

一种新的基于 Curvelet 变换的遥感图像融合算法

玄立超, 谢亦才

(华南师范大学 计算机学院, 广东 广州 510631)

摘 要: Curvelet 变换能充分利用原函数的几何正则性, 可以达到用更少的系数来逼近奇异曲线的目的, 因此相比小波变换而言, 它更适合分析二维图像中的曲线或直线状边缘特征。综合分析 Curvelet 变换的特性, 提出一种基于 Curvelet 变换的遥感图像融合算法。通过 Curvelet 变换将源图像分解到不同尺度、不同方向的频带范围内, 然后分别对低频、高频分量采取不同的融合规则进行融合, 最后进行 Curvelet 逆变换得到融合结果。实验结果表明该方法在增强空间特征和保留光谱信息方面均优于传统小波变换和传统 Curvelet 变换等方法。

关键词: Curvelet 变换; 图像融合; 融合规则; 融合结果评价

中图分类号: TP301.6

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2009)05-0119-03

A New Remote Sensing Image Fusion Algorithm Based on Curvelet Transform

XUAN Li-chao, XIE Yi-cai

(School of Computer, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: Curvelet transform can take full advantage of the original function of the geometric regularity, which can represent singular curve with fewer factor, compared with wavelet transform, it is more appropriate for analyzing the image edge characteristics of curve and line. The characteristics of curvelet transform are studied, and a novel algorithm to fuse remote sensing image based on curvelet transform is proposed in this paper. Firstly, the curvelet transform is used to perform a multi-scale and multi-orientation decomposition of each image. And then, the curvelet coefficients for the fused image can be obtained by means of different fusion rules for low frequency and high frequency. Finally, the fused image is reconstructed by the inverse curvelet transform. The experimental results indicate that the proposed approach can significantly outperform the traditional wavelet-transform-based methods and traditional curvelet-transform-based in the spatial resolution improvement and the spectral information preservation.

Key words: Curvelet transform; image fusion; fusion rule; image evaluation

0 引 言

随着遥感技术的发展, 不同传感器的遥感图像相继出现, 为用户提供了提供了不同空间分辨率、不同时段与不同光谱信息的海量遥感数据, 为了合理、有效地综合使用这些多元海量数据, 遥感图像融合成为遥感图像处理重要的组成部分。遥感图像融合是指将不同类型传感器获取的同一景物的图像数据进行配准后, 采用一定方法将各图像的优点或互补性有机结合起来产生新图像的技术。对不同空间分辨率、光谱分辨率和时间分辨率的遥感图像数据融合方法进行研究, 已成为遥感及其相关学科领域研究的^[1,2]重要课题。

传统的多光谱图像和全色图像融合算法包括 HSI 变换法、主成分分析法、Brovey 变换法等^[2]。此类算法在有效地提高了融合图像空间分辨率的同时却带来了严重的光谱失真。近几年来, 由于小波变换快速算法的出现, 基于 Mallat 小波变换的遥感图像融合算法得到了重视, 然而 Mallat 小波变换只能反映信号的零维奇异性, 用二维小波对图像进行分析时, 需要更多的系数来表示直线或曲线; 对于二维图像信号, 常用的二维小波是一维小波的张量积, 而二维小波基是“各向同性”(isotropy)的, 无法精确地表达边缘的方向, 因此, Filippo Nencini 等人将具有“各向异性”特征的曲波变换应用于图像融合中^[3]。在此基础上, 国内学者也做了大量的研究^[4,5], 但他们只进行了简单的高频替换或简单的系数重组, 并没有根据 Curvelet 变换的特性对分解后的频域信息进行有机处理。

因此, 提出了一种新的基于 Curvelet 变换的多光

收稿日期: 2008-09-09

基金项目: 广东省百项工程项目(2005B30801006)

