

# 基于 Hough 变换的高分辨 SAR 图像道路目标检测\*

贾承丽,匡纲要,粟毅

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

**摘要** 给出了一种检测高分辨率 SAR 图像道路目标的方法。该方法首先对原始图像进行一系列的预处理,然后利用 Hough 变换识别道路。在提取感兴趣区域时,该算法采用了高斯概率迭代方法代替了一般的 CFAR 检测或阈值分割,在进行 Hough 变换时,该算法用平均 Hough 变换代替一般的 Hough 变换,在检测变换域峰值点时,采用了结合全局 CFAR 检测的最大值点搜索的方法,最后对检测出来的准道路,该算法根据道路的独特性质进行鉴别,以确定其是否确实为道路。使用 MSTAR Redstone 实测杂波图进行实验,取得了满意的效果。

**关键词** 道路目标检测;合成孔径雷达;Hough 变换;CFAR 检测

中图分类号:TP751 文献标识码:A

## Road Extraction from the High-resolution SAR Imagery Using Hough Transform

JIA Cheng-li, KUANG Gang-yao, SU Yi

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** Extraction of roads from the high-resolution SAR imagery is described. The method employs Hough Transform to identify roads, followed by a series of pre-processes. Gaussian probability iteration method instead of usually used CFAR detector or threshold segmentation is employed to identify the regions of interest. The generally used Hough Transform is replaced by the average Hough Transform. The peak values in the transform area are detected by a maximum search integrating global CFAR detector. Finally, a unique geometric constraint is used to discriminate the potential roads. High-resolution SAR images of MSTAR Redstone are used to illustrate our method, and the performance is satisfactory.

**Key words** automatic target detection; road detection; hough transform; synthetic aperture radar

SAR 是一种主动式遥感系统,其图像内容表现为被测地域对电磁波的散射特性。一般的道路,例如土路、碎石路、混凝土路和沥青路对  $K_a$  波段和 X 波段电波而言都可看作光滑路面,其雷达回波较弱,因此,一般雷达图像上道路呈线状暗区。道路的识别能力和道路平滑程度、路面宽度对图像的分辨率的比值有关。如果路面宽度小于图像分辨单元,则邻近地域的回波将侵入道路所在的无回波区,这时,可以借助路边地域回波形成的线形标记识别道路;如果路面宽度大于图像分辨单元,则道路在图像上表现为具有一定宽度的黑色直线。识别道路的困难主要来自于路边树木、建筑物的阴影以及停放的车辆。

Hough<sup>[2]</sup> 变换的突出特点是抗干扰性强,对被检测图像的噪声不敏感,即使待检测线条有断裂、虚线以及被树木和车辆遮挡,进行 Hough 变换后,在参数空间仍能得到明显的峰值点。

### 1 斑点噪声抑制

相干斑的存在使得图像的分辨率较差,有必要对图像进行保持原有线性特征条件下的去噪声处理。因此,首先采用 Frost 算法<sup>[2]</sup>进行滤波处理。Frost 滤波器用一双边指数函数近似为低通滤波器,其滤波器参数由图像归一化局域方差系数  $C_1$  决定。

\* 收稿日期:2003-09-04  
基金项目:国家部委资助项目(41322020401)  
作者简介:贾承丽(1980-),女,博士生。

$$m(t) = \exp[-KC^2(t_0)|t|] \quad (1)$$

其中,  $K$  是常数,  $t_0$  为被处理的像素点,  $C_f(t_0)$  为标准方差。可以看出, 当  $C_f(t_0)$  很小时,  $m(t)$  相当于一个低通滤波器, 从而很好地平滑掉均匀场景的噪声; 当  $C_f(t_0)$  很大时,  $m(t)$  趋向于保持原来观察的像素值。

## 2 提取感兴趣区域

正如前面所说, 道路通常为弱反射, 故其在高分辨率图像上表现为暗区。根据图像的幅度值, 可将弱反射区域分割出来, 进一步缩小检测道路的范围。对所提取的区域, 称之为感兴趣区域。

根据图像幅度, 可将图像像素点分为三类: 强反射点、较强反射点(介于强、弱反射点之间)、弱反射点。我们采用高斯概率迭代法进行分割。一般说来, 高分辨率 SAR 图像通常不再服从高斯分布, 而服从更复杂的分布, 如  $K$  分布等。但这里采用的是迭代的方法, 因此使用高斯分布函数对分割的结果几乎没有影响, 同时却避免了繁琐的求  $K$  分布参数的过程。

高斯概率迭代分割算法思路为:

