

一种基于小波变换的雷达图像边缘提取方法

刘佳敏,周荫清

(北京航空航天大学电子工程系,北京 100083)

摘 要: 图像最基本的特征是边缘,边缘特征提取是多传感器信息融合与景象匹配中的重要内容.合成孔径雷达图像通常带有较强的相干斑噪声,用传统的边缘检测算法效果很不理想.本文针对合成孔径雷达自身的特点,利用小波变换的特性,提出一种将小波变换的多尺度分析与模糊加权中值滤波相结合的边缘特征提取方法.实验证明方法有效,边缘定位准确,并对噪声有抑制作用,将提取结果用于匹配,定位精度达到 1 个像素.

关键词: 边缘特征提取;小波变换;中值滤波;合成孔径雷达图像

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12-1780-04

A SAR Image Edge Extraction Method Based on the Wavelet Transform

LIU Jia-min, ZHOU Yin-qing

(Dept. of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Edge extraction is one of the most important components of multisensor information fusion. For SAR images the performance of conventional edge extraction methods such as those based on zero crossings of the second order derivatives is terribly bad due to the existence of speckle. Based on the analysis of the characteristics of synthetic aperture radar (SAR) images, this paper puts forward a combined method for edge extraction of SAR images, which is composed of wavelet transform and fuzzy weighted median filter. Wavelet can be used for edge detection because multiresolution wavelet decomposition of an image yields detailed coefficients that contain the high frequency content of the image. Median filter is a kind of nonlinear filters that has good ability in keeping edge. The experimental results show the effectiveness and stability of the method. The examples of SAR image edges and visible light image edges are given and analyzed respectively. Furthermore, these edges are used for image matching. The precision of location can come to 1 pixel.

Key words: edge extraction; wavelet transform; median filter; SAR image

1 引言

随着精确制导技术的发展,通过多传感器信息融合的方法来提高飞行器自主导航定位精度已经成为人们关注的研究方向之一.图像目标的匹配定位是自动导航飞行器中的一个主要问题.在成像雷达未制导中,用数字军事地图作为参考图,雷达图像作为实时图进行匹配定位是一种实用有效的方法.而这些不同属性的图像由于成像机理不同,直接用于匹配精度很难提高.通过研究发现,这些图像对同一地面特征的反应不尽相同,主要相似点是道路、建筑物、植被区等的形状特征.由此可见,景物的边缘形状特征是两种图像共同具有的特征,因此,对于不同性质图像的匹配,研究其边缘特征是进行精确匹配的关键^[1].

小波变换是 80 年代后期发展起来的应用数学分支^[2].由于小波变换具有良好的局部化特性及多尺度分析能力,适合于检测突变信号.当取小波母函数为平滑函数的一阶导数时,信号的小波变换的值在跳变处表现出较明显的峰值,并且不

随尺度变化,而噪声的小波变换则随尺度的加大而迅速减小.基于上述分析,同时考虑到雷达图像自身的特点,本节结合小波变换的多尺度分析与模糊加权中值滤波,提出一种组合式的边缘特征提取方法,并利用真实图像进行特征提取与匹配试验研究,结果表明该方法具有良好的边缘特征提取效果.

2 图像的小波变换

2.1 小波变换的奇异点和信号变化剧烈处间的联系

设 $f(t)$ 是某一个平滑作用的低通函数(如高斯函数 $f(t) = \frac{1}{\sqrt{t}} e^{-\frac{t^2}{2}}$),则信号 $x(t)$ 被 $f(t)$ 平滑后得 $y(t)$,再求 $y(t)$ 的导数 $y'(t)$.这一运算等效于直接用 $\frac{d}{dt}$ 对 $x(t)$ 作处理.这一等效性只要利用拉氏变换便很容易证明^[12].因此可知,如果 $f^{(1)}(t)$ 是某一低通平滑函数 $f(t)$ 的一阶导数,则可用 $f^{(1)}(t)$ 对信号 $x(t)$ 作小波变换.此时小波变换的极值点是 $\frac{d^2 y}{dt^2} =$

0 处,也就是 $y(t)$ 的转折点 ($y(t)$ 是 $x(t)$ 被 (t) 平滑后的结果)^[3,4].