作者简介: 玄立超(1983-), 男, 河北迁安人, 硕士研究生, 研究方向为图形图像处理。

谱图像与全色图像融合算法,对 Curvelet 分解完后的高频方阵和低频方阵采用不同的规则进行融合,最后进行 Curvelet 逆变换得到融合结果。

1 Curvelet 变换过程

图像的曲波变换实际是对多分辨率分解后的图像做局部脊波变换而得到。在 R^2 空间中脊波沿脊线 $x_1 \cos(\theta) + x_2 \sin(\theta)$ 方向为一常数,沿正交方向为一小波函数。在频域中,这样一个曲波的基位于沿方向角 θ 的局部化区间 $|\omega| \in [2^s, 2^{s+1}]$ 中。脊波变换可以实现对具有平直边缘的图像目标的稀疏表示。具体地说,对 f 做曲波分解主要包括以下步骤^[6]:

(1) 子带分解。

定义一子带滤波器组 $P_0, \Delta_s (s \geq 0)$, f , 滤波器将 f 分解为不同的子带:

$$f \rightarrow (P_0 f, \Delta_1 f, \Delta_2 f \dots) \quad (1)$$

不同的子带 $\Delta_s f$ 包含了宽度为 2^{-2s} 的细节。

由于 Mallat 小波变换在分解的过程中需要对图像进行采样,导致子带图像的相位失真,因此此处采取具有移不变性的 A Trous 小波对源图像进行子带分解。

(2) 光滑分割。

将各个子带光滑分割为若干子块,各个尺度上分割得到的子块大小根据具体需要确定,可以互不相同。

(3) 脊波分析。

对分割得到的各子块做局部脊波变换。

图 1 给出了整个 Curvelet 分解的示意图。曲波变换本身是冗余变换,若第一步子带分解的层数是 J ,那么整个变换的冗余因子就是 $16J + 1$ 。

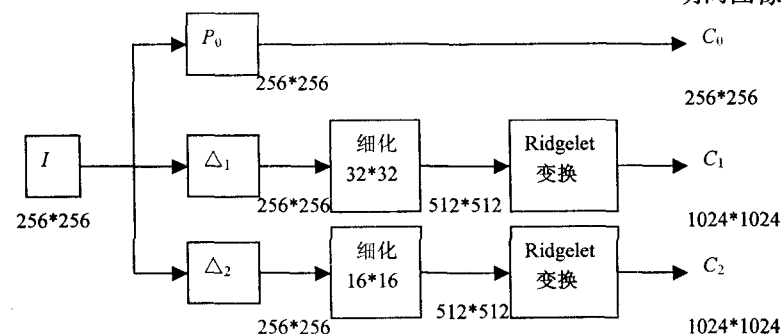


图 1 Curvelet 变换实现示意图

由以上描述可知, Ridgelet 变换是 Curvelet 变换的核心。Ridgelet 变换是由 Candès 等人于 1999 年提出的,其初衷是想解决小波变换在某些应用中受到沿边缘信息表达能力不足的困扰, Ridgelet 变换的基本思想是对图像进行 Radon 变换,即把图像中的一维奇异性,如图像中的直线,映射成 Radon 域的一个点,然后用一维小波进行点奇异性的检测,从而有效地解决了小波

变换在处理二维图像时的的问题。然而单尺度的 Ridgelet 变换分析效果有限,故一般采用多尺度 Ridgelet 变换,即对图像进行分块,使每个分块中的线条都近似直线,再对每个分块进行 Ridgelet 变换,关于 Ridgelet 变换的原理与实现,详见文献[7,8]。

2 基于 Curvelet 变换的遥感图像融合算法

对于原图像 Curvelet 分解得到的高频系数和低频系数,文中按照以下的规则进行融合。

2.1 低频区域系数融合规则

对两幅图像的低频分量部分,首先采用公式(2)进行归一化处理:

$$y_i = \frac{x_i - m_i}{s_i} \quad (2)$$

式中, m_i 是各个图像低频系数的平均值, s_i 是其标准差。

进行归一化处理后,原始的低频系数方阵中的数据分布转化成均值为 0, 方差为 1。归一化处理使得来自不同类型传感器的原始图像中的低频信息对于融合处理所做的贡献均等。对归一化后的低频系数方阵进行比较,确定出两个归一化方阵中相应位置系数绝对值较大的系数的来源,然后取两个原始低频系数方阵中相应系数合成为一个低频系数方阵,将该低频系数方阵用于图像的曲波重构。