(1) 设原始图像经过噪声抑制后的图像幅度为  $A(u, v)$ , 设定每一类在图像中所占的比例, 计算每一类的均值  $\mu_i (i = 1, 2, 3)$ , 标准方差  $\sigma_i (i = 1, 2, 3)$ , 确定每一类的概率密度函数  $f_i =$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left[-\frac{(x - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] (i = 1, 2, 3)$$

(2) 对图像的每一点  $A(u, v)$ , 计算属于每一类的概率  $f_i (i = 1, 2, 3)$ , 取其中概率值最大的类, 即  $f_j = \max_{i=1,2,3} f_i$ , 并将  $A(u, v)$  归为第  $j$  类。

(3) 更新每一类的均值  $\mu_i (i = 1, 2, 3)$  和标准方差  $\sigma_i (i = 1, 2, 3)$  及概率密度函数  $f_i =$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left[-\frac{(x - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] (i = 1, 2, 3)$$

(4) 重复步骤(2)和(3), 直到均值和方差不再改变为止。

(5) 对属于弱反射点的每一像素点赋值为 1, 其余的点赋值为 0, 则得到一幅二值图像  $B(u, v)$ ,

$$B(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{如果 } A(u, v) \text{ 属于弱反射点} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

## 3 形态学滤波<sup>[3]</sup>

由于斑块噪声的影响, 图像中不属于弱反射点的点也有可能被分割到感兴趣区域中去, 它们在感兴趣区域图像  $B(u, v)$  中表现为小区域、弱细直线或孤立点。使用形态学滤波可以有效地去除这些杂点。形态学腐蚀可以去除弱细线段和孤立杂点。小区域可以根据区域像素点数来去除。

假定形态学滤波的结构元素尺寸设为  $(2p_m + 1) \times (2p_m + 1)$ , 则令:

$$E(u, v) = \begin{cases} 0 & \text{如果 } \exists B(i, j) = 0, i \in [u - p_m, u + p_m], j \in [v - p_m, v + p_m] \\ 1 & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

孤立杂点通过下式去除:

$$E(u, v) = \begin{cases} 0 & \text{如果 } \sum_{|i-u| \leq p_m} \sum_{|j-v| \leq p_m} E(u, v) \leq 1 \\ 1 & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

在腐蚀处理之后, 道路边缘上的像素点也被腐蚀了。为了修复原来的边缘, 必须对图像进行膨胀操作。

$$M(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{如果满足 } A \text{ 或 } B \text{ 的条件} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

其中, 条件  $A$  为:  $E(u, v) = 1$ ; 条件  $B$  为:  $B(u, v) = 1$  并且存在一点  $(p, q)$   $p \in [u - p_m, u + p_m], q \in$

$[v - p_m, v + p_m]$ 满足  $E(p, q) = 1$ 。

经过形态学操作的图像  $M(u, v)$  中仍然存在虚警区域, 根据区域的几何特征<sup>[5]</sup>可以进一步去除这些区域。可利用的特征为:

#### (1) 区域的面积

区域的面积  $A$  为区域内像素点的总数。如果  $A$  非常小, 则显然是虚警区域, 去除此区域。

#### (2) 宽长比

宽长比为区域最小外接矩形的宽与长之比。方形、椭圆形区域的宽长比接近于 1, 而细长区域的宽长比则小于 1。道路区域的宽长比一定很小, 如果宽长比较大, 则此区域必定不是道路区域, 去除。

经过基于区域几何特征的处理, 得到二值图, 记为  $R(u, v)$ 。

## 4 道路识别

形态学滤波和区域几何特征处理的图像结果  $R(u, v)$  被用来进行道路识别。对  $R(u, v)$  用简单的 Sobel 算子取边缘, 道路的两条边缘是笔直、互相平行的两条直线。由于车辆、树木或建筑物的影响, 道路边缘可能并非完全连续, 中间会出现一些断裂。但使用平均 Hough 变换, 在变换域中, 道路边缘仍然是占绝对优势的峰值点, 不受这些干扰的影响。

### 4.1 Hough 变换

#### 4.1.1 Hough 变换的基本原理

Hough 变换是 Hough<sup>[4]</sup> 于 1962 年提出的形状匹配技术, 它可将被检测图像中的参数曲线在参数空间中凝聚起来, 形成与相应曲线对应的参数峰点, 从而得到图像中各个曲线的参数。对于离散的有限图像来说, Hough 变换的思想是将所有可能的线条参数组成的参数空间量化为有限的参数表。

(1) 将该表各个元素初始化为 0;

(2) 对图像中每个点, 对所有通过该点的曲线参数进行累加统计;

