

文章编号:1001-2486(2001)01-0059-07

SAR 图像中道路的检测*

郦苏丹,王正志,张翠

(国防科技大学机电工程与自动化学院,湖南长沙 410073)

摘要 提出一种两步算法用于从合成孔径雷达(SAR)图像中无监督地提取线性特征,特别是提取公路网。第一步利用局部线特征检测算子提取线基元,为此提出一种改进的均值比率(RoA)算子,应用SAR图像的内在统计特性,保证较高的准确率;第二步引入公路结构特征的先验信息,对提取的线基元进行组织,获得比较宏观的线性结构。文中的方法通过ERS-1图像加以验证。

关键词 SAR 线特征检测 线特征组织

中图分类号:TP722.6 文献标识码:A

Road Network Detection in SAR Images

LI Su-dan, WANG Zheng-zhi, ZHANG Cui

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Two-step algorithm is proposed for unsupervised detection of linear structure from SAR image, in particular, the road network detection. The first step is to detect line element with local detector, in this paper an improved ratio of average (RoA) detector which takes into account the inner statistic property of SAR image is proposed. It can guarantee the detection accuracy. In the second step, we introduce the prior knowledge about the road structure to group the line element into macroscopical structure. The method proposed is identified in ERS-1 image.

Key words SAR line detect line organization

在合成孔径雷达(SAR)图像分析中,线特征具有非常重要的意义,因为图像中某些对象本身具有线性结构,如道路、河流等。线特征检测可用于多传感器图像配准、绘图学应用等方面。对于有一定宽度范围的对象,精确的轮廓线有助于不同对象的分割与目标的识别。本文感兴趣的是卫星雷达图像中公路网的提取。到目前为止,人们为了提取图像的边界发展了许多算法,它们基本上分为两类:一是通过计算目标像素点周围一个小邻域内的强度值来从背景中区分直线上点的局部方法,如差分算子、Canny算子、零交叉算子等。它们在光学图像的处理中获得了满意的效果,但在雷达图像的处理中效果不佳,因为SAR成像时所固有的斑点(Speckle)噪声,对图像的质量影响很大。这些算法通常依赖这样一个假设:图像受加性白Gauss噪声污染。而这一点在雷达图像中是不合适的,因为其噪声是乘法的。二是引入某种关于被检测结构的大范围先验知识的全局方法,它能使第一类算法获得的线特征片段组成具有较大空间跨度的线性结构。本文首先提出一种基于图像统计信息的线特征局部检测方法,然后通过引入先验知识将局部线特征组织成较大线性结构,并将其应用于公路网的提取。

1 SAR 图像的统计特性

在斑点噪声为充分发展(fully developed)的假设下,关于均匀区域的单视雷达图像强度概率密度函数(pdf)为:

$$f(I) = \frac{1}{\mu} \cdot e^{-\frac{I}{\mu}} \quad (1)$$

其中 I 代表强度, μ 代表区域的强度均值。 N -视雷达强度图由一个视景的 N 个不相关的单视强度

* 收稿日期 2000-10-09
作者简介 郦苏丹(1973-)男,博士生。

图平均而成 其 pdf 为 N 个单视 pdf 的卷积^[1] 得

$$f_N(I) = \frac{I^{N-1} N^N e^{-\frac{NI}{\mu}}}{\mu^N \Gamma(N)} \tag{2}$$

其中 $\Gamma(N) = (N - 1)!$

由上述的 pdf 可推得强度图像的乘法模型 :

$$I = \mu \frac{z}{2N} \tag{3}$$

其中 z 是 $2N$ 个变量的标准 χ^2 分布 ,

$$f(z) = \frac{z^{N-1} e^{-\frac{z}{2}}}{2^N \Gamma(N)} \tag{4}$$

由于自然场景并非均匀的 ,而具有内在的空间变化 ,我们称之为纹理 ,在这种情况下 ,强度图像模型表示为 :

$$I_i(j) = \mu_i T_i(j) F_N(j) \tag{5}$$

其中 μ_i 为区域 i 的平均强度 ; $I_i(j) = I_{ij}$ 为区域 i 中第 j 个像素的强度 ; $T_i(j)$ 是纹理随机变量 ,且对于所有的 i , $\mu_{T_i} = 1$; $F_N(j) = \frac{z}{2N}$ 代表衰减随机变量 ,是 $2N$ 个变量的归一化 χ^2 分布 , $\mu_{F_N} = 1$.