2.2 高频区域系数融合规则

对两幅图像的高频分量部分,采取基于局部能量的融合规则。由局部能量计算相应两层空间细节信息的局部匹配度,局部匹配度小于给定的匹配阈值时,说明两图像在该局部区域的“能量”差别较大,此时选择“能量”较大区域的中心像素作为细节融合图像在该位置的像素,当匹配度大于给定的匹配阈值时,此时采用加权融合的方式,“局部能量”较大的中心像素代表了原始图像中的明显特征。算法如下^[9]:

(1) 分别计算两幅图像相应分解层上对应局部区域的“能量” $E_{l,A}$ 和 $E_{l,B}$:

$$E_l(n, m) =$$

$$\sum_{n' \in J, m' \in K} w^l(n', m') [L_l(n + n', m + m')]^2 \quad (3)$$

式中: $E_l(n, m)$ 表示对比度金字塔第 l 层上,以 (n, m) 为中心位置的局部区域能量; L_l 表示对比度金字塔第 l 层图像; $w^l(n', m')$ 为与 L_l 对应的权系数; J, K 定义了局部区域的大小(例如 $3 \times 3, 5 \times 5$ 或 7×7 等); n', m' 的变换范围在 J, K 内。

(2) 计算两幅图像对应局部区域的匹配度 M_{AB} :

$$M_{l,AB}(n,m) = \frac{2 \sum_{n' \in L, m' \in K} w^l(n',m') L_{l,A}(n+n',m+m') L_{l,B}(n+n',m+m')}{E_{l,A}(n,m) + E_{l,B}(n,m)}$$

(4)

其中 $E_{l,A}, E_{l,B}$ 按式(3) 计算。

(3) 确定融合算子:

定义匹配度阈值 T (一般取 $0.5 \sim 1$), 若 $M_{l,AB}(n,m) \leq T$, 则:

$$\begin{cases} L_{l,F}(n,m) = L_{l,A}(n,m), \\ E_{l,A}(n,m) \leq E_{l,B}(n,m) \text{ 时} \\ L_{l,F}(n,m) = L_{l,B}(n,m), \\ E_{l,A}(n,m) > E_{l,B}(n,m) \text{ 时} \end{cases} \quad (0 \leq l < N) \quad (5)$$

若 $M_{l,AB}(n,m) > T$ 时, 则:

$$\begin{cases} L_{l,F}(n,m) = W_{l,\max}(n,m) L_{l,A}(n,m) + \\ W_{l,\min}(n,m) L_{l,B}(n,m), \\ E_{l,A}(n,m) \leq E_{l,B}(n,m) \text{ 时} \\ L_{l,F}(n,m) = W_{l,\min}(n,m) L_{l,A}(n,m) + \\ W_{l,\max}(n,m) L_{l,B}(n,m), \\ E_{l,A}(n,m) > E_{l,B}(n,m) \text{ 时} \end{cases} \quad (0 \leq l < N) \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} W_{l,\min}(n,m) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{1 - M_{l,AB}(n,m)}{1 - T} \right) \\ W_{l,\max}(n,m) = 1 - W_{l,\min}(n,m) \end{cases} \quad (0 \leq l < N) \quad (7)$$

$L_{l,F}$ 为第 l 层细节融合系数。

按照上述规则整合两幅源图像的高频方阵和低频方阵得到一组新的高频方阵和低频方阵, 对其进行 Curvelet 逆变换, 得到融合结果。

3 实验结果与分析

为了验证该算法的正确性和有效性, 文中采用 Spot 全色图像和 Landsat TM 多光谱图像进行融合实验。如图 2 所示。图 2 中(c)~(f) 分别为采用 HSI 变换、DWT 变换、传统 Curvelet 变换及文中方法获得的不同融合结果, 显然基于 HSI 变换的融合结果在提高空间分辨率方面效果最好, 但在保留光谱信息方面最差。

