

多分辨率金字塔算法的遥感影像融合对比分析

董张玉^①, 赵萍^②, 胡文亮^①, 刘珍^①

(^① 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 安徽 芜湖 241003;

^② 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 采用拉普拉斯、对比度、梯度以及形态学 4 种金字塔分解算法, 以区域特征选择为融合规则对 IKONOS 多光谱和全色波段影像进行融合, 从空间信息和光谱特征两个方面对融合结果进行对比分析, 探讨各种算法的遥感影像融合效果。实验结果表明: 基于形态学金字塔算法影像融合的空间信息增强和光谱特征保留效果最好; Laplacian 算法次之; 对比度和梯度算法效果最差。

关键词: 遥感影像融合; 金字塔算法; 多分辨率分解

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.01.017

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2011)113-0082-05

Comparison Analysis on the Fusion of Remote Sensing Images Based on Multi-resolution Pyramid Algorithms

DONG Zhang yu^①, ZHAO Ping^②, HU Wen liang^①, LIU Zhen^①

(^① College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003;

^② College of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: Taking regional features' selection as the fusion rules, the multi-spectral and panchromatic of IKONOS images are fused separately by Laplacian, Contrast, Gradient and Morphological Pyramid Algorithms. Then the fusion effects based on these four algorithms are analyzed comparatively from two aspects of spatial information and spectral features. The results show that: Image fusion based on morphological pyramid algorithm has the best effect in enhancing the spatial information and retaining the spectral characteristics, that based on Laplacian algorithm the second, and that based on Contrast and Gradient algorithm the worst.

Key words: remote sensing image fusion; pyramid algorithm; multi-resolution analysis

1 引言

遥感影像融合是指采用一定的复合模型结构, 将来自不同遥感影像所提供的信息进行多层次、多级别的处理产生出任何单一数据源无法得到的高质量影像信息, 同时使原始数据之间的冗余和矛盾进行互补, 降低其不确定性, 减少模糊度, 以增强影像中信息清晰度, 从而提高影像解译的精度、可靠性以及原始数据的使用率, 以形成对目标相对完整一

致的信息描述^[1-3]。

对多分辨率金字塔图像融合的研究, 最初始于 Burt 和 Adelson 提出的拉普拉斯金字塔算法^[4]。其原理是先将已空间配准的每幅图像用金字塔表示, 并将所有图像的金字塔在各相应层上以一定的融合规则进行融合得到合成的金字塔, 再将合成的金字塔用金字塔生成的逆过程重构图像, 得到处理后的融合影像^[5]。根据融合规则的不同可以分为: 拉普拉斯金字塔、对比度金字塔、梯度金字塔以及形

收稿日期: 2010-01-04 修订日期: 2010-01-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(40771207), 安徽省教育厅自然科学基金项目(KJ2007B219), 安徽省教育厅教学项目(2007JYXM208), 合肥工业大学博士学位专项资助基金和合肥工业大学科学研究发展基金(GDBJ2009-044)。

作者简介: 董张玉(1986-), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要研究方向为遥感数字影像处理、信息融合。

E-mail: dzyhh1988@126.com

态学金字塔等。陈浩^[6]、蒲恬^[7]、刘贵喜^[8]、赵鹏^[9]等分别采用上述 4 种方法对图片的融合进行了研究,证明了金字塔算法对图像融合的有效性,但不同算法的融合效果不同。当前,基于金字塔算法的遥感影像融合还不多,张大明^[10]等采用拉普拉斯算法对 SAR 与光学图像进行了融合;邹勤、贾永红^[5]用形态学金字塔算法实现了多光谱与全色影像的融合;刘卫光、周利华^[11]采用加权中值拉普拉斯塔形分解算法进行可见光与红外影像之间的融合,结果均表明:基于金字塔算法的影像融合在增强了原始影像的空间信息同时也保留了光谱信息,达到了影像融合的效果;不仅适合同种传感器不同分辨率影像的融合,而且适应不同传感器影像之间的融合,扩大了影像融合的应用范围;另外金字塔融合的算法简单,运行所需的时间和空间较小,易于编程实现。本文结合金字塔算法的优点,以 IKONOS 多光谱和全色波段为例,用 4 种金字塔算法分别进行融合实验,从空间信息增强和光谱特征保留两个方面来综合比较这些算法对遥感影像的融合效果,以便为遥感影像融合方法的选择提供依据。