在 SAR 图像处理中有时使用幅度图 ,每一点的幅度为

$$A_i(j) = \sqrt{I_{ij}} = \left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_{ijk} \right]^{1/2} = \mu^{1/2} t_i(j) f_N(j) \tag{6}$$

其中 $t_i(j) = T_i^{1/2}(j)$ 是 $A_i(j)$ 的纹理随机变量 ; $f_N(j) = F_N^{1/2}(j)$ 是 $A_i(j)$ 的衰减随机变量 .

雷达回波主要受地表面的介质特性及粗糙程度影响 .在不考虑纹理的情况下 ,可得幅度的 pdf 为

$$f_N(A) = \frac{2A^{2N-1} N^N e^{-NA^2/\mu}}{\mu^N \Gamma(N)} \tag{7}$$

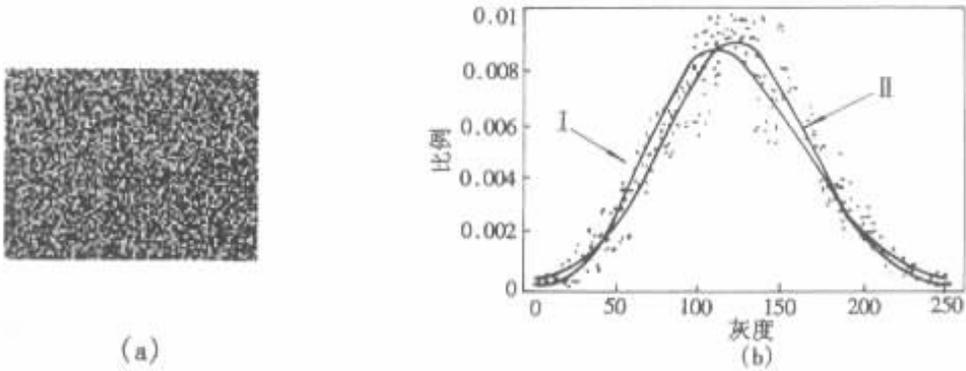


图1 SAR 图像的灰度分布

I - $N = 3$ 时 ,方程 7 的分布曲线 ,II - 根据图像的均值、方差所得的高斯分布曲线

Fig.1 Gray level distribution of SAR image

I - Distribution of equation 7 when $N = 3$; II - Gauss distribution with mean and variance of image

图 1(a) 是从 ERS - 1 (欧洲遥感卫星) 图像中选取的一块均匀区域 ,从图 1(b) 可以看出 ,实际灰度分布与理论分布曲线是比较接近的 .

由于 SAR 成像时通过多视处理 ,即 $I = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_k$ 根据中心极限定理 ,当 N 较大时 , I 应服从高斯分布 .对于 N 较小时 ,为了检验这一结论与实际结果的一致性 ,选取图 1(a) 做测试 ,它的灰度直方图如图 1(b) 中的离散点 .我们利用均匀区域图像灰度均值 μ 和方差 σ 建立一个高斯分布函数 :

$$g(A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(A-\mu)^2}{\sigma^2}\right)$$

建立假设 H_0 : 样本服从高斯分布; H_1 : 假设 H_0 不成立。 α 为当 H_0 为真而选择 H_1 的概率(第一类风险)。 利用 Kolmogorov-Smirnov 检验, 发现在显著水平 $\alpha = 0.01$ 时检验样本符合高斯分布。

2 SAR 图像的线特征检测

由于 SAR 图像受斑点噪声的影响, 使得传统的线特征检测算子无法满足要求, 为此人们发展了一些针对 SAR 图像进行线特征或边界检测的算法, 文献 [2, 3] 提出基于统计的边界检测方法, 文献 [4, 5] 提出最优边界检测方法, 文献 [6, 7] 提出基于 Markov 随机场的边界检测算法等。 其中基于统计的边界检测方法应用价值较大, 因为它考虑到 SAR 图像自身统计特性。 本文的方法是基于 SAR 图像统计特性的, 是对文献 [2, 3] 方法的改进。

