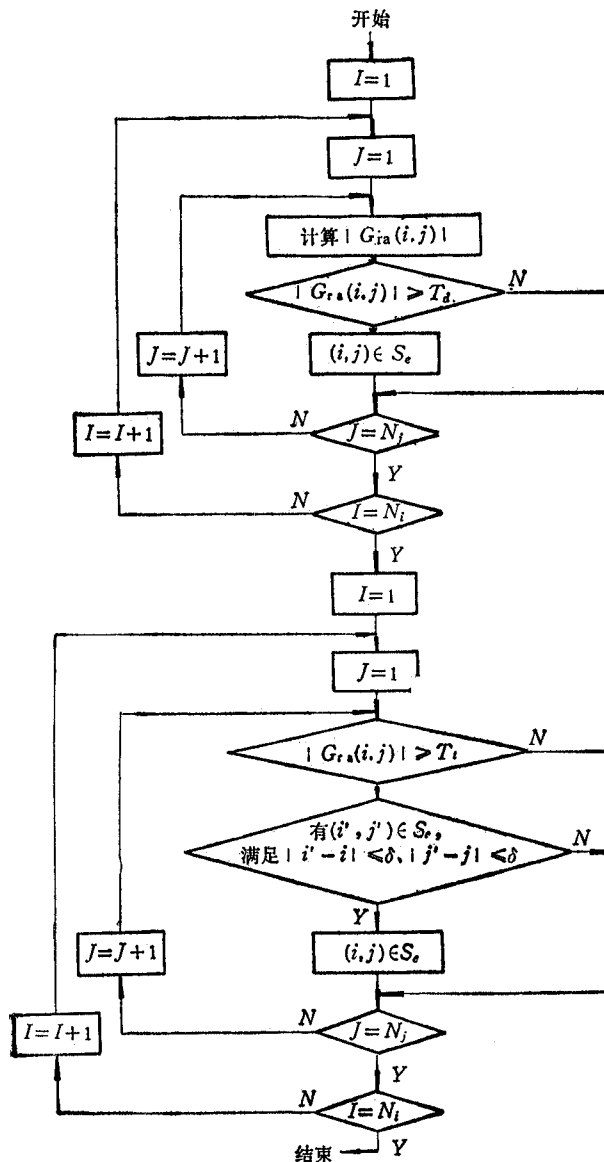


图6 简单的双门限检测跟踪提取灰度边界特征的过程

边界点的某一邻域中,可以将判决门限适当地降低。我们把这个降低了的门限称为跟踪门限,记为 T_t , 而把原来的门限称为检测门限,记为 T_d 。假定用于检测的观测量是相对平均灰度梯度 $G_{ra}(i, j)$ (使用其它观测量进行检测的情况也类似), 那么简单的双门限检测跟踪方法的数学表示如下:

$$(i, j) \in S_e, \text{ 当 } |G_{ra}(i, j)| \geq T_d \quad (20)$$

$(i, j) \in S_e, \text{ 当 } |G_{ra}(i, j)| \geq T_t \text{ 且存在 } (i', j') \in S_e \text{ 满足:}$

