

曲波变换的高光谱遥感图像融合方法 在土地利用调查中的应用

田养军¹, 薛春纪², 马智民¹, 曹建农¹

¹ 长安大学 地球科学与国土资源学院, 西安 710054;

² 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室 地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要: 对两个有关土地利用状况调查区域的高光谱和 Quickbird数据进行了数百次算法对比实验, 最终确定 Sym4和 Db2是曲波变换中的最佳小波函数, 提出两种基于曲波变换的高光谱遥感图像融合方法, 即加权法和选择法, 获得了更精确的高光谱遥感融合影像。在一个研究区域, 通过对高光谱数据的子带分解、脊波变换、一定融合以及它们的逆变换等曲波变换过程, 表明融合的高光谱遥感影像能提供许多有利于土地类型划分和影像识别的精确土地信息。在另一个研究区域, 除进行曲波变换外, 还通过二次多项式计算实现了高光谱与 Quickbird数据遥感影像匹配, 最终从高光谱与 Quickbird数据获得的遥感融合影像经目视及信息熵、相关系数等评价表明, 曲波变换融合图像优于小波变换融合图像, 与 Brovey融合图像相近, 但比 PCA融合图像稍差。客观和主观评价证实, 曲波变换的遥感融合方法能为高光谱遥感图像在土地利用状况调查提供更多更准确的信息。

关键词: 曲波变换, 小波变换, 高光谱遥感, 土地利用调查

中图分类号: TP79

文献标识码: A

1 引言

遥感数据的融合是一种通过高级图像处理技术来复合多源遥感影像技术, 其目的是将单一传感器的多波段信息或不同类型传感器所提供的信息加以综合, 消除多传感器信息之间可能存在的冗余和矛盾, 加以互补, 降低其不确定性, 减少模糊度, 以增强影像中心透明度, 改善解译的精度、可靠性以及使用率、以形成对目标的完整一致的信息描述, 并在以下几个方面显示明显的优越性(李德仁等, 2003): (1)锐化影像; (2)改善几何纠正精度; (3)提高立体观测能力; (4)增加原单一数据源中不清晰的那些特征; (5)互补的数据集用于改善分类质量; (6)利用多时域数据进行变化检测; (7)实现某一影像中丢失的信息用另一传感器影像数据来替换; (8)克服目标提取与识别中数据不完整性等。目前图像的融合法有小波变换融合、HIS融合法、KL融合法、高通滤波融合法、金字塔变换融合法、样条变换融合法等。

小波多分辨率分析思想和方法具有多尺度

几何分析特点以及良好的空域和频域的局域性, 在图像融合领域得到了广泛的应用。但是, 小波多分辨率分析的优势在于反映信号的点奇异性, 即反映奇异点的位置和特征, 并不能充分利用图像本身的几何特征, 不是最优的或者是说是“最稀疏”的函数表示方法。Candes和 Donoho于 1998—1999年建立了一种特别适合表示各向异性奇异性的多尺度方法——脊波(Ridgelet)变换(Candes et al. 1998, 1999, 2005)。与小波变换不同, 除了有尺度和位移参量外, 脊波变换还增加了一个方向参量, 因此具有更好的方向辨识能力, 脊波变换相对小波变换可以获得更高的精度。曲波(Curve wave)变换是在单尺度或局部脊波变换的基础上用来描述具有曲线型奇异边界的对象, 它综合了脊波擅长表示直线特征和小波适于表现点状特征的优点, 充分利用了多尺度分析的优势, 使图像处理问题得到好的结果(李晖晖等, 2007)。本文提出了基于 Curvelet的高光谱遥感图像融合, 利用 Curvelet对遥感图像几何特征更优的表达能力, 为高光谱遥感图像在土地利用中土地类型的划分及影像目标判别获得更多更准确的信息提供一种方法。

收稿日期: 2007-07-23; 修订日期: 2007-11-20

基金项目: 国家科技支撑计划项目(编号: 2006BAB7B01-02); Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