(3) 统计完后, 参数空间的幅值点的参数对应的就是要检测的原图像中参数线条。

Hough 变换的突出特点是抗干扰性强, 对被检测图像的噪声不敏感, 即使待检线条有小的扰动或断裂, 甚至虚线, 进行 Hough 变换后, 在参数空间仍能得到明显的峰点。

#### 4.1.2 平均 Hough 变换

根据通常的方法对图像进行 Hough 变换时会遇到一个问题。如图 1 所示, 直线 1 和直线 2 虽然都跨越了整个图像, 但处在它们各自直线上的像素点数不尽相同, 因此, 不能简单地进行直线方向上的像素灰度值求和。理论上比较精确的方法是沿不同方向的直线按像素内插成相同的点数, 然后再求和, 但这样做的计算量非常大。一种简单的办法就是使用平均 Hough 变换, 将每条直线方向上的积分结果除以这条直线上的所有像素点数。

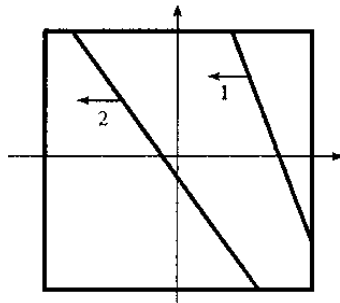


图 1 平均 Hough 变换示意图

Fig. 1 Geometries of averaged Hough transform

## 4.2 道路提取

### 4.2.1 全局 CFAR 检测<sup>[5]</sup>

当  $n$  (整幅图像像素和)较大时,由中心极限定理可以知道,经 Hough 变换的结果  $h(\rho, \theta)$  将符合高斯分布,其概率密度函数可以表示为:

$$f(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\hat{\sigma}_h} \exp\left\{-\frac{[h(\rho, \theta) - \bar{h}]^2}{2\hat{\sigma}_h^2}\right\} \quad (5)$$

其中  $\bar{h}$ 、 $\hat{\sigma}_h$  分别是  $h(\rho, \theta)$  的均值和方差的估计值。

$$\text{令 } g(\rho, \theta) = [h(\rho, \theta) - \bar{h}] / \hat{\sigma}_h$$

$$\text{则 } f(g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp[-g(\rho, \theta)^2 / 2] \quad (6)$$

根据(6)式,进行如下假设和处理:

$$H_0: |g(\rho, \theta)| \leq \Omega_T, \text{判无目标,并令 } g(\rho, \theta) = 0 \quad (7a)$$

$$H_1: |g(\rho, \theta)| > \Omega_T, \text{判有目标,并令 } g(\rho, \theta) = 1 \quad (7b)$$

式(7)中,  $\Omega_T$  是检测门限,它与虚警概率  $P_f$  的对应关系为:

$$P_f = \int_{-\infty}^{-\Omega_T} f(g) \lambda g + \int_{\Omega_T}^{\infty} f(g) \lambda g = 2 \cdot [1 - \Phi(\Omega_T)] \quad (8)$$

其中,  $\Phi(\Omega_T) = \sum_{-\infty}^{-\Omega_T} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{x^2}{2}) dx$ , 是标准正态积分函数,其值可以查表得到,如  $\Omega_T = 2, 3$  时,  $\Phi(2) = 0.9733$ ,  $\Phi(3) = 0.9987$ , 由(8)式可得所对应的虚警概率分别为 4.54% 和 0.27%。

从上面分析可以知道,门限  $\Omega_T$  选定后,虚警概率  $P_f$  就确定了,反之亦然。这样,可以实现对变换域峰值的 CFAR 检测(记为  $c_f(\rho, \theta)$ ),类似于其它雷达目标的检测,门限值越高,虚警就越低,但同时也使检测概率降低。

### 4.2.2 峰值点检测及道路识别

CFAR 检测只能检测峰值区域,而不能精确确定峰值点,无法对道路边缘精确定位。因此结合上面的 CFAR 检测结果  $c_f(\rho, \theta)$ ,对变换域  $h(\rho, \theta)$  采取逐最大值点搜索的方法来确定峰值点的位置。

算法步骤:

(1) 设 CFAR 检测结果中  $c_f(\rho, \theta) = 1$  代表可能的峰值点。

(2) 搜索变换域  $h(\rho, \theta)$  的最大值  $R_{\max}$ ,记下相应位置  $(\rho, \theta)$ ,如果  $c_f(\rho, \theta) = 1$  则认为此点是峰值点。

(3) 估计道路的宽度  $d$ ,根据道路的宽度,选取合适的邻域  $(2d_1 + 1) \times (2d_2 + 1)$ ,在 Hough 变换域  $h(\rho, \theta)$  中将此点的邻域清零,即令  $R(m - d_1 : m + d_1, n - d_2 : n + d_2) = 0$ 。