2.2 小波变换的实现

由于高斯函数是一个低通平滑函数,满足 $(t) dt > 0$, $(=0) > 0$,且具有能量集中,收敛快,及指数衰减等优点,它的各阶导数必定是带通函数,根据傅立叶变换微分定理,它们的频率特性在 $=0$ 处必有零点.因此 $(1) (t) = \frac{d}{dt}$ 可以作为小波变换的基本小波.取高斯函数 $(x, y) = \frac{1}{2^2} \exp\left[-\frac{x^2+y^2}{2}\right]$.把它沿 x, y 两个方向上的一阶导数作为两个基本小波:

$$x(x, y) = \frac{\partial (x, y)}{\partial x} = -\frac{x}{2} \exp\left[-\frac{x^2+y^2}{2}\right] \quad (1)$$

$$y(x, y) = \frac{\partial (x, y)}{\partial y} = -\frac{y}{2} \exp\left[-\frac{x^2+y^2}{2}\right] \quad (2)$$

作二进小波变换,取尺度因子为 $a=2^j$,再令

$$\begin{aligned} \tilde{x}^j(x, y) &= \frac{1}{4^j} x \left[\frac{x}{2^j}, \frac{y}{2^j} \right] \\ \tilde{y}^j(x, y) &= \frac{1}{4^j} y \left[\frac{x}{2^j}, \frac{y}{2^j} \right] \end{aligned}$$

则对任意二维函数 $f(x, y) \in L^2(R^2)$,其小波变换有两个分量:

$$\text{沿 } x \text{ 方向: } WT_2^j f(x, y) = f(x, y) ** \tilde{x}^j(x, y) \quad (3)$$

$$\text{沿 } y \text{ 方向: } WT_2^j f(x, y) = f(x, y) ** \tilde{y}^j(x, y) \quad (4)$$

式中 $**$ 代表二维卷积,它的具体含义是

$$f(x, y) ** \tilde{x}^j(x, y) = \frac{1}{4^j} \iint f(x-u, y-v) x \left[\frac{u}{2^j}, \frac{v}{2^j} \right] dudv \quad (5)$$

为能实际编程实现,将上式离散化

$$\begin{aligned} WT_2^j f(x, y) &= \frac{1}{4^j} f(x, y) ** \left[-\frac{x}{2} \exp\left[-\frac{x^2+y^2}{2}\right] \right] \\ &= -\frac{f(x-u, y-v) \cdot u \exp\left[-\frac{u^2+v^2}{2}\right]}{2^2 \cdot 4^j} \end{aligned} \quad (6)$$

观察上式,虽为无穷项求和,但是由于对有限图像灰度,将其乘以一个指数衰减的因子,当 u, v 的绝对值达到一定程度,后面的各项很小,可以忽略,从而将无穷级数转化为有限项求和.具体计算如下:综合考虑计算精度与速度的要求,假设 $=1.0$,当 $|u| > 5$ 或 $|v| > 5$ 时,有

$$\exp\left[-\frac{u^2+v^2}{2}\right] < 0.05 \quad (7)$$

这时可以略去其后各项的影响,将窗口宽度取为 11,试验证明效果较好.