第一作者简介: 田养军(1964—), 男, 长安大学地球科学与国土资源学院博士研究生, 从事遥感应用研究, 发表论文 4篇。E-mail: yangjun@chd.edu.cn

2 曲波变换

曲波变换 (Curvelet) 是在单尺度或局部脊波变换的基础上用来描述具有曲线型奇异边界的对象。脊波变换的核心指定方向投影变换即 Radon 变换, 首先介绍二维脊波变换和 Radon 变换, 然后再引出二维曲波变换。

2.1 脊波变换

根据 Candes (1998) 对脊波变换进行如下定义。

定义 1 考虑 d 维 ($d \geq 2$) 空间, 设函数 $\psi: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ 满足条件: $\int_{\mathbb{R}} \psi(t) dt = 0$, 及容许条件:

$$K_{\psi} = \int \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|^d} d\omega < \infty \quad (1)$$

那么, 对于参数集 $\gamma = (a, u, b)$, 定义 $\mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ 函数:

$$\psi_{\gamma}(x) = a^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{ux-b}{a}\right) \quad (2)$$

则称 ψ_{γ} 为由容许条件 (1) 生成的 Ridgelet 函数。其中, a 称为 Ridgelet 的尺度参数, u 表示方向, b 为位置参数。

定义 2 考虑二维空间, 令 $u = (\cos\theta, \sin\theta)$, $x = (x_1, x_2)$ 时, 则 Ridgelet 函数为:

$$\psi_{a,b,\theta}(x) = a^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{x_1 \cos\theta + x_2 \sin\theta - b}{a}\right) \quad (3)$$

式中, $\psi(x)$ 为一维 Wavelet 函数, 称变换:

$$\text{CRT}_f(a, b, \theta) = \int_{\mathbb{R}^2} \psi_{(a,b,\theta)}(x) f(x) dx \quad (4)$$

为 $f(x)$ 在 $\mathbb{R}^2$ 上的连续 Ridgelet 变换。

定义 3 设 $f(x_1, x_2) \in L^2(\mathbb{R}^2)$, 称变换:

$$R_f(\theta, t) = \int_{\mathbb{R}^2} f(x_1, x_2) \delta(x_1 \cos\theta + x_2 \sin\theta - t) dx_1 dx_2 \quad (5)$$

为 f 在 $\mathbb{R}^2$ 上的连续 Radon 变换。

在二维空间中, Ridgelet 变换和 Radon 变换的关系密切, 而 Ridgelet 变换与 Wavelet 变换 (Candes et al. 2002) 通过 Radon 变换相联系, 即有:

$$\text{CRT}_f(a, b, \theta) = \int_{\mathbb{R}} \psi_{a,b}(t) R_f(\theta, t) dt \quad (6)$$

式中, $\psi_{a,b}(x) = a^{-\frac{1}{2}} \psi((x-b)/a)$, 因此可以说, Ridgelet 变换是 Radon 变换域上的一维 Wavelet 变换。

由 $\mathbb{R}^2$ 上的连续 Ridgelet 变换定义式 (4), 可以

推出其重构公式如下 (Candes 1998):

$$f(x) = c_{\psi} \int \text{CRT}_f(a, b, \theta) \psi_{a,b,\theta}(x) \frac{da \times db \times d\theta}{a^3} \quad (7)$$

式中, $c_{\psi} = \frac{1}{4\pi} K_{\psi}^{-1}$ 。

2.2 有限 Radon 变换

由于 Ridgelet 变换用到的是 Radon 切片上的 Wavelet 变换, 离散 Ridgelet 变换实现的关键在于离散 Radon 的实现, 焦李成等 (2005) 提出一种基于有限 Radon 变换的 Ridgelet 变换。