$$|i' - i| \leq \delta, |j' - j| \leq \delta \quad (21)$$

上述双门限检测跟踪提取灰度边界特征的过程如图 6 所示。

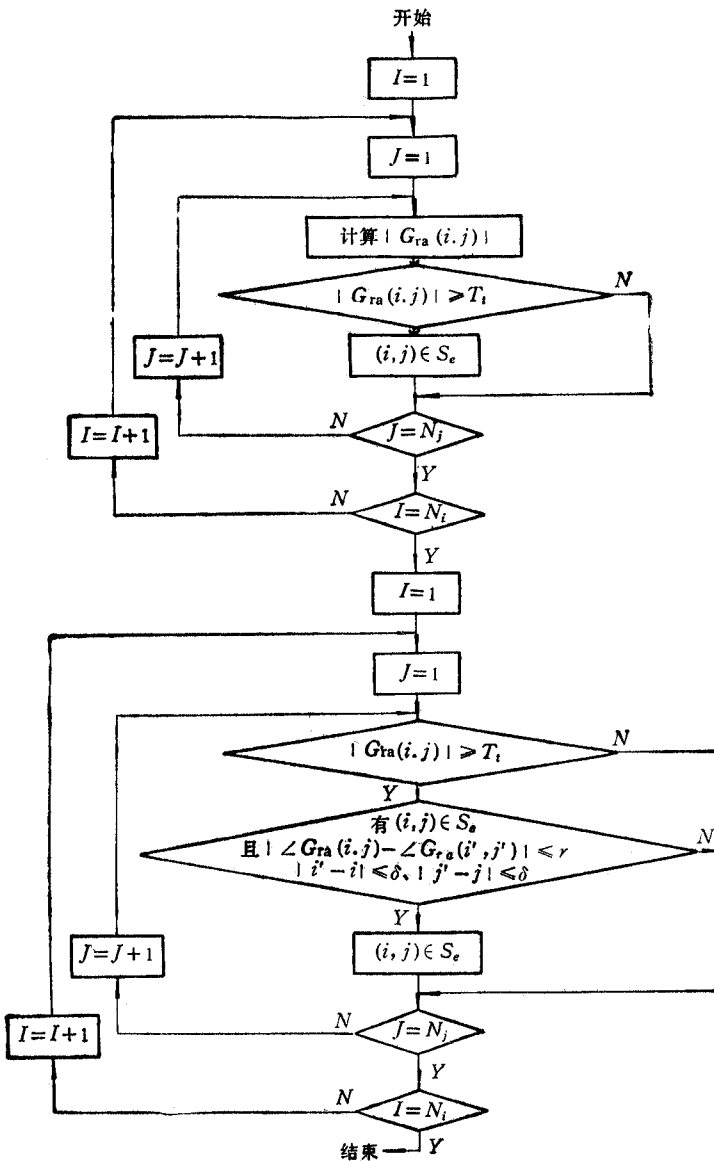


图 7 考虑方向性的双门限检测跟踪提取灰度边界特征的过程

表 1 方向编号

方向编号 k	单 位 向 量		k 方向 $G_{ra}(i, j)$ 的对应图象
	图 形	坐 标	
0	←	$-j$	■
1	↙	$(i-j)/\sqrt{2}$	▣
2	↓	i	□
3	↘	$(i+j)/\sqrt{2}$	▤
4	→	j	▥
5	↗	$(j-i)/\sqrt{2}$	▦
6	↑	$-i$	▧
7	↖	$(-i-j)/\sqrt{2}$	▨

由于边界具有走向,因此相邻两个边界点的灰度梯度的方向之间具有相关性,它们之间的夹角应该比较小。所以在(21)式中还应该加上一个限制,成为:

$(i, j) \in S_e$, 当 $|G_{ra}(i, j)| \geq T_r$ 且存在 $(i', j') \in S_e$ 满足:

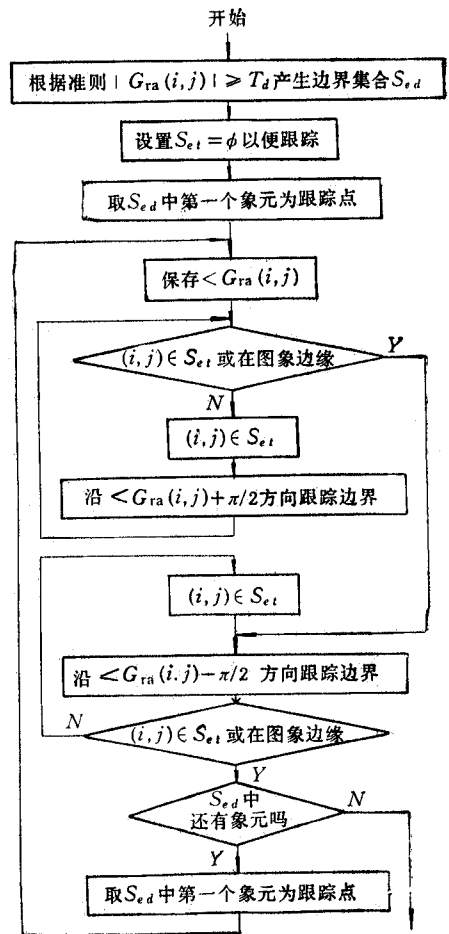
$$|i' - i| \leq \delta, |j' - j| \leq \delta \text{ 且}$$

$$|\angle G_{ra}(i', j') - \angle G_{ra}(i, j)| \leq \gamma \quad (22)$$

(22)式中 γ 的大小应该取决于边界方向变化的情况。 γ 越大,允许边界走向改变的角度越大,同时造成虚检的概率也越大。但 γ 太小的话,在边界走向改变的地方就会造成漏检。根据数字图像中 3×3 窗口中方向只有 8 种的特点,可以选取 γ 为 45° 。考虑了灰度梯度的方向性后,双门限检测跟踪提取灰度边界特征的过程如图 7 所示。