(4) 重复(2)(3),直到变换域  $h(\rho, \theta)$  的最大值  $R_{\max}$  的对应点  $(\rho, \theta)$  在 CFAR 检测结果中的值  $c_f(\rho, \theta) \neq 1$  这样便找出了所有的峰值点。

由于道路在高分辨率 SAR 图像上表现为具有两条明显边缘和一定宽度的黑色直线,它的两条边缘和图像的边缘共同组成一个狭长的平行四边形。那么如果在变换域找到的两个峰值点  $(\rho_1, \theta_1)$   $(\rho_2, \theta_2)$  对应于一条道路的两条边,这两点必须满足下面的条件

$$\begin{aligned} |\rho_1 - \rho_2| &\in [d - \varepsilon, d + \varepsilon] \\ |\theta_1 - \theta_2| &\in [0, \varepsilon] \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $\varepsilon$  为无穷小量。

但是,如果  $R(u, v)$  中的虚警区域的边缘过于繁杂,也有可能检测出满足上述条件的点,这样就出现了虚假道路。实际上,理想的道路对应的平行四边形区域内的点应该全部属于弱反射点,即在 ROI 提取结果  $R(u, v)$  中,平行四边形内的点应全部为 1。那么计算满足条件(9)式的点与图像边缘所组成的平行四边形内值为 1 的点的数量与总点数的比值  $t$  (理想的道路  $t$  值应为 1) 取门限值  $T$ ,如果  $t > T$  则为

道路,否则,非道路。

紧接着上面步骤(4),有:

(5)从找到的所有的最大值点中,搜索符合条件(9)式的点对,作为一条准道路的两条边。

(6)对步骤(5)提取的准道路,根据比值 $t$ 进行鉴别,确定提取出一条道路。

### 5 实验结果

实验使用MSTAR Redstone的实测杂波图,X波段,HH极化,1ft \* 1ft分辨率。图像尺寸为1476 \* 1784。

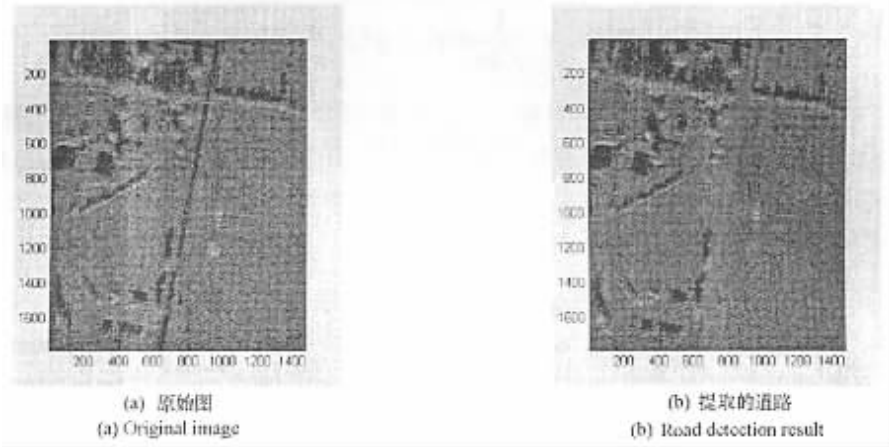


图2 HB06232 图像道路提取

Fig.2 Experiment results

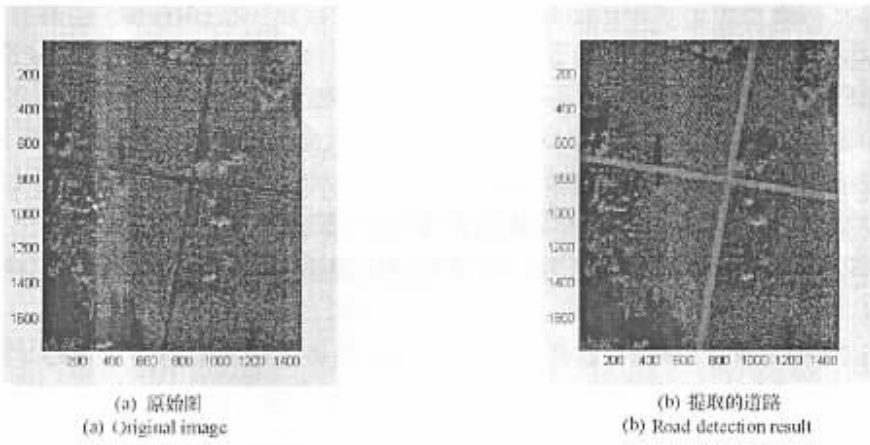


图3 HB06211 图像道路提取

Fig.3 Experiment results

由图 $\chi$ (a)和图 $\xi$ (a)可见,两幅图中的道路上都有树木遮挡。但是基于Hough变换的方法能够完全不受此干扰,很好地将图中的道路提取出来。道路提取结果分别列于图 $\chi$ (b)和图 $\xi$ (b)。