设集合 $Z_p = \{0, 1, \dots, p-1\}$, 其中 p 是一个素数, Z_p 是通过模 p 生成的一个有限区域。定义离散图像 f 在有限网格 Z_p^2 上的有限 Radon 变换 (FRAT) 为:

$$r(k, l) = \text{FRAT}_f(k, l) = \frac{1}{\sqrt{p}} \sum_{(i,j) \in L_{k,l}} f(i, j) \quad (8)$$

式中, $L_{k,l}$ 代表网格 Z_p^2 上所组成的以 k 为斜率, 以 l 为截距的直线 (当 $k = p$ 时, 代表斜率无限大或垂直的直线) 上的点集合。还可以这样定义:

$$L_{k,l} = \{(i, j): j = ki + l \pmod{p}, i \in Z_p\}, 0 \leq k < p \text{ 并且}$$

$$l_{p-1} = \{(i, j): j \in Z_p\} \quad (9)$$

以上定义了有限网格 Z_p^2 上共有 $p(p+1)$ 条直线, 每条直线有 p 个点, 对于任意给定的方向都存在 p 条相互平行的直线, 这些直线完全覆盖了 Z_p^2 平面, 即:

$$\sum_{i=0}^{p-1} r(k, l) = \frac{1}{\sqrt{p}} \sum_{(i,j) \in Z_p^2} f(i, j) = 0 \quad (10)$$

有限 Radon 变换是可逆的。有限 Radon 反变换是通过有限反投影算子, 其定义为:

$$\text{FBP}_r(i, j) = \frac{1}{\sqrt{p}} \sum_{(k,l) \in P_{i,j}} r(k, l) \quad (i, j) \in Z_p^2 \quad (11)$$

$P_{i,j}$ 表示经过 (i, j) 的所有 $p+1$ 条直线, 将式 (8) 代入式 (11) 即有:

$$\begin{aligned} \text{FBP}_r(i, j) &= \frac{1}{\sqrt{p}} \sum_{(k,l) \in P_{i,j}} \sum_{(i',j') \in L_{k,l}} f(i', j') = \\ &= \frac{1}{p} \left(\sum_{(i',j') \in Z_p^2} f(i', j') + pf[i, j] \right) = f[i, j] \end{aligned} \quad (12)$$

2.3 曲波变换的实现

脊波变换一般要对整个区域作均匀分割, 分别

在各个子区域上实现, 这样才能达到好的结果, 所

以,脊波变换又称单尺度脊波分析或局部脊波变换,曲波变换先对信号作小波变换将其分解为一系列不同尺度的子带信号,然后对每个子带在作局部脊波变换,局部脊波变换中子块的大小可以因尺度变化而互不相同。曲波变换实际是多尺度的局部脊波变换。

曲波变换高光谱遥感图像融合实现过程如下(王振飞, 2007):

子带分解 通过将原图像作小波变换分解成多个子带分量;

脊波分析 根据具体需要,对子带进行脊波变换;

图像融合 对子带变换结果,根据一定规则进行融合;

脊波逆变换 脊波逆变换得到新的子图像;

子带重构 新的子图像重构得到融合图像。

3 图像融合方法及评价

3.1 图像融合方法(魏业真, 2006)

3.1.1 加权法

设 A B分别为两幅同分辨率不同波段的高光谱原始图像。地物 S_1 在 A图上清晰在 B上模糊而地物 S_2 在 A上模糊在 B图上清晰,为使地物 S_1 、地物 S_2 可得到可判别影像, F为融合的图像,采用下式计算:

$$R_F^L(i, j) = \alpha R_A^L(i, j) + (1 - \alpha) R_B^L(i, j) \quad (13)$$

$$R_F^H(i, j) = \begin{cases} R_A^H & \text{当 } |R_A^H(i, j)| \geq |R_B^H(i, j)| \text{ 时} \\ R_B^H & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

式中, $R_A^L(i, j)$, $R_B^L(i, j)$ ($X \in (F, A, B)$) 分别表示图像 X低、高小波分量对应的局部脊波变换系数, $\alpha \in [0, 1]$ 为加权因子。