文献 [2, 3] 提出的边界检测算法是基于理论模型 (2) 或 (7) 建立的检测算子, 分析较为复杂, 且依赖于成像参数如视数等。 文献 [4, 5] 提出最优边界检测方法需要对一些图像参数如阶次参数进行估计, 需要利用 Digamma 函数。 根据 SAR 图像统计特性中的分析, 可知均匀区域 SAR 图像近似为高斯分布, 在此基础上, 通过均值比率 (ratio-of-averages) RoA 算法可以提取基本边界元。 由于高斯函数具有较好的积分性质, 大大简化了问题的分析, 而且按比例缩小原图以减少计算量时, 不会对检测产生影响, 因为均匀区域的统计特性不变。

RoA 算法是一种计算相邻两区域的均值比来确定目标像素是否为边界点的算法。 设 $R(x, y)$ 和 $L(x, y)$ 分别为图像 (x, y) 点沿某一方向的左、右相邻区域的平均灰度值, 均值比率的估计为

$$\text{RoA}(x, y) = \max\{R(x, y)/L(x, y), L(x, y)/R(x, y)\} \tag{8}$$

最后将 $\text{RoA}(x, y)$ 与预先确定的阈值 T 进行比较, 如满足

$$\text{RoA}(x, y) > T$$

则认为 (x, y) 点为边界点。 但是这里存在一个问题, 即如何选取合适的阈值 T 以适应不同的场景。

由于公路为具有一定宽度和任意方向的线性结构, 我们以垂直方向的公路为例来说明检测算子的结构, 如图 2 所示。 这种算法是对目标像素点 x_0 沿方向 d 取左、中、右三个相邻区域, 其均值分别为 μ_l, μ_m, μ_r 。 对于区域 $i (i \in \{l, m, r\})$, 其经验均值 $(1/n_i) \sum_{S \in i} A_S$ 可以做为 μ_i 的无偏估计。 在检测区域为均匀性的假设下, A_S 服从 (7) 式的分布。 则 μ_i 的分布函数为

$$f_{\mu_i}(x) = \frac{\sqrt{n_i} e^{-n_i(x-\mu_i)^2/2\sigma^2}}{\sqrt{2\pi}\sigma} \tag{9}$$

其中 μ, σ 分别为图像区域的经验均值和标准偏差。 以区域 m 和区域 l 为例, 令 $R = \mu_m/\mu_l$, 在实际情况下, 可以忽略左半边的积分, 可得 R 的概率分布函数为:

$$f_R(y) = \int_0^\infty f_{\mu_l}(x) f_{\mu_m}(yx) x dx \tag{10}$$

将式 (9) 代入可得

$$f_R(y) = \frac{\sqrt{n_m n_l} \mu_l (n_m + n_l y)}{\sqrt{2\pi} \sigma (n_m + n_l y^2)^{3/2}} e^{-\frac{n_m n_l \mu_l^2 (y-1)^2}{\sigma^2 (n_m + n_l y^2)}} \tag{11}$$

不同条件下 $f_R(y)$ 的形式如图 3 所示。 我们通过虚警率和检测概率来研究此算子的行为。

在显著水平 α 下, 检验假设 H_0 : 区域 m 和区域 l 属于同一均匀区域; H_1 : m, l 不属于同一均匀区域, 即 $P\{\text{拒绝 } H_0 | H_0 \text{ 为真}\} < \alpha$ 。 选择 $\alpha = 0.01$, 对应于图 3(a) 的情况为 $P\{R > 1.28\} = 0.01$, 因此选择 $\tau = 1.28$ 为阈值, 如果 $R > \tau$, 则认为 m, l 属于不同区域, 否则 m, l 属于相同区域, 拒真的概率为

