

# 基于 $I\alpha\beta$ 色彩空间和 Contourlet 变换相结合的融合方法 \*

胡顺石<sup>1</sup>, 丁琳<sup>2</sup>, 秦建新<sup>1</sup>, 倪希亮<sup>3</sup>

(1. 湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410001; 2. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 3. 山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266510)

**摘要:** 针对北京 1 号小卫星的多光谱与全色波段的分辨率比率较大, 传统的融合方法会产生边界模糊和光谱扭曲现象, 提出了一种新的融合算法。首先对多光谱与全色影像分别进行  $I\alpha\beta$  和 Contourlet 变换; 然后在频率域中采用不同的融合策略进行处理; 最后进行 Contourlet 和  $I\alpha\beta$  逆变换, 得到融合图像。实验表明, 本方法既提高了融合图像的空间细节信息又很好地保持了图像的光谱特征, 优于传统的融合方法。

**关键词:** 图像融合; 北京 1 号小卫星;  $I\alpha\beta$  色彩空间; Contourlet 变换

**中图分类号:** TP391      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2010)04-1521-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.04.089

## Image fusion technique based on combination of $I\alpha\beta$ color space and Contourlet transform

HU Shun-shi<sup>1</sup>, DING Lin<sup>2</sup>, QIN Jian-xin<sup>1</sup>, NI Xi-liang<sup>3</sup>

(1. College of Resource & Environment Science, Hunan Normal University, Changsha 410001, China; 2. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Geomatics College, Shandong University of Science & Technology, Qingdao Shandong 266510, China)

**Abstract:** With the relatively higher resolution ratio of panchromatic and multispectral images of Beijing-1 Satellite, blurred boundaries and spectral distortion always occur when they are fused employing traditional fusion approaches. To resolve this problem, proposed a new fusion technique. Firstly, transformed multispectral and panchromatic images by  $I\alpha\beta$  and contourlet, and then processed with different fusion schemes in frequency domain. Finally, through inverse  $I\alpha\beta$  and contourlet transforms, worked out the fused image. The test results indicate that this fusion approach enhances the spatial detail information of the fused image and preserves the spectral characteristics of original image, which is better than traditional fused methods.

**Key words:** image fusion; Beijing-1 satellite;  $I\alpha\beta$  color space; Contourlet transform

北京 1 号小卫星于 2005 年 10 月 27 日成功发射并正常运行以来, 为人们提供了丰富的多光谱和全色遥感影像产品, 并且已经在土地利用现状调查及地形图更新、农作物种植面积遥感监测和估产等应用领域取得成功的应用示范成果。为了充分地利用北京 1 号小卫星的遥感影像数据, 使之应用到更多的实际生产、生活中, 将多光谱与全色波段进行融合得到分辨率更高、质量更好的多光谱图像也就成了一种必然的趋势。

现行的融合方法有很多, 概括起来有以下五种<sup>[1]</sup>: a) 基于变换域的融合方法, 如 IHS、PCA 等方法; b) 基于算术运算的融合方法, 即对各波段进行加减乘除运算; c) 基于空间滤波的融合方法, 如 HPF 等方法; d) 基于不同波段间相关关系的融合方法; e) 基于多尺度、分辨率分析的融合方法, 如金字塔分解融合方法、Contourlet 变换融合方法、小波分析融合方法等。其中, IHS 变换由于方便、灵活, 能够有效地得到空间明度信息而应用广泛; 由于多分辨率分析方法能够有效地将输入图像分解为代表图像近似信息的低频分量系数和代表图像细节、边缘信

息的高频分量系数, 并对这些系数进行有效处理得到质量更高的融合图像, 也得到了广泛的应用。但经由 IHS 变换直接替换 I 分量得到的融合图像的光谱信息损失较大、光谱扭曲严重, 而  $I\alpha\beta$  色彩空间最小化了彩色空间三个轴之间的相关性, 使得改变 I 分量的值对其他分量的影响降到最小<sup>[2,3]</sup>。而多尺度多分辨率分析中的 Contourlet 变换由于能够以最少的系数来逼近奇异曲线, 表征边缘特征, 已被广泛地应用到图像融合中<sup>[4~8]</sup>。

本文结合  $I\alpha\beta$  色彩空间与 Contourlet 变换的优点, 提出了基于  $I\alpha\beta$  色彩空间和 Contourlet 多尺度分析变换相结合的融合方法。该算法对北京 1 号小卫星的数据多光谱与全色波段的融合取得了较为满意的结果。