加权法适合相同或相近分辨率之间的融合,这种方法根据原图像各自特征点及融合需要,分别对原图像评价(如方差、梯度),确定原图像在融合时的权系数。这种方法优点根据原图像某个或某些特征大小来确定各个原图像在融合图像中占的比例,融合效果能按人们的思维方式来进行。但对原图像的评价方法还有待提高。

3.1.2 选择法

设 A为高分辨率遥感影像, B为低分辨率高光谱

原始图像, F为融合的图像,为了使融合图像边缘清晰可见,可采用下式计算:

$$R_F(i, j) = R_A^H(i, j) \otimes R_B^L(i, j) \quad (15)$$

式中, $R_A^H(i, j)$ 为 A图高频系数, $R_B^L(i, j)$ 为 B图低频系数, $\otimes$ 为融合符号。选择法适合不同分辨率图像之间的融合,这种方法有助于确保两幅图像的显著特点,即高分辨率的边缘特性和低分辨率的综合特性。融合图像比低分辨率影像清晰许多,又能将高分辨率图像多层次信息进行综合。但融合影像舍弃了低分辨率遥感图像的高频信息和高分辨率遥感图像的低频信息,融合影像细节比高分辨率影像原图像差一些。

3.2 融合结果的评价方法

融合结果的评价分主观评价和客观评价。主观性优点是直接、简单、灵活,可根据图像间的对比做出定性评价,主观评价可按优秀、良好、可用、刚可看、差和不能用等 6级。融合图像通过目视解译在土地利用中土地类型的划分及影像解译,只要达到土地利用类型可以划分,能达到目视判读即可。客观评价是通过计算能表征图像信息有效特征值。对遥感影像评价通常有均值、方差、平均梯度、信息熵、交叉熵、扭曲程度、偏差指数、相关系数等,为了客观定量评价融合效果,对融合图像特征值应综合考虑空间细节信息的增强域光谱信息,可以用信息熵和相关系数评价融合影像。

3.2.1 图像信息熵

图像信息熵是衡量图像信息丰富的一个重要指标,信源集合 $\{a_i; i \in [1, N]\}$ 根据 Shannon信息论的原理,图像信息熵定义为:

$$H = - \sum_{i=1}^N p(a_i) \log_{10}(p(a_i)) \quad (16)$$

式中 $p(a_i)$ 为 a_i 的频度,它等于图像中 a_i 像素个数与图像总像素个数的比。通过对图像信息熵的比较可以对比出图像的细节表现能力。若熵值越大,表明图像包含信息越丰富。

3.2.2 图像的相关系数

图像的相关系数反映了两幅图像的相关程度(曹建农等, 2005)。通过比较融合前后的图像相关系数可以看出多光谱图像的光谱信息改变程度。对于融合前后大小为 $M \times N$ 的 A B图像相关系数定义为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (A(i,j) - \bar{A})(B(i,j) - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (A - \bar{A})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (B - \bar{B})^2}}$$