2.3 结合多尺度小波变换信息进行降噪处理

通常图像灰度的小波变换模值随尺度的增加而增加,而噪声的小波变换随尺度的增加而减小.因此把一部分尺度上对应于同一空间位置 k 处的小波变换相乘(例如 $Cor(k) = WT_2^1(k) \cdot WT_2^2(k)$)就能把边缘表现得更突出,并把噪声的表

现削弱.利用这种信号和噪声不同的尺度间的相关性,相邻尺度之间的小波变换系数直接相乘(相关),即计算

$$Cor(j, x, y) = WT_2^1(x, y) \cdot WT_2^2(x, y) \quad (8)$$

只保留空间相关大的小波系数,而舍弃那些空间相关小的小波系数,实际工作时,设定一定的阈值,将相关性大于阈值的置 1,小于阈值得置 0,得到一个空间屏蔽滤波器.把这个屏蔽滤波器与各尺度的 $WT_2^j(m, n)$ 相乘,得到新的 $WT_2^j(m, n)$,从而可以在边缘未被削弱的情况下有效去除噪声^[5].

3 模糊加权中值滤波

中值滤波是一种非线性滤波方法,它能在较好的保持边缘细节的基础上有效的滤除噪声^[6].假设输入信号为一个二维信号 $f(i, j)$,取它的 $(2N+1) \times (2N+1)$ 邻域(即假设窗口长度为 $2N+1$)

$$\begin{bmatrix} f(i-N, j-N) & \dots & f(i-N, j) & \dots & f(i-N, j+N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f(i, j-N) & \dots & f(i, j) & \dots & f(i, j+N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f(i+N, j-N) & \dots & f(i+N, j) & \dots & f(i+N, j+N) \end{bmatrix} \quad (9)$$

假设 $f(i, j)$ 的取值范围为 $:0 \leq f(i, j) \leq \text{Max}$ (可以通过量化得到),则 $f(i, j)$ 可以被分解为 $f^{(1)}(i, j), \dots, f^{(\text{Max}-1)}(i, j)$,分解方法如下

$$f^{(m)}(i, j) = \begin{cases} 1 & , f(i, j) = m \\ 0 & , \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

$R^{(m)}(i, j)$ 为 $f^{(m)}(i, j)$ 的加权平均值,定义

$$R^{(m)}(i, j) = \frac{\sum_{s=-N}^N \sum_{t=-N}^N W_{st} f^{(m)}(i+s, j+t)}{\sum_{s=-N}^N \sum_{t=-N}^N W_{st}} \quad (11)$$

其中 W_{st} 为加权函数.接着定义模糊布尔函数 $g[R^{(m)}(i, j)]$,该函数在 $0 \sim 1$ 之间连续取值.

$$g[R^{(m)}(i, j)] = \begin{cases} 1 / \{1 + \exp[-\lambda_1 (R^{(m)}(i, j) - \mu)]\} & R^{(m)}(i, j) < \mu \\ 1 / \{1 + \exp[-\lambda_2 (R^{(m)}(i, j) - \mu)]\} & \text{其它} \end{cases} \quad (12)$$

当 $\lambda_1 = \lambda_2 = -$ 时,上式变为二值布尔函数,为其门限:

$$g[R^{(m)}(i, j)] = \begin{cases} 1 & , R^{(m)}(i, j) < \mu \\ 0 & , \text{其它} \end{cases} \quad (13)$$

由此可见 λ_1, λ_2 决定函数的收敛速度,且 $\lambda_1 < 0, \lambda_2 < 0$.为了滤除噪声,希望当噪声方差比较大的地方, λ_1, λ_2 绝对值较小,即收敛速度较慢.因此,给出 λ_1, λ_2 的表达式

$$\lambda_1 = \lambda_2 = - \left\{ 1 - \frac{i, j - \mu_{\min}}{\mu_{\max} - \mu_{\min}} \right\} \quad (14)$$

其中 i, j 为像素点 $f(i, j)$ 在窗口中的方差, μ_{\min}, μ_{\max} 分别为整幅图像中的 i, j 最小值与最大值. $\lambda_1, \lambda_2 \in [-, 0]$, i, j 越大,函数 $g[R^{(m)}(i, j)]$ 变化越缓,从而在一定程度上滤除杂波.