2. 直接跟踪边界方法

当我们用跟踪门限跟踪边界时,在噪声很强的地方仍然会检测不到实际存在的边界,从而停止跟踪,丢失边界。同时在噪声较弱但灰度逐渐变化的地方,检测到的边界会很粗,不利于确定边界的准确位置。这种情况在 SAR 的多级成像中会造成困难。考虑到边界不仅是连续的,而且应该是闭合的(除非延伸到了图像之外),所以对任一边界点,除非它处于图像的边缘,那么它必有两个邻点也是边界点。假定边界不在该处发生转弯,那么这两个邻点应该分别位于与该点的灰度梯度方向垂直的两个方向上。考虑到边界有可能转弯,两个相邻的边界点的方向与该点的灰度梯度的方向之间的夹角应该可以



结束

图 8 直接跟踪边界以提取边界特征的过程

在以 90° 为中心的一定范围内取值。所以相邻的边界点应是夹角取值在这一范围内的灰度梯度模最大的邻点。这个角度一般可取 45° ，即 3×3 窗口中 8 个方向中两个相邻方向之间的夹角。为了方便起见，我们将这 8 个方向按表 1 编号。

假定用于检测的观测量是相对平均灰度梯度 $G_{ra}(i, j)$ ，对于一个已经检测到的边界点 (i, j) 如果

$$-\pi/8 < (\angle G_{ra}(i, j) + \pi/2 - k\pi/4) \leq \pi/8 \quad (23)$$

则 $G_{ra}(i, j)$ 的方向编号为 k ，即

$$k = \text{INT}[(\angle G_{ra}(i, j) + \pi/2 + \pi/8)/(\pi/4)] \quad (24)$$

此处 $\text{INT}[x]$ 表示小于或等于 x 的最大整数。两个相邻的边界点应该位于与方向 k 垂直的两个方向上，即 $\angle G_{ra}(i, j) + \pi/2$ 和 $\angle G_{ra}(i, j) - \pi/2$ ，或方向 $k + 2 \pmod{8}$ 和方向 $k - 2 \pmod{8}$ 。实际上，由于边界可能转弯，两个相邻的边界点可能在不恰好垂直于方向 k 而垂直于方向 $k + 1$ 或方向 $k - 1$ 的方向上。因此，对每一个相邻的边界点有三个候选点。我们可以判定 $G_{ra}(i, j)$ 模最大的候选点为相邻的边界点。对所有的 $G_{ra}(i, j)$ 方向，相邻边界点的三个候选点坐标在表 2 中列出。

表 2 相邻边界点的三个候选点坐标

方向编号 k	三个候选点的坐标	
	第一跟踪方向	第二跟踪方向
0	$(i+1, j+1), (i+1, j), (i+1, j-1)$	$(i-1, j-1), (i-1, j), (i-1, j+1)$
1	$(i, j+1), (i+1, j+1), (i+1, j)$	$(i, j-1), (i-1, j-1), (i-1, j)$
2	$(i-1, j+1), (i, j+1), (i+1, j+1)$	$(i+1, j-1), (i, j-1), (i-1, j-1)$
3	$(i-1, j), (i-1, j+1), (i, j+1)$	$(i+1, j), (i+1, j-1), (i, j-1)$
4	$(i-1, j-1), (i-1, j), (i-1, j+1)$	$(i+1, j+1), (i+1, j), (i+1, j-1)$
5	$(i, j-1), (i-1, j-1), (i-1, j)$	$(i, j+1), (i+1, j+1), (i+1, j)$
6	$(i+1, j-1), (i, j-1), (i-1, j-1)$	$(i-1, j+1), (i, j+1), (i+1, j+1)$
7	$(i+1, j), (i+1, j-1), (i, j-1)$	$(i-1, j), (i-1, j+1), (i, j+1)$