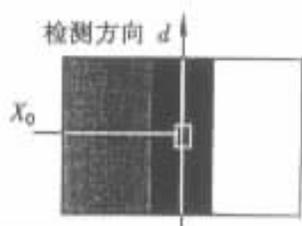


图 2 垂直方向路检测算子
Fig.2 Road detector in perpendicular direction

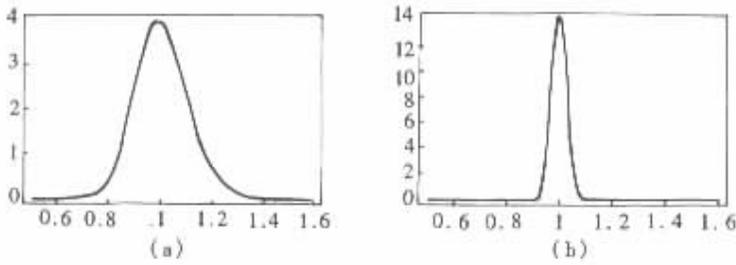


图 3 概率密度函数 $f_R(y)$

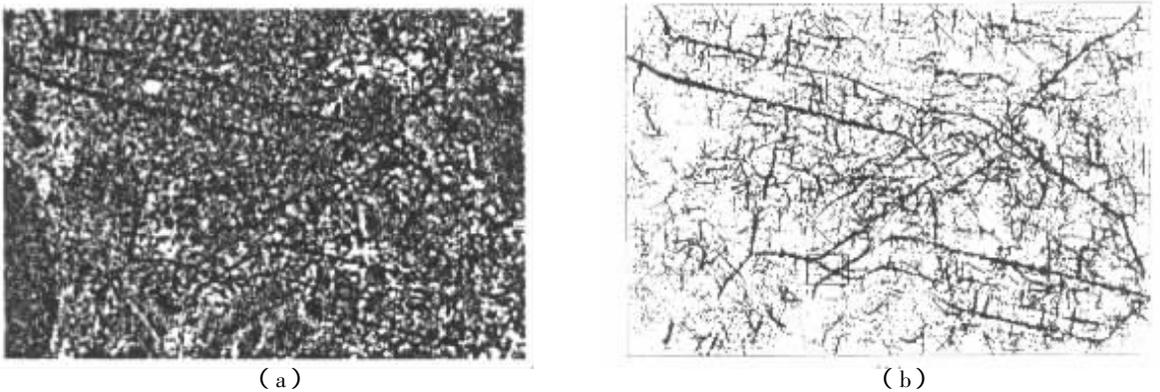
(a) $n_m = 2, n_l = 3, l = 11, \mu = 123, \sigma = 45$; (b) $n_m = 2, n_l = 3, l = 11, \mu = 98, \sigma = 10$

Fig.3 Probability density function $f_R(y)$

(a) $n_m = 2, n_l = 3, l = 11, \mu = 123, \sigma = 45$; (b) $n_m = 2, n_l = 3, l = 11, \mu = 98, \sigma = 10$

1%。同样,如果 m, l 属于相同区域而使得 $R > \tau$ 的概率为 0.01,即虚警率为 0.01。同样可以计算 μ_m / μ_l 。

由于文中要检测的是公路,路在 SAR 图像中呈较暗的线特征,在图 2 中 m 区域对应于路,它的灰度应该比 l, r 区域暗。如果 $\mu_m / \mu_l \geq \tau$ 且 $\mu_m / \mu_r \geq \tau$, 就认为目标点在脊型边界上,即目标点有公路经过。而对于 $\mu_m / \mu_l \geq \tau$ 或 $\mu_m / \mu_r \geq \tau$ 的目标点,认为其为阶型边界上的点。在实际情况下,不同图像区域的灰度分布特性不同,如果要保证同样的虚警率,则要根据图像的均值、方差以及检测模板的长度和宽度来调整阈值,给检测带来困难,一般情况下仍可选用固定阈值。检测模板应该包含较多的像素,以减小随机影响,并且要考虑公路的形状,对于 ERS-1 标准分辨率图像,公路的宽度应该在 1~3 个像素之间,相应的地面宽度为 12.5~40 米。左右邻域的宽度为 3 个像素,在处理过程中这些值保持不变。由于公路存在任意走向,因此应该有检测各个方向公路的模板,考虑到模板的长度,以 15° 间隔构造不同方向的检测模板,具有较高的角分辨率。对于某一目标像素点,应用各个检测模板,响应最大的方向最有可能有公路通过,如果此方向模板满足 $\mu_m / \mu_l \geq \tau$ 且 $\mu_m / \mu_r \geq \tau$, 则认为该方向有公路通过,检测点为公路上点,标记该点并记录该点公路方向;否则检测点不是公路上点。经过这一步检测获得的线段是公路基元,因为在大多数情况下这些线段是破碎不连续的,不是实际的公路,如何从这些公路基元中构建公路是下一节的工作。