2 基于金字塔算法的影像融合

2.1 金字塔算法原理

在构建以下 4 个金字塔分解之前需先建立一个在尺寸上逐层减半的一组图像序列,也称为高斯金字塔,原理如下^[12]:

$$G_l(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n) G_{l-1}(2i+m, 2j+n) \quad (1)$$

$0 < l \leq N$

其中, $G_l(i, j)$ 为第 l 层高斯金字塔图像, l 为分解层数, $w(m, n) = h(m)h(n)$ —— 5×5 的低通特性窗口函数, h 为高斯密度分布函数, i, j 为图像的行列数。

(1) 拉普拉斯金字塔

对上述 $G_l(i, j)$ 进行插值膨胀,使得第 l 层图像 $G_l(i, j)$ 膨胀后的尺寸与第 $l-1$ 层图像 $G_{l-1}(i, j)$ 尺寸相同,即^[13]:

$$G'_{l-1}(i, j) = 4 \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n) G_l[(i+m)/2, (j+n)/2] \quad (2)$$

而后对各层分别进行插值膨胀,得到一个膨胀序列,设 $G''_{l-1}(i, j)$ 为拉普拉斯金字塔第 l 层图像,则

$$G''_l = G_l - G'_{l-1}; G''_N = G_N \quad 0 < l \leq N \quad (3)$$

N 为金字塔分解的顶层层号; G'_l 为分解后第 l 层图像; G_N 为分解前顶层图像; G''_N 为分解后顶层图像。

(2) 对比度金字塔

插值膨胀得到的膨胀序列与拉普拉斯的原理相同,但其每一层图像为高斯金字塔中相邻两层的图像比率,也即^[14]

$$G'_l = G_l / G'_{l-1}; G''_N = G_N \quad 0 < l \leq N \quad (4)$$

重构过程为:

$$G''_l = G_l * G'_l; G_N = G''_N \quad 0 < l \leq N \quad (5)$$

(3) 梯度金字塔

对高斯金字塔中每层进行梯度算子运算,即获得了梯度金字塔图像分解:

$$D_{kl} = d_l * (G_L + w * G_k) \quad (6)$$

其中, D_{kl} 为第 k 层第 l 方向上梯度金字塔图像; G_k 为高斯金字塔的第 k 层图像, $*$ 为卷积运算, w 为 3×3 窗口, d_l 为第 l 方向的梯度算子,其定义为^[15]:

$$d_1 = [1, -1]; d_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$d_3 = [-1, 1]; d_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(4) 形态学金字塔

形态学金字塔是金字塔分解中唯一一个非线性算法。可描述为:在数学形态学中,连续地增加结构元素的尺寸或者连续地减小图像的尺寸时,越来越多的图像细节将被滤除掉,这样就得到了多分辨率形态学金字塔。产生形态学金字塔的步骤与高斯金字塔一样,即先对原图像进行滤波,再进行下采样,这样就得到塔的下一层。形态学滤波器是一系列的形态学算子,这些算子具有的一些性质和图像的形状有关。这些形态学算子是幂等和递增的。用 F 代表一个开-闭滤波器^[5, 16]:

$$F = (A \cdot f) \cdot f$$

式中: A 为要处理的图像; f 为结构元素。定义了形态学滤波器后,就可以构造形态学金字塔。令 $M10$ 代表塔的最底层,则形态学金字塔可以被定义为:

$$M1k = REDUCE(M1k-1) \quad 1 \leq k \leq n$$

式中: n 为塔的深度; k 为层数; $M1k$ 为形态学第 k 层信息; $REDUCE$ 为尺度减少算子,也即 $F(M1k-1) \downarrow 2$, 对上层图像进行下采样,对第 k 级图像的每两行、两列 4 像素灰度取平均值,作为第 $k+1$ 级图像对应像素的灰度,因此第 $k+1$ 级图像的