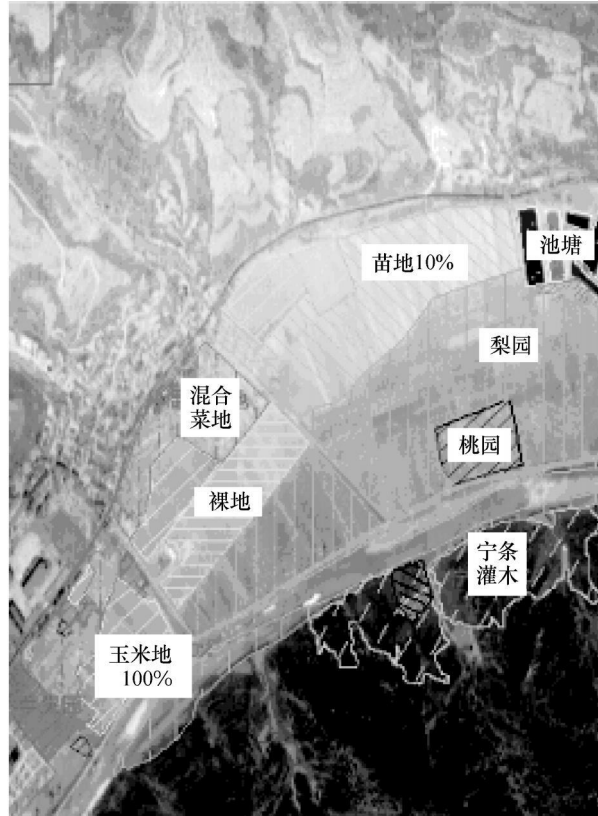
(17)

式中 $\bar{A}$ $\bar{B}$ 分别为融合前图像 $A(i,j)$, 融合后图像 $B(i,j)$ 的平均灰度值。相关系数 $R \in [0, 1]$, 相关系数越大两个图像相似程度越接近, 相关系数越小两个图像相似程度越差。

4 实验与评价

4.1 实验 1

为了更好地获取土地利用信息, 选取延安某地高光谱数据, 图像大小为 457×325 。根据加权法进行融合。使用小波函数为 `sym4` 进行 3 级分解, 采用传统的小波融合方法与曲波融合算法, 图 1 为实验区实际调查资料, 该区域有混合菜地、道路、果园、旱地、水系、苗圃、玉米、藤条, 其中苗圃的地面覆盖率为 10%, 玉米的地面覆盖率为 100%。图 2—图 5 分别为高光谱的 8 波段、21 波段的原图以及小波融合图像和曲波融合图像, 图像评价采用主观评价如表 1。



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>
图 1 实验区实际调查资料

Fig 1 The investigating on the spot in plot of experiment



图 2 8 波段影像
Fig 2 8 band image



图 3 21 波段影像
Fig 3 21 band image



图 4 小波融合图像
Fig 4 Wavelet image fused



图 5 曲波融合图像
Fig 5 Curvelet image fused

表 1 小波算法与脊波算法融合影像地物判别评价表
Table 1 Object Evaluated of image fused by wavelet and curvelet algorithm

图像 土地 类型	8 波段	21 波段	小波融 合图像	曲波融 合图像
混合菜地	可用	可用	可用	可用
道路	①差 ③可看	①良好 ③差	①可看 ③可看	①良好 ③稍可看
果园 (桃 园、梨园)	边界清楚 可看	边界模 糊差	边界可看	边界可看
旱地 (裸 地)	良好	良好	可用	可用
水系 (池 塘、河流)	河流可看 池塘可用	河流可用 池塘可看	河流可看 池塘可看	河流可用 池塘可看
苗圃 10%	良好	可用	良好	良好
玉米 100%	良好	刚可看	可看	可看
藤条 (宁条 灌木)	差	差	刚可看	刚可看

从单张融合影像上看效果不是很明显,通过影像放大详细解译区分,曲波融合方法比小波融合方法获取融合图像较好。道路、河流、线性地物融合效果较为明显,如①道路在 8 波段左下段根本无法判断,但①道路在 21 波段清晰为良好,③道路与②河岸在 8 波段是清晰,但在 21 波段模糊。通过融合,曲波融合影像中的①道路、③道路、②河岸影像效果比小波融合效果好。

4.2 实验 2

本文使用了高光谱影像与 QuickBird 全色高分分辨率影像进行了融合,尺寸大小 280×280 实验影像。高光谱影像和 QuickBird 影像的空间分辨率分