(a)

(b)

图 4 (a) ERS-1 SAR 图像 (b) 通过模板检测获得的线基元

Fig.4 (a) ERS-1 SAR image (b) line elements detected by models

3 线特征的组织

通过实验可以发现,局部方法检测到的线基元并不都是真正的公路,其中存在大量虚假检测,而且线是破碎的。如何从线片段获得有意义的线特征,人们已经做了很多研究,如启发式连接、Hough 变换、相位编组法、层次计号编组、基于 Markov 随机场的线组织等。其中 Hough 变换对间断点和噪声干扰不敏感,实际中使用较多,但无法获得线段的起点和终点,且对非参数形式的或未知形式的曲线特征处理比较困难,因此无法精确地定位公路。利用 Markov 随机场进行线段组织实际上是从检测出的线基元中获得最可能的公路段的估计。因为每一个线段片都有两种可能状态:是公路和不是公路,对候选线段建立邻域结构,然后根据先验知识在邻域结构上建立能量函数,通过 ICM 算法或模拟退火算法获得公路段的最大后验概率(MAP)估计,然后再对估计出的公路段连接,这种方法的计算量很大。本文在线检测的基础上,结合启发式连接、相位编组法^[8],并引入关于公路的先验信息,提出一种适合于公路基元组织的方法,实验结果说明本文的方法可以产生较好的效果。

3.1 由公路基元获得公路段

通过预检测获得的公路基元有些是孤立的,有些是相邻的(八连通),由于在线特征检测中获得的基元都具有方向性,如图 5 所示,如果相邻的两基元的方向相近,则认为这两个基元在同一条路上。因此可以通过相位编组法^[8],将方向相近的邻接基元组成公路的支持区。算法如图 6 所示。