最后加权中值滤波器的输出为

$$y(i, j) = \frac{\sum_{m=0}^{\text{Max}-1} g[R^{(m)}(i, j)]}{m=0} \quad (15)$$

4 实现方法与步骤

下面我们给出这种边缘特征提取算法的具体步骤:

(1) 离散的图像信号在时间和空间上是有限的,因此必须解决离散卷积的边界问题,在程序实现中是将原信号做对称延拓,设原信号长度为 N ,滤波窗口宽度为 L ,则延拓信号为

$$f(n) = \begin{cases} f(-n), & -(L-1)/2 \leq n < 0 \\ f(n), & 0 \leq n < N \\ f(2N-2-n), & N \leq n < N+(L-1)/2 \end{cases}$$

二维信号 $F = \{f_{m,n}\}_{0 \leq m < M, 0 \leq n < N}$ 的延拓同理可以推得.

(2) 作小波变换,对图像的每一行依据式(6)计算 $WT_2^j f(x, y)$,至少求得 $j=1, j=2$ 两组.

(3) 由式(8)将 $WT_2^1 f(x, y)$, $WT_2^2 f(x, y)$ 直接相乘,设定适当地阈值,将各尺度中凡大于该阈值的点的小波系数保留,其余设置为最小值,利用噪声与信号的模随尺度增加时变化特性不同,进行噪声的滤除.

(4) 利用模糊加权滤波的原理进行滤波,得到输出 $y(i, j)$.

(5) 在 $y(i, j)$ 中找出模极大值点,并记录这些点.

(6) 对给定图像的纵向重复以上步骤,求出模极大值点,并记录.

(7) 综合上述结果,给出图像的边缘.

(8) 根据小波多尺度思想,重复以上步骤即可获得不同尺度下的边缘图像.

5 试验结果及讨论

利用本文提出的边缘特征提取算法对一幅 $256 \times 256 \times 8\text{bits}$ 像素的 SAR 图像(如图 1)进行了模拟试验,小波变换尺度取 2^2 ,利用小波变换模极大值检验到的各尺度的边缘特征图像如图示(如图 2).从图中可以清晰的分辨出图像的轮廓特征,受斑点噪声干扰几乎为零,这就为不同性质图像之间的匹配提供了基础.