### 1 $I\alpha\beta$ 变换和 Contourlet 变换原理

#### 1.1 $I\alpha\beta$ 变换

在  $I\alpha\beta$  彩色空间中, I 表示非彩色的亮度信号通道,  $\alpha$  彩色

**收稿日期:** 2009-08-13; **修回日期:** 2009-09-28      **基金项目:** 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB714406); 国家科技支撑计划项目(2007BAH15B01); 国家航天局航天遥感论证中心(07K00110KJ)

**作者简介:** 胡顺石(1984-), 男, 湖南永州人, 硕士研究生, 主要研究方向为遥感数字图像处理、地理信息系统应用(hufrank@163.com); 丁琳(1970-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为遥感数字图像处理; 秦建新(1969-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为地理信息系统与遥感应用; 倪希亮(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究领域为遥感数字图像处理。

通道表示“黄—蓝对抗通道”， $\beta$  彩色通道表示“红—绿对抗通道”。从 RGB 到  $\text{I}\alpha\beta$  彩色空间的转换步骤如下<sup>[2,3,9]</sup>：

a) 将图像从 RGB 空间转换到 XYZ 空间，再从 XYZ 空间转换到 LMS 空间。这是个线变换过程，可由式(1)表示。

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3811 & 0.5783 & 0.0402 \\ 0.1967 & 0.7244 & 0.0782 \\ 0.0241 & 0.1288 & 0.8444 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于在 LMS 空间中，图像数据缺乏对称性，为了减弱这种不对称性，采用了如下的对数变换：

$$L_1 = \log_{10} L, M_1 = \log_{10} M, S_1 = \log_{10} S \quad (2)$$

b) 为了使三个彩色轴之间的相关性降到最小，可采用主成分分析方法，得到如下的变换矩阵：

$$\begin{bmatrix} I \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{6} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ M_1 \\ S_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

至此，RGB 空间就成功地转换到了  $\text{I}\alpha\beta$  空间。根据式(1)~(3)，也可以得到一幅图像从  $\text{I}\alpha\beta$  彩色空间逆变换到 RGB 彩色空间方法，如式(4)~(6)所示。

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ M_1 \\ S_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & -2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{6} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$L = 10^{L_1}, M = 10^{M_1}, S = 10^{S_1} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.4679 & -3.5873 & 0.1193 \\ -1.2186 & 2.3809 & -0.1624 \\ 0.0497 & -0.2439 & 1.2045 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 1.2 Contourlet 变换

Contourlet 变换是 Do 等人在 2002 年提出的一种多分辨率、局部的、有方向的二维图像表示方法。其基的支撑区间具有随分解尺度变化而长宽比变化的长条形结构。该变换将多尺度分析和方向分析分开进行，对细小的、有方向的轮廓和线段的表达有着独特的优势<sup>[4-8]</sup>。

Do 等人<sup>[4]</sup>提出的 Contourlet 分解变换可以分为两个步骤，即拉普拉斯金字塔(Laplacian pyramid, LP)分解和方向滤波器组(directional filter bank, DFB)滤波。拉普拉斯变换对图像进行多尺度分解以捕获奇异点，由此得到一系列的带通及下采样影像。每次 LP 分解产生一个低频子带和一个高频子带，对低频子带可以继续迭代分解以获得低频和高频子带；对高频子带采用方向滤波器组进行方向滤波，将分布在同方向上的奇异点合成为一个系数，这就获得了不同的方向子带。例如，对于一幅输入图像  $A_0$ ，LP 输出为  $J$  个带通图像  $B_j (j=1, 2, \dots, J)$  以及一个低通图像  $A_j$  对每一个带通图像  $B_j$  进一步被  $l_j$  级 DFB 分解为  $2^{l_j}$  个方向带通图像  $C_{j,k}^{(l_j)} (k=0, 1, \dots, 2^{l_j}-1)$ 。如图 1 所示，将一个带通图像进行三级 DFB 分解成  $2^3$  个方向带通图像；图 2 则是 Contourlet 分解示意图。