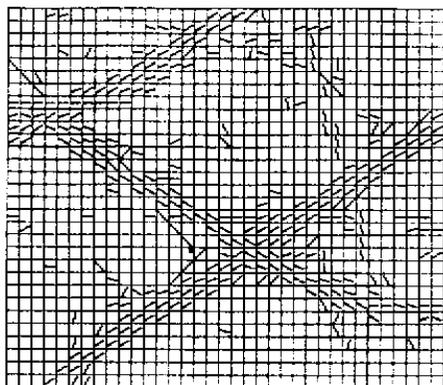


图 5 线基元的方向图,对应于图 4(b)中小方框区域,其中每个方格表示一个像素点,有短线的方格表示该像素点为公路基元,短线的方向为该基元的走向

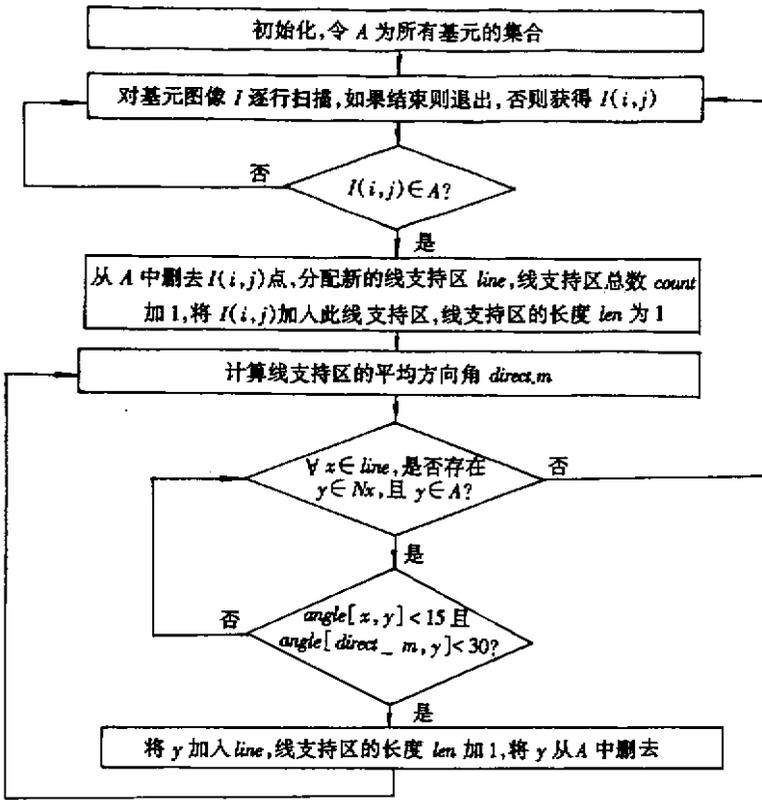
Fig.5 Direction map of line element which is correspond to the frame in Fig.4(b) in this Fig one clique means onePixel, the clique with short line in it means this clique is a road element, the direction of the short line is the direction of the road element

对所有基元完成组织后,每个支持区上的点方向相近,可以通过线性拟合加以细化,获得抽象的公路段。这些公路段表现为直线段,可以获得线段图,每个线段都有起点和终点,规定起点是线段最左下或最左上的点,终点是线段最右上或最右下的点,如果线段为垂直方向,则起点在下,终点在上。通过先验知识删去线段图中多余的线段。由于公路具有连续性,因此如果线段的长度小于三个像素且该线段一定邻域范围内无其它线段,则认为此线段不是公路段,经过这步处理后得到的线段图如图 7(a)所示。线段图是有序的,即对于线段 l_i, l_j ,如果 $i < j$,则 l_i 的起点在 l_j 的起点左边或下边,这可以减少线段连接的计算量。

3.2 公路段连接以获得有意义的路

公路在空间结构上有如下特征:

- 1) 路比较长;
- 2) 路的曲率比较小;
- 3) 交叉比较少(即一个线段最有可能同另外一个线段相连,而不是同另外多个线段相连)。



$I(i, j)$ 表示扫描位置 (i, j) 处的线基元。
 $angle[x, y]$ 表示线基元 x, y 的夹角。
 N_x 表示 x 的 8 邻域。

图 6 算法

Fig.6 Algorithm

根据这些特征, 可以设计相应的连接算法。

设 a_i, b_i 分别为线段 l_i 的起点和终点, 所有线段的集合为 L , 线段 l_i, l_j 的夹角为 θ_{ij} , 线段 l_i 的后邻域 N_i 为:

$$N_i = \{j > i, l_j \in L, dist(b_i, a_j) < limit\}$$

在 N_i 中寻找与 l_i 可能处于同一线段的单元 $aline_i$,

$$aline_i = \{l_j \in N_i, \theta_{ij} < 20\}$$

如果 $aline_i$ 中的成员数多于 1, 则保留和 l_i 方向最接近的一个为最佳后继。设以 l_i 为初始线段, l_j 为它的最佳后继, 然后以 l_j 为初始线段再寻找它的后继, 如此反复下去, 直到找不到满足条件的后继线段为止。我们把这些具有连接关系的短线段标记为“已连接”, 以便在其他线段的连接中不被第二次选中。然后再从集合 L 中取出一个没有被连接的短线段, 开始对它进行延伸。当 L 中的所有线段都被标记为“已连接”, 则线段的第一次连接结束, 获得新的较长的线段集。通过这种算法, 我们就将较短的线段连接成较长的线段, 并且每个短线段只被选中一次, 连接成的长线段仍然有较好的方向一致性。可以将连接后仍然小于一定阈值的短线段删去, 然后增大线段间隔上限 $limit$, 通过上述方法对线段进行多层组织, 形成有意义的路, 如图 7(b) 所示。