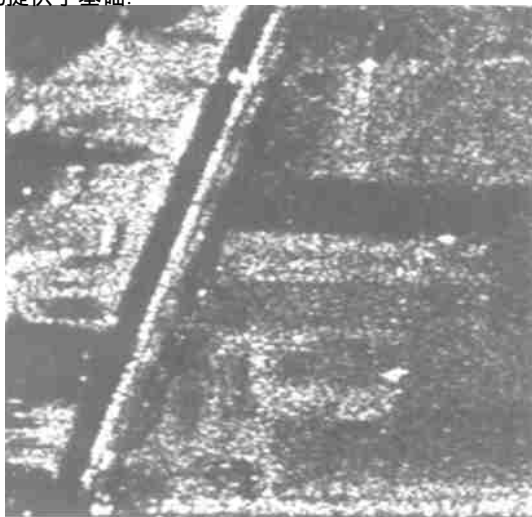


图 1 原始 SAR 图像

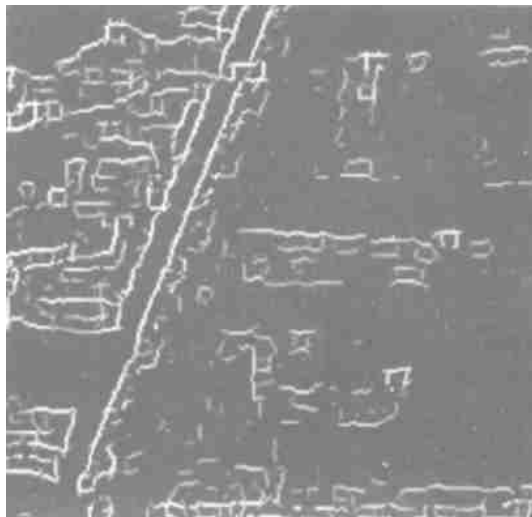


图 2 尺度 2^2 边缘图像

为进一步验证该算法提取出的边缘特征图像用于匹配时的准确度,取两幅来自同一地区的不同性质的图像进行匹配试验,一张为可见光图像,另一张为雷达图像,分别从中截取 $256 \times 256 \times 8\text{bits}$ 像素及 $128 \times 128 \times 8\text{bits}$ 像素两幅子图作为参考图(如图 3)与实时图(如图 5)进行匹配试验,匹配算法采用文献(7)中介绍的灰度相关求取峰值的方法,匹配结果如图 6 所示,表 1 给出了用三种不同的边缘特征提取方法得到的不同匹配结果的比较,证实了该方法的有效性.

图 3 可见光参考图



图 4 参考图边缘图像

表 1 三种边缘特征提取方法匹配结果比较

	检测到的匹配点	真实匹配点与峰值最大点之比	结 论
Sobel 算子	(98, 98)	0.5415	失配
Canny 算子	(1, 5)	0.9557	失配
本文方法	(0, 4)	1.0000	匹配

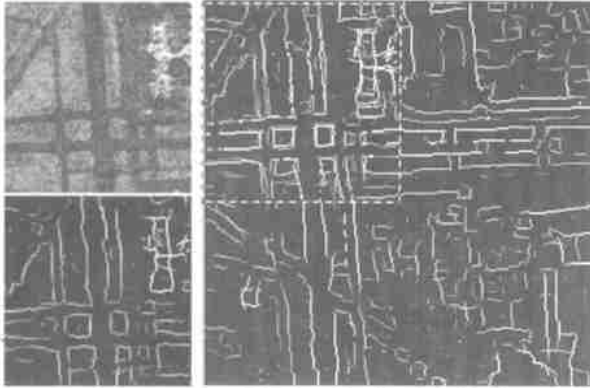


图5 雷达图及其边缘图像

图6 匹配结果

6 结束语

本文针对合成孔径雷达图像的特点,提出了将小波变换的多尺度分析与模糊加权中值滤波相结合的一种边缘特征提取方法.利用小波变换特性,获得图像的高频细节信息,结合多尺度分析,消去部分噪声.模糊加权中值滤波具有较好的滤波效果及边缘保持能力,文中将图像统计特性作用于滤波门限的选取,使得滤波结果进一步改善.通过真实的 SAR 图像仿真实验表明,该方法具有良好的边缘特征提取能力,将其结果用于匹配,精度可达 1 个像素.由于小波变换的多尺度分析能力,该方法还可以用于基于金字塔结构的多级匹配算法,进一步提高精度及速度.

参考文献:

- [1] D Marr, E C Hildreth. Theory of edge detection[J]. Proc R Soc Lond Ser B, 1979, 107: 187 - 217.
- [2] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] J Weaver. Filtering noise from images with wavelet transform[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 1995, 21: 288 - 295.
- [4] Mallat S G. Approximate signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Trans PAMI, 1989, 11(7): 674 - 693.
- [5] Deok J Park. Multiresolution edge detection techniques[J]. Pattern Recognition, 1995, 28(2): 211 - 229.
- [6] Akira Taguchi. A design method of fuzzy weighted median filter[J]. IEEE Int Conference on Image Processing, 1996. 423 - 426.
- [7] 陈东, 李颀. SAR 与可见光图像匹配方法的研究[J]. 中国图象图形报, 2001(3): 223 - 227.
- [8] Canny J F. A Computational Approach to Edge Detection[J]. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 1986, 19(8): 679 - 698.

作者简介:



刘佳敏 女, 1978 年生于陕西省兴平市, 在读硕士研究生, 主要从事信号与信息处理、高分辨率雷达成像等方面的研究工作。

周荫清 男, 1936 年 4 月生于湖南省湘潭市, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 主要从事信息获取与处理、高分辨率成像雷达和时变谱估计等方面的研究工作。