别为 30 m 与 0.6 m。由于高光谱数据有 220 个波段,其中光谱信息非常丰富,本次选择 13、102、151 高光谱波段,在对其进行图像融合要求是在提高空间分辨率的同时还要尽可能地保持其原有的高光谱信息。所以选用融合方法为选择法,取 QuickBird 全色影像分解的高频信息与高光谱 13、102、151 波段分解的低频信息融合,使用小波函数为 Db2 进行 5 级分解。采用传统的小波融合方法与曲波融合方法,为能更好表示出融合效果,分别对原图像的 13、102、151 波段和融合图像对应波段用 RGB 彩色表示,如图 7—图 9 所示。同时与传统 (PCA) 融合方法和 Brovey 融合方法进行对比,如图 10、图 11。评价结果对比表 2 所示。

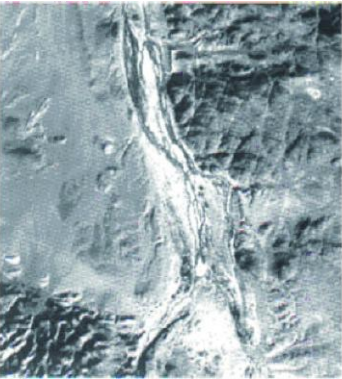


图 6 QuickBird 全波段数据
Fig 6 QuickBird pan image

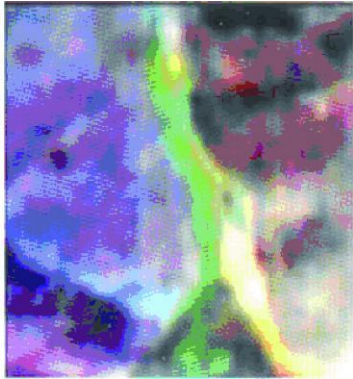


图 7 高光谱图像 RGB (13 102 151)
Fig 7 Hyperion image of RGB (13 102 151)

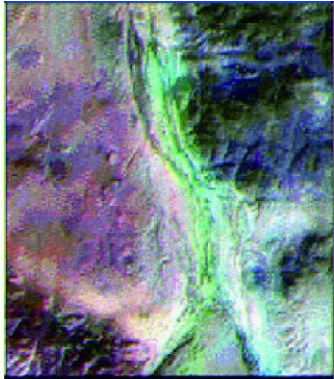


图 8 小波融合图像
Fig 8 Wavelet image fused of RGB



图 9 曲波融合图像
Fig 9 Curvelet image fused of RGB

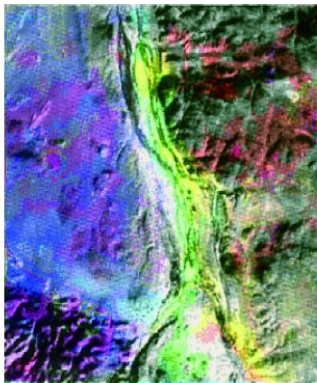


图 10 Brovey 融合影像
Fig 10 Brovey image fused

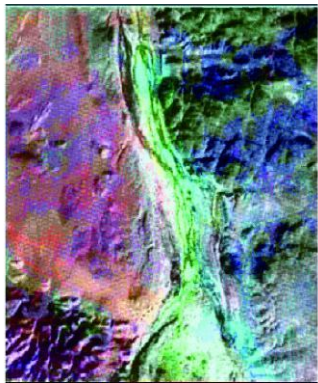


图 11 PCA 融合影像
Fig 11 PCA image fused

曲波变换图像融合方法、小波变换图像融合方法、PCA 图像融合方法和 Brovey 图像融合方法的融合图像与高光谱原图影像对比,融合图像视觉效果大大改变,细节比原图像丰富了许多。基于曲波变换融合图像视觉上比小波变换融合图

像边缘线明显增强。基于曲波变换图像融合方法与传统的 PCA 融合方法和 Brovey 融合方法进行对比,融合图像细节比较接近,但曲波变换方法融合图像比传统方法融合图像包含较多高光谱信息。