通过线组织, 原来破碎不连续的线段连成具有较大空间跨度的线性结构, 其中几条主要公路已经准确地提取出来, 为了保持细节, 一些短的线段也保留下来。这些跨度较大的线结构可以用于多传感器图像的配准, 如光学图像与雷达图像、不同 SAR 传感器图像之间的配准, 由于每条线结构都具有几何方程, 因此可以进行旋转、放缩变换, 通过线结构进行匹配可以大大减轻计算量。此外, 对于公路等特征的准确定位在军事上也具有重要作用。

4 结论

本文提出了一种从 SAR 图像中提取线性特征,尤其是公路网的方法,这种方法包扩底层和高层两个步骤。在线特征预检测中,我们提出一种改进的均值比率算子,在保证检测概率的情况下比较准确地提取出基本线元。然后通过引入公路的结构先验知识,利用提取的线基元本身具有的良好方向性,通过相位编组法对基本线元进行组织,获得宏观的线性结构。通过对 ERS-1 例图的应用,看出本文的方法在实验中取得了较好的效果。

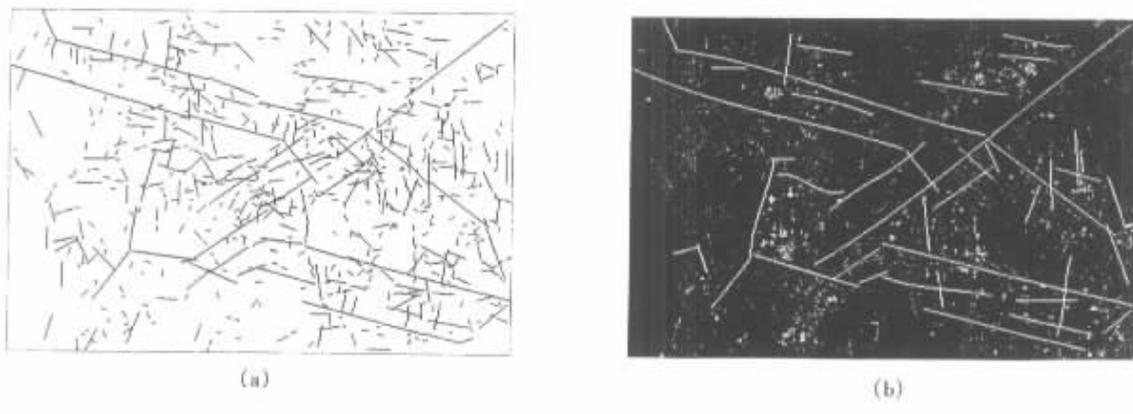


图7 ERS-1 图像公路检测结果

(a)检测出的公路段 (b)经组织线特征在原图中的显示

Fig.7 Road detection result in ERS-1 image

(a)Road fragment detected (b)Road after organization

参考文献：

- [1] Ulaby F T , Kouyate F. Texture information in SAR images[J]. IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing , 1986 ,24(2).
- [2] Touzi R , Lopes A. A Statistical and Geometrical Edge Detector for SAR Images[J]. IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing , 1988 ,26(6).
- [3] Bovik A C. On detecting edges in speckle imagery[J]. IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Processing , 1988 ,36.
- [4] Oliver C J. Simultaneous Mean and Texture Edge Detection in SAR Clutte[J]. IEE. Proc. Radar. Sonar. Navig , 1996 ,143(6).
- [5] Oliver C J. Optimum Edge Detection in SAR[J]. IEE. Proc. Radar. Sonar. Navig , 1996 ,143(1).
- [6] Florence Tupin , Henri Maitre. Detection of linear feature in SAR Images : Application to road network extractior[J]. IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing , 1998 ,36(2).
- [7] Hellwich O , Meyer H. Extrating line feature from synthetic aperture radar using a Markov random field mod[C]. in proc .3rd IEEE .Int. Conf. Image processing ,1996 ,3.
- [8] 王润生. 图像理解[M]. 长沙 :国防科技大学出版社 ,1995.