长和宽都是第 k 级图像的 $1/2$; 类似地, 可以构造差值形态学金字塔:

$$D1n = M1n$$

$$D1k = M1k - EXPAND(M1k+1)$$

$$k = n-1, n-2, \dots, 0 \quad (7)$$

$D1n, D1k$ 分别为差值形态学金字塔第 n, k 层, $1 \leq k \leq n-1$; $EXPAND$ 为放大算子, 是 $REDUCE$ 算子的逆运算。

可以把 $EXPAND$ 定义为对 $M1k+1$ 作插值再加上一个闭操作。金字塔的重构也很简单, 可表示为:

$$M1n = D1n; M1k = D1k + EXPAND(M1k+1)$$

$$k = n-1, n-2, \dots, 0 \quad (8)$$

2.2 影像融合流程

基于金字塔分解的融合算法基本思想为: 首先对每一幅源图像进行金字塔分解, 然后通过从原始图像金字塔选择系数来构成融合金字塔, 再将融合金字塔进行反变换即得到最终的融合影像。其中, 金字塔系数的选择(也即融合规则)是关键, 原始影像经过金字塔分解后产生了各自的低频和高频分量, 低频分量反映的是影像宏观信息, 特征之间的整体性较好, 因此低频系数之间的差异远小于高频系数^[17], 所以采用加权平均算子确定融合的低频系数; 高频分量显示了原图像的亮度突变信息(即图像边缘、区域边界、细节纹理特征等), 是影像融合的重要部分, 针对遥感影像的各像素间具有一定的关联性, 文中采用区域能量最大法确定融合的高频系数,

即先对两幅高频子图像进行区域能量运算, 得到各自对应位置的局部能量, 取能量相对较大值作为该区域中心点的像素值, 最终确定待融合的高频系数。综合空间信息和光谱信息的效果, 金字塔分解层数为 3 层, 融合流程如图 1 所示。

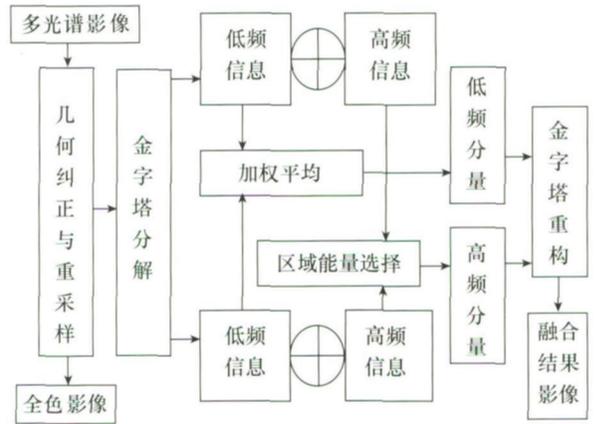


图 1 金字塔融合流程图

3 实验及结果分析

以 2003 年所获取的安徽省芜湖市 IKONOS 多光谱和全色波段影像为数据源, 影像中显示区域为安徽师范大学新校区的建成区, 大小为 565×663 , 其中, 多光谱波段是 432 标准假彩色合成的, 分辨率为 4m, 全色波段分辨率为 1m。原始 IKON OS 影像如图 2、3 所示。按照上述金字塔算法原理和融合步骤, 以 Matlab 为开发平台, 所获得的结果影像分别如图 4、5、6、7 所示。



图 2 1IKONOS 全色波段



图 3 IKONOS432 波段



图 4 对比度金字塔融合



图 5 梯度金字塔融合



图 6 Laplacian 金字塔融合



图 7 形态学金字塔融合

3.1 基于主观视觉效果分析

从主观判读来看,4种金字塔融合算法结果影像的空间分辨率与原始 IKONOS 多光谱影像相比均有较大提高,光谱扭曲程度较低,空间信息得到了有效的增强,学校教学楼、宿舍楼轮廓、道路边界的可视度相对于原始影像均有明显改善。相比较而言,基于形态学和 Laplacian 金字塔算法的融合结果影像效果更好,建筑物轮廓、道路边界的清晰度均要优于梯度和对比度金字塔算法,尤其是建筑物间间距更清晰,影像立体感强,视觉效果更好。