为了评价该方法在空间细节信息和光谱信息方面的影响, 通过熵、平均梯度、相关系数^[10]以及整体图像质量(Q4)^[11]四

个特征量对融合结果进行客观评价。信息熵是反映图像信息丰富程度的重要指标, 熵值越大一定程度上表示图像所含的平均信息量越大; 平均梯度反映图像的细节信息, 平均梯度越高, 说明图像越清晰; 相关系数反映融合图像相对于原多光谱图像的光谱保持程度, 相关系数越接近 1, 表明融合图像的光谱保持性越好; Q4 值反映了原始多光谱图像与融合图像之间的整体相似程度, 进而可以在一定程度上表征融合图像与原始多光谱图像之间的光谱一致性程度, Q4 值越高, 表明光谱失真越小, 融合性能越好。

表 1 各图像的性能统计参数

图像	波段	熵	平均梯度	相关系数	Q4
TM 多光谱图像	R	7.5165	6.6873		
	G	7.5063	6.4850		
	B	7.5169	6.6413		
DWT 融合	R	7.6020	14.1769	0.8805	
	G	7.5909	14.1828	0.8770	0.8636
	B	7.5536	14.1380	0.8802	
Curvelet 变换法	R	7.5165	14.7592	0.8975	
	G	7.5063	14.7476	0.8944	0.8766
	B	7.5169	14.7460	0.8969	
文中方法	R	7.5079	14.8541	0.9193	
	G	7.5674	14.8009	0.9164	0.9197
	B	7.5910	14.7477	0.9200	

通过对表 1 的参数分析, 改进的算法与传统的小波变换和 Curvelet 变换融合算法相比较, 平均梯度和相关系数均有一定的提高; 对融合结果进行整体评价时, 显然, 原始多光谱图像与按文中方法融合得到的图像之间的整体相似程度较高。与前面的理论相吻合, 验证了该方法增强空间信息的和保留光谱信息方面的正确性和有效性。

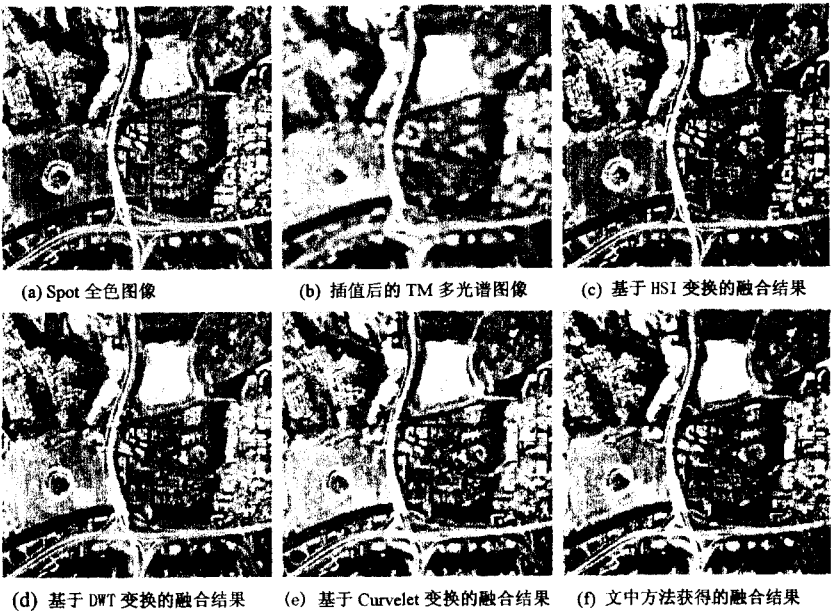


图 2 Spot 全色图像和 TM 多光谱图像及融合结果
(下转第 126 页)

种形式的过滤,但同时也存在消耗网络设备资源的副作用,下面为利用 ACL 过滤 UDP1434 端口的实例:

```
Access-list 101 deny udp any any eq 1434
```

```
Access-list 101 Permit ip any any
```

此过滤针对蠕虫王病毒 (SQL Slammer),但同时也过滤了针对 SQL Server 的正常访问,如果要保证对 SQL Server 的正常访问,还可以根据病毒流数据包的大小特征实施更细化的过滤策略。

(3) 静态空路由过滤。

能确定异常流量目标地址的情况下,可以用静态路由把异常流量的目标地址指向空 (Null),这种过滤几乎不消耗路由器系统资源,但同时也过滤了对目标地址的正常访问,配置实例如下:

```
Ip route 192.168.*.* 255.255.255.255 Null
```