表 2 4种融合结果图像的统计参数比较

Table 2 Statistical data of fused images four fusion methods

统计参数 图 像	对应高光 谱波段	与全色波 段的相关 系数	与原始高 光谱波段 相关系数	熵
QuickBird 全色图像	—	—	—	1.2517
小波融合 图像	13	0.7951	0.6274	1.0132
	102	0.8327	0.6857	1.0905
	151	0.8206	0.6021	1.0366
曲波融合 图像	13	0.6784	0.6194	1.0298
	102	0.7424	0.6358	1.0921
	151	0.7067	0.6001	1.0408
Brovey 融合图像	13	0.4673	0.3310	1.0947
	102	0.8262	0.5707	1.1084
	151	0.5078	0.4478	1.0989
PCA 融合图像	13	0.7545	0.0898	1.9744
	102	0.8732	0.4581	2.0096
	151	0.8246	0.1693	1.9657

从表 2 的 4 种融合图像的统计参数看, 相关系数最大的是 0.8732 为 PCA 融合图像的 102 波段与高分辨率图像, 最小相关系数是 0.0989 为 PCA 融合图像的 13 波段与原高光谱 13 波段。熵值最大的是 2.0096 为 PCA 融合图像的 102 波段, 最小的是 1.0132 为小波融合图像 13 波段。融合图像整体平均熵 PCA 融合图像为 1.9832、Brovey 融合图像为 1.1007、曲波融合图像为 1.0542 和小波融合图像为 1.0468。融合图像整体平均相关系数: 小波融合图像为 0.7273、曲波融合图像为 0.6638、PCA 融合图像 0.5282、Brovey 融合图像 0.5251。PCA 融合图像信息量最丰富, Brovey 融合图像与原图像相关性最差。曲波融合图像的相关系数略低于小波融合影像, 说明曲波融合图像与原图像有较大的变化, 信息量改变较多。曲波融合算法图像的熵也强于小波融合算法图像熵, 说明曲波融合图像信息量比小波融合图像信息量丰富。

5 结 论

曲波变换充分发挥了脊波方向辨识的能力, 对曲线型奇异边界特征能擅长的表示, 加上小波适于表现点状特征的优点, 可以充分利用多尺度分析的优势, 使得曲波变换融合方法比小波变换融合方法

的图像效果清晰。

为了能证明曲波变换在融合中的效果, 实验 1 中将小波融合与曲波融合进行对比, 从两幅单影像融合上看效果并不明显, 只是曲波变换融合影像中道路、水系的影像效果比小波变换融合影像效果稍好, 但这正体现了曲波变换对线性地物的融合效果的优势。为了能更好地显示曲波效果和发挥高光谱的高维立体遥感影像的优势, 本文进行了实验 2 选取具有代表性 3 个高光波段与高分辨率的 QuickBird 全色影像数据进行融合, 将其合成彩色图像 (RGB), 这样加大了融合图像之间的差别, 融合图像的视觉效果的差异变得更加明显。曲波变换融合的图像与传统的 PCA 融合图像相比, 信息量虽然较少, 但与原高光谱图像的相关系数较大, 较好的保留高光谱影像的特征, 与 Brovey 融合图像比, 它们的效果十分接近, 与小波融合图像相比, 无论从信息量还是从视觉效果来看, 曲波方法的融合图像比小波方法的融合图像要好得多。

曲波变换对高光谱影像进行图像融合有较好的效果, 不仅保留高光谱影像的光谱信息, 而且也提高了融合图像的空间信息, 为遥感图像提高清晰度、可靠性和在土地利用中信息解译度提供了有力支持。

REFERENCES

Cao J N, Guan Z Q and Li D R. 2005. Study on the approaches for segmentation of hyperspectral images based on DMN. *Journal of Remote Sensing* 9(5): 596- 603

Candes E J. 1998. Ridgelets: theory and application. Department of Statistics, Stanford University

Candes E J. 1999. Monoscale ridgelets for the representation of images with edges. Department of Statistics, Stanford University