表1 融合效果定量评价指标参数值

		IKONOS 多光谱	IKONOS 全色	对比度 金字塔融合	梯度金字 塔融合	Laplacian 金字塔	形态学 金字塔融合
均值	Band1	42.67	62.44	119.31	109.36	130.36	126.10
	Band2	38.58	—	117.54	110.51	131.64	126.31
	Band3	45.27	—	121.45	105.25	132.78	128.15
方差	Band1	25.27	41.88	61.32	58.47	66.71	70.43
	Band2	24.86	—	62.59	57.62	67.26	69.85
	Band3	27.61	—	59.63	60.34	66.10	71.32
信息熵	Band1	6.41	5.59	7.54	7.63	7.81	7.92
	Band2	6.51	—	7.61	7.65	7.82	7.89
	Band3	6.56	—	7.42	7.59	7.79	7.91
扭曲度	Band1	—	—	9.81	8.51	6.25	3.17
	Band2	—	—	8.43	7.69	6.31	2.58
	Band3	—	—	7.62	8.14	5.42	3.01

根据表1中数据所示,可以获得以下评价结论:

(1)采用4种金字塔算法对 IKONOS 多光谱波段和全色波段进行融合,均获得了信息更丰富的融合结果影像,达到了影像增强的目的。

(2)均值反映的是影像的亮度信息,4种算法融合结果亮度信息均有明显改善,其中形态学和拉普拉斯金字塔分解算法均值更接近128,视觉效果最好,其次为对比度算法,梯度算法的效果最差。

(3)方差和信息熵则表明了影像的空间纹理信息,表中数据显示:4种算法都实现了信息增强,无论从方差还是信息熵来看,形态学金字塔影像融合的值最大,信息增强效果最好,其次为拉普拉斯算法,对比度和梯度算法效果较差。

(4)扭曲度则显示融合结果影像对原始影像光谱的改变程度,值越小,光谱保留越好。从表中数据可以看出,基于形态学金字塔算法的融合扭曲值最小,光谱信息保留效果最好;对比度效果最差。

综上所述,无论从亮度信息、空间纹理信息还是光谱信息角度来看,基于形态学金字塔的融合算法效果最好。

3.2 基于客观数理统计分析

为了更好地比较4种融合算法的效果,从亮度信息、光谱信息以及空间信息3个方面分别选择评价指标:均值、方差、信息熵以及扭曲度。其中,均值反映的是亮度信息,若均值适中,也即灰度值越接近128,则视觉效果越好^[18];方差和信息熵反映影像空间纹理信息,其值越大,说明影像的空间信息越丰富^[19];扭曲度则表示融合前后影像的光谱扭曲程度^[20]。各指标的统计参数如表1所示。

4 结束语

本文采用对比度、梯度、拉普拉斯以及形态学金字塔算法对 IKONOS 多光谱和全色波段影像进行融合实验和比较分析,探索4种算法对遥感影像的融合效果,结果表明:由于金字塔分解算法的多尺度分析特征,能进一步细化影像的细节信息,因此取得了很好的融合效果。其中,基于形态学算法因其膨胀、腐蚀原理有利于线性地物的提取,将其应用到影像融合领域,无论从光谱信息还是空间信息来看,其融合效果最好,优于其他金字塔分解算法;Laplacian 算法次之;对比度和梯度算法效果最差。金字塔系数的选择是融合的关键,为了表现空间信息增强特性,文中仅仅采用区域能量选择的方法来确定融合高频系数,结合其他特性采用更高效的融合规则来确定金字塔系数还有待进一步探索。从图像处理的发展趋势来看,将形态学原理结合小波、神经网络等算法应用到影像融合领域,从而获得融合技术更完善的新方法,是未来影像融合的一个重要发展方向。