### 6 结论

本文结合了噪声抑制、ROI提取、形态学和几何特征滤波、平均Hough变换将道路目标从图像中提取出来,取得了很好的效果。总的来说,整个算法的特点主要体现在以下几处:

(1)通常提取ROI的方法是使用CFAR检测或直接使用灰度阈值分割。在本文中,使用基于高斯概率迭代算法,较之CFAR,后者能够更好地提取区域,完美地保留了区域边缘,因为迭代的方法更具有自适应的效果。

(2) 本算法充分利用了形态学和区域几何特征对 ROI 中的目标进行滤波,能较好地为后面的目标识别过程提供目标切片,在降低计算量的同时提高了检测率。

(3) 对于一般 Hough 变换存在的问题,采取了平均 Hough 变换作为解决方法,把它的峰值点作为潜在的道路目标点更具有合理性。

(4) 检测变换域峰值点时,如果仅仅使用 CFAR 检测只能检测出峰值区域。本算法采用了结合全局 CFAR 检测的逐最大值点搜索的方法,能够精确地确定峰值点的位置。

此外,需要指出的是,在本文中所讨论的道路目标是贯穿于整幅图像的。对于非此类图像,可以将其分割为小块子图像,然后再对子图像分别用本文提供的算法进行道路提取。

## 参 考 文 献 :

- [1] Frost V S, et al. A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise[ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence , 1982 , PAMI - 4( 2 ): 157 - 165 .
- [2] Illingworth J ,Jain A K. A Survey of the Hough Transform[ J ]. Comput. Vision Graphics Image Processing , 1988 44 87 - 116 .
- [3] Giardina C R ,Dougherty E R. Morphological Methods in Image and Signal Processing[ R ]. Prentice-Hall , Englewood Cliffs , New Jersey , 1988 .
- [4] Hough P V C. Method and Means for Recognizing Complex Pattern[ P ]. U. S. Patent 3069654 , 1962 .
- [5] Wang Y , Chellappa R ,Zheng Q. CFAR Detection of Targets in Full Polarimetric SAR Images[ R ]. CAR-TR-696 , CS-TR-3177 , University of Maryland and College , Park , November 1993 .
- [6] Rosenfeld A ,Kak A C. Digital Picture Processing[ M ]. Academic Press , New York , 1982 .

(上接第 49 页)

## 参 考 文 献 :

- [1] Daubechies I. Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelets[ J ]. Comm. Pure Appl. Math. , 1988 41 990 - 996 .
- [2] Mallat S G. A Theory of Multiresolution Signal Decomposition :the Wavelet Representation[ J ]. IEEE Trans. on PAMI , 1989 11 674 - 693 .
- [3] Steffen P , Heller P N ,et al. Theory of Regular M-band Wavelet Bases[ J ]. IEEE Trans. Signal Processing , 1993 41 3497 - 3510 .
- [4] Oraintara S , Tran T D , et al. Lattice Structure for Regular Paraunitary Linear-phase Filterbanks and M-band Orthogonal Symmetric Wavelets [ J ]. IEEE Trans. Signal Processing , 2001 49 2659 - 2672 .
- [5] Soman A K , Vaidyanathan P P ,Nguyen T Q. Linear Phase Paraunitary Filter Banks : Theory , Factorizations and Designs [ J ]. IEEE Trans. Signal Processing , 1993 41 3480 - 3495 .
- [6] Lawton W , Lee S L , Shen Z. An Algorithm for Matrix Extension and Wavelet Construction[ J ]. Math. Computation , 1996 65 723 - 737 .
- [7] Adams W W , Loustanaunau P. Introduction to Grobner Bases. Graduate Studies in Mathematics [ M ]. American Mathematical Society , Providence , R. I. , 1994 .
- [8] Basu S ,Choi H M. Hermite Reduction Methods for Generation of a Complete Class of Linear-phase Perfect Reconstruction Filter Banks-part I : Theory [ J ]. IEEE Trans. Circuits and System-II Analog and Digital Signal Processing , 1999 46 434 - 447 .
- [9] Belogay E ,Wang Y. Compactly Supported Orthogonal Symmetric Scaling Functions[ J ]. Appl. Comput. Harmon. Anal. , 1999 7 :137 - 150 .