对于多路由器的网络,还需增加相关动态路由配置,保证过滤在全网生效。

5 结束语

实时了解网络的运行状况对通信运营商来说是必要的。合理地利用资源不仅可以减轻网络的维护难度,而且可以降低成本。对 NetFlow 测量技术进行了详细的介绍,并在衡阳联通互联网上部署了 NetFlow,对联通互联网进行监测。研究表明,通过流量测量,可

以方便、有效地进行网络管理,为网络管理员维护网络提供了良好的工具。

参考文献:

- [1] Williamson C. Internet Traffic Measurement[J]. IEEE Internet Computing, 2001(10/11):70-74.
- [2] 程光,龚俭. 大规模高速网络流量测量研究[J]. 计算机工程与应用, 2002,38(5):17-22.
- [3] I-eland W E, Wilson D V. High time-resolution measurement and analysis of LAN traffic: Implications for LAN interconnection[C]// in Proc. IEEE INFOCOM'91. Bal Harbour, FL:[s.n.], 1991:1360-1366.
- [4] 张峰,雷振明. 高速网络流测量及模型研究[J]. 计算机工程与应用, 2004,40(17):28-30.
- [5] 王红莲. 因特网网络流量测量技术的研究和实现[D]. 北京:北京邮电大学, 2004.
- [6] 潘飞,高岭. 网络测量及其关键技术[J]. 计算机技术与发展, 2006,16(7):99-101.
- [7] Cisco Systems. NetFlow service and Application White Paper [EB/OL]. 2001-06. <http://www.cisco.com>.
- [8] 顾静. 电信数据网流量监测系统的设计与实现[D]. 长春:吉林大学, 2007.
- [9] 赵晓峰,徐义东. 基于 NETFLOW 与 SNMP 的园区网流量监控系统[J]. 计算机技术与发展, 2008,18(5):168-171.

(上接第 121 页)

4 结束语

在图像的子带分解过程中, \hat{A} Trous 小波变换的移不变性解决了以往 Mallat 小波变换时由于抽取导致的相位失真的问题; Curvelet 变换的“各向异性”能更有效地保留原高分辨率图像的边缘特征;针对低频和高频部分采取的不同的融合规则,避免了小目标色彩和细节信息的丢失,有利于细节信息与背景色的分离。

文中的方法对空间分辨率之比在 1:4 以内的多光谱图像和全色图像进行融合时能得到较好的融合结果,在以后的研究中,需要适当选择合适的融合规则来融合空间分辨率之比较大的多光谱图像和全色图像。

参考文献:

- [1] 梅安新,彭望琮,秦其明,等. 遥感导论[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.
- [2] POHL C, Van Genderen J L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications[J]. International J. Remote Sensing, 1998,19(5):823-854.
- [3] Nencini F, Garzelli S, Baronti S. Remote sensing image fusion using the curvelet transform[J]. Information Fusion,

2007,8(2):143-156.

- [4] 王振飞,施保昌,王能超. 基于曲波变换的图像融合方法[J]. 小型微型计算机系统, 2007,28(3):533-535.
- [5] 田闯,刘文波. 基于 Curvelet 多聚焦图像融合[J]. 计算机技术与发展, 2008,18(7):29-31.
- [6] 那彦,焦李成. 基于多分辨率分析理论的图像融合方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2007.
- [7] Candes E J. Ridgelets: theory and application[D]. USA: Stanford University, 1998.
- [8] Candes E J. Monoscale ridgelets for the representation of images with edges[R]. USA: Stanford University, 1998.
- [9] 刘贵喜,陈文锦,杨万海. 融合参数对对比度塔形分解图像融合方法性能的影响研究[J]. 电力与系统学报, 2006,11(1):41-42.
- [10] Shi WenZhong, Zhu ChangQing, Tian Yan, et al. Wavelet-based image fusion and Quality assessment[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2005,6(3):241-243.
- [11] Alparone L, Baronti S, Garzelli A. A global quality measurement of pan-sharpened multispectral imagery[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Lett., 2004,1(4):313-317.