参考文献

- [1] 赵书河, 张新明, 曲鸿建. 多光谱遥感影像与高分辨率全色影像融合研究[J]. 测绘信息与工程, 2004, 29(5): 4- 5.
- [2] 孙家柄, 刘继琳, 李军. 多源遥感影像融合[J]. 遥感学报, 1998, 2(1): 47- 49.
- [3] 范文婷, 傅平. 一种基于小波变换的遥感图像融合方法[J]. 国土资源遥感, 2008(3): 24- 26.
- [4] BURT. P. J, ADELSON. E. H. The Laplacian pyramid as a compact image code [J]. IEEE Trans on Communications, 1983, 31(4): 532- 540.
- [5] 邹勤, 贾永红. 一种基于形态金字塔的图像融合方法及其性能评价[J]. 武汉大学学报. 信息科学版, 2006, 31(11): 971- 973.
- [6] 陈浩, 王延杰. 基于拉普拉斯金字塔变换的图像融合算法研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(4): 439- 442.
- [7] 蒲恬, 倪国强. 基于对比度的多分辨图像融合[J]. 电子学报, 2000, 28(12): 116- 118.
- [8] 刘贵喜, 赵曙光, 杨万海. 基于梯度塔形分解的多传感器图像融合[J]. 光电子激光, 2001, 12(3): 293- 296.
- [9] 赵鹏, 浦昭邦. 基于形态学 4 子带分解金字塔的图像融合[J]. 光学学报, 2007, 27(1): 40- 44.
- [10] 张大明等. 基于金字塔方法的 SAR 图像与光学图像的融合[J]. 雷达科学与技术, 2005, 3(6): 350- 353.
- [11] 刘卫光, 周利华. 一种塔形分解的红外与可见光图像融合方法[J]. 红外技术, 2004, 26(4): 31- 35.
- [12] 朱瑞辉, 万敏, 范国滨. 基于金字塔变换的图像融合方法[J]. 计算机仿真, 2007, 24(12): 178- 120.
- [13] Burt P J, Adelson E H. The laplacian pyramid a compact image code[J]. IEEE Trans. on Commun, 1998(COM- 3): 532- 540.
- [14] Toet A. Multiscale contrast enhancement with applications to image fusion[J]. Optical Engineering, 1992, 31(5): 1026- 1031.
- [15] V. S. Petrovic, C. S. Xydeas. Gradient-based multi resolution image fusion [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2004, 13(2): 228- 237.
- [16] Toet A. A morphological pyramid image decomposition [J]. Pattern Recognition Letters, 1989, 9(4): 255- 261.
- [17] 曾基兵. 基于多分辨率分析的多源图像融合方法研究[D]. 电子科技大学, 2008: 8- 14.
- [18] 徐佳, 关泽群, 何秀凤. 基于传感器光谱特性的全色与多光谱图像融合[J]. 遥感学报, 2009, 13(1): 97- 102.
- [19] Petrovic Vladimir. Subjective tests for image fusion evaluation and objective metric validation[J]. Information Fusion, 2005: 208- 217.
- [20] 林卉, 景海涛, 张连蓬. 小波变换与 PCA 变换相结合遥感影像融合分析[J]. 地球信息科学, 2008, 10(2): 269- 271.

(上接第 26 页)

- [4] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [5] 李小文, Strahler A, 朱启疆, 等. 地物二向性反射几何光学模型和观测的进展[J]. 国土资源遥感, 1991(1): 9- 19.
- [6] 李小文, 王锦地. 植被光学遥感模型和植被结构参数化[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [7] LI X, STRAHLER A. Geometric optical modeling of a conifer forest canopy [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985(23): 705- 720.
- [8] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model [J]. Remote Sensing of Environment, 1984, 16(2): 125- 141.
- [9] Kuusk, A. The hot spot effect in plant canopy reflectance[C]// Phot or vegetation Interactions. Applications in Optical Remote Sensing and Plant Ecology. Berlin: Springer Verlag, 1991: 1555- 1557.
- [10] Huemmrich, K. F. The GeoSail model: A simple addition to the SAIL model to describe discontinuous canopy reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 75(3): 423- 431.
- [11] 陈晓玲, 赵红梅, 田里乔. 环境遥感模型与应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008.
- [12] Bacour C, Jacquemoud S, Tourbier Y, et al. Design and analysis of numerical experiments to compare four canopy reflectance models [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(1): 72- 83.
- [13] Danson, F. M. Teaching the physical principles of vegetation canopy reflectance using the SAIL model [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1998, 64(8): 801- 812.
- [14] 王锦地, 张立新, 柳钦火, 等. 中国典型地物波谱知识库[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [15] 李小文, 高峰, 王锦地, 等. 二向性归一化植被指数: 概念及应用[J]. 自然科学进展, 2001(8): 819- 823.
- [16] Jupp D. L. B, Strahler A. H. A hotspot model for leaf canopies[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 38(3): 193- 210.