在表 2 中，对方向 k 的 $G_{ra}(i, j)$ ，第二跟踪方向的候选点与方向 $k + 4 \pmod{8}$ 的第一跟踪方向的候选点完全一样。这是合理的，因为相应的 $G_{ra}(i, j)$ 在相反的方向上，而相应的边界延伸方式是相同的。这使编程变得容易。直接跟踪边界以提取边界特征的过程如图 8 所示。

实验结果证明，直接跟踪边界的方法比双门限检测跟踪边界的方法效果更好。

四、实验结果

图 9 给出了检测与直接跟踪结合提取边界特征方法的实验结果，下半部分是原始图像，上半部分是将原始图像中边界点置为最大灰度以后的结果。从中我们可以看到提取出来的边界与原始图像吻合得很好。

图 10 给出了各种灰度边界特征提取方法的实验结果比较。其中 (E) 是一幅 SAR 图像；(B)、(F)、(H)、(D) 分别是直接使用灰度梯度、使用平均灰度梯度、使用相对平

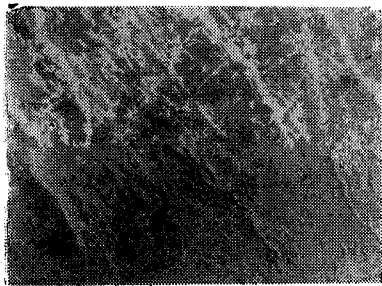


图 9 检测与直接跟踪结合提取边界特征方法的实验结果

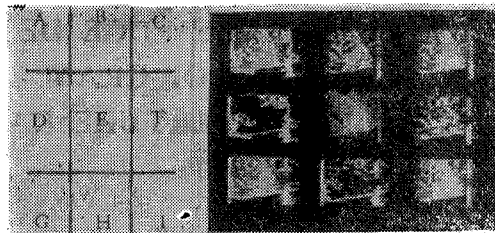


图 10 各种灰度边界特征提取方法的实验结果比较

均灰度梯度、直接跟踪与检测结合并使用相对平均灰度梯度四种灰度边界特征提取方法的结果。这四幅边界图中边界点的数目都是相同的,这保证了比较的合理性。图中(C)、(I)、(G)、(A)分别是按(B)、(F)、(H)、(D)的边界图将(E)中的边界点置为最大灰度后的结果。这四幅图像示出了提取出来的边界在原始图像中的位置。从图10中可以看出:使用平均灰度梯度检测边界比直接使用灰度梯度检测边界效果更好;使用相对平均灰度梯度检测边界又比使用平均灰度梯度检测边界效果更好;而直接跟踪与检测结合并使用相对平均灰度梯度提取边界比简单地使用相对平均灰度梯度检测边界效果更好。

五、结 论

直接跟踪与检测结合并使用相对平均灰度梯度提取 SAR 图像灰度边界特征得到了满意的结果。这对 SAR 的多级成像和 SAR 图像的分析与应用具有很大的意义。

参 考 文 献

- [1] W Xu, Z. Chen. IEE Proceedings. Part F, 136(1989) 1, 29-34.
- [2] W. K. Pratt. Digital Image Processing, John Wiley & Sons, USA, 1978.
- [3] S. C. Giess. Edge Detection In SAR Imagery Using Gradient Operators, RSRE Memo 3743, RSRE Malver, England, 1984.

A LUMINANCE EDGE DETECTION METHOD USING GRADIENT OF GRAY LEVEL FOR SYNTHETIC APERTURE RADAR IMAGERY

Xu Wei Chen Zongzhi

(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing)

Abstract In the multistage imaging processing for SAR digital imaging and the applications of SAR image, it is often required to extract the luminance edge features of the SAR imagery. It has been studied to extract the luminance edge features for the ordinary imagery produced by visible or infrared imaging system. The methods using gradient are effective for the extraction of the luminance edge features of the ordinary imagery and commonly used. Because the serious noise of coherent speckle exists in the SAR imagery, some people believe that edge extraction using gradient for SAR imagery gives poor results. However in this paper, a rather ideal method is derived for the extraction of luminance edge features for SAR imagery with the consideration of the characteristics of SAR imagery. This method uses the relative average gradient and combines detection with tracking.

Key words Synthetic aperture radar; Image processing; Feature extraction; Luminance edge; Gradient of gray level; Multistage imaging