Candes E J, Demanet L, Donnoho D L, et al. 2005. Fast discrete curvelet transforms. *Applied and Computational Mathematics*. California Institute of Technology

Candes E J and Donnoho D L. 1999. Curvelets: a surprisingly effective nonadaptive representation for objects with edges. Cohen A, Rabut C and Schumaker L L. *Curve and Surfaces*. Saint Malo: Vanderbilt University Press

Donnoho D L and Flesia A G. 2002. Digital ridgelet transform based on true ridge functions. Stoeckler J and Welland G V. *Beyond Wavelets*. Pittsburgh, PA, USA: Academic Press

Li D R, Zhou Y Q and Jin W X. 2003. General of Photography Survey and Remote Sensing. Beijing: Survey and Map Press

Li H H, Guo L and Liu H. 2007. Research on image fusion based on the second generation curvelet transform. *Acta Optica Sinica* 26(5): 657-662

Jiao L C, Tan S and Liu F. 2005. Ridgelet theory: from ridgelet transform to curvelet. *Chinese Journal of Engineering Mathematics*

22(5): 761—773

Wang Z F, Shi B C and Wang N C. 2007. A lgorithm of image fusion based on curvelet transform. Journal of Chinese Computer Systems 28(3): 533—536

Wei Y Z. 2006. Study for remote sensing image fused methods based on wavelet transformation. China Science and Technology 2: 62—63

附中文参考文献

曹建农,关泽群,李德仁. 2005. 基于 DMN 的高光谱图像分割方法研究. 遥感学报, 9(5): 596—603

焦李成,谭山,刘芳. 2005. 脊波理论: 从脊波变换到 Curvelet 变换. 工程数学学报: 22(5): 761—773

李德仁,周月琴,金为铄. 2003. 摄影测量与遥感概论. 北京: 测绘出版社

李晖晖,郭雷,刘航. 2007. 基于二代 curvelet变换的图像融合研究. 光学学报, 26(5): 657—662

王振飞,施保昌,王能超. 2007. 基于曲波变换的图像融合方法. 小型微型计算机系统, 28(3): 533—536

魏业真. 2006. 基于小波变换的遥感图像融合方法研究. 中国科技信息, 2: 62—63

Image fusion algorithm of the hyper-spectral remote sensing applying to the survey of land utilization based on a curvature-wave transformation

TIAN Yang-jun¹, XUE Chun-ji², MA Zhi-min¹, CAO Jian-nong¹

1. School of earth sciences and Land Resources Chang'an University, Shaanxi Xi'an 710054, China;

2. State Key Laboratory of geological processes and mineral Resources School of Earth Sciences and Resources China University of Geosciences Beijing 100083, China

Abstract In this paper, after several hundred times of comparing calculation of the hyper-spectral and Quickbird data in two land utilization survey areas. The Sym⁴ and Db² are determined to be the best wavelet function in the curvature-wave transformation at last. Two hyper-spectral remote-sensing image fusion algorithms, i.e., weighted method and selected method, are given based on the curvature-wave transformation. And then the more precise fusion images are provided. In one research area, the hyper-spectral remote-sensing fusion image is benefited for the land typing and image discrimination after the images to resolve son, ridge-wave transformation, some fusions and their inversion transformation of the hyper-spectral data. In the other research area, except for the curvature-wave transformation, the remote-sensing image matching of the hyper-spectral and the Quickbird data is finished by calculation of quadratic equation, and the fusion image of the curvature-wave transformation is better than that of wavelet transformation, and similar to the Brovey fusion image and slightly inferior of PCA fusion image after the appraising by observation, information entropy and relation analysis. It is suggested that the hyper-spectral remote-sensing image fusion algorithm can provide more precise information for the land utilization survey based on the curvature-wave transformation.

Key words curvature-wave transformation, wavelet transformation, hyper-spectral remote sensing, land utilization