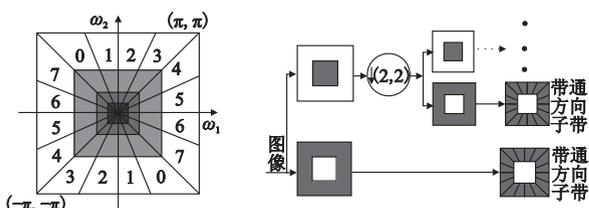


图1 Contourlet频率分解示意图 图2 Contourlet分解示意图

## 2 基于 $\text{I}\alpha\beta$ 彩色空间和 Contourlet 变换的融合方法

### 2.1 融合模型

根据以往的文献中提出的融合规则模型<sup>[5-8,10]</sup>，可将其大致分为三类，即基于单点像素的融合规则、基于局部区域特征的融合规则和基于图像全局特征(感兴趣区域或目标)的融合规则。经 Contourlet 分解变换后的低频系数代表了图像的近似部分，它们之间的差别不是很大，因此，对于低频系数，本文选择算术平均法进行处理；高频系数代表了图像的细节信息，包含了图像的重要信息，而基于局部区域特征的融合规则考虑到了像素点局部区域信息，能够更好地表现图像特征，所以，对于变换后的高频系数，本文选择了基于匹配度的局部区域能量的融合模型。

(1) 分别计算两幅图像对应方向、对应分辨率上局部区域的能量  $E_{j,k,\varepsilon}^{(l_j)}$ 、 $E_{j,k,B}^{(l_j)}$ ：

$$E_{j,k,\varepsilon}^{(l_j)}(x, y) = \sum_{n \in L, m \in K} w^{(l_j)}(n, m) [C_{j,k,\varepsilon}^{(l_j)}(x+n, y+m)]^2, \quad \varepsilon = A, B \quad (7)$$

其中： $C_{j,k,\varepsilon}^{(l_j)}(x, y)$  表示图像  $\varepsilon(A, B)$  在第  $j$  个带通图像中被  $l_j$  级 DFB 分解的第  $k (k=1, 2, \dots, 2^{l_j}-1)$  方向的高频系数； $w^{(l_j)}(n, m)$  为与  $C_{j,k,\varepsilon}^{(l_j)}(x, y)$  对应的权重系数； $l_j$  为第  $j$  个带通图像被 DFB 滤波的级数； $L, K$  表示局部区域的大小(如  $3 \times 3$  或  $5 \times 5$  等)； $n, m$  的变化范围在  $L, K$  内。

(2) 计算两幅图像对应方向、对应分辨率上局部区域的匹配度  $M_{j,AB}^{(l_j)}$

$$M_{j,AB}^{(l_j)}(x, y) = \frac{2 \sum_{n \in L, m \in K} w^{(l_j)}(n, m) C_{j,k,A}^{(l_j)}(x+n, y+m) C_{j,k,B}^{(l_j)}(x+n, y+m)}{E_{j,k,A}^{(l_j)}(x, y) + E_{j,k,B}^{(l_j)}(x, y)} \quad (8)$$

(3) 确定融合系数

选定一匹配度阈值  $T$  (一般取  $0.5 \sim 1$ )，若  $M_{j,AB}^{(l_j)} < T$ ，则

$$\begin{cases} C_{j,k,F}^{(l_j)}(x, y) = C_{j,k,A}^{(l_j)}(x, y) & E_{j,k,A}^{(l_j)} \geq E_{j,k,B}^{(l_j)} \\ C_{j,k,F}^{(l_j)}(x, y) = C_{j,k,B}^{(l_j)}(x, y) & E_{j,k,A}^{(l_j)} < E_{j,k,B}^{(l_j)} \end{cases} \quad (9)$$

若  $M_{j,AB}^{(l_j)} \geq T$ ，则

$$\begin{cases} C_{j,k,F}^{(l_j)}(x, y) = W_{j,k,\max}^{(l_j)}(x, y) C_{j,k,A}^{(l_j)}(x, y) + \\ W_{j,k,\min}^{(l_j)}(x, y) C_{j,k,B}^{(l_j)}(x, y) & E_{j,k,A}^{(l_j)} \geq E_{j,k,B}^{(l_j)} \\ C_{j,k,F}^{(l_j)}(x, y) = W_{j,k,\min}^{(l_j)}(x, y) C_{j,k,A}^{(l_j)}(x, y) + \\ W_{j,k,\max}^{(l_j)}(x, y) C_{j,k,B}^{(l_j)}(x, y) & E_{j,k,A}^{(l_j)} < E_{j,k,B}^{(l_j)} \end{cases} \quad (10)$$

其中权重系数由下式获得：

$$\begin{cases} W_{j,k,\min}^{(l_j)}(x, y) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left[ \frac{1 - M_{j,k,AB}^{(l_j)}(x, y)}{1 - T} \right] \\ W_{j,k,\max}^{(l_j)}(x, y) = 1 - W_{j,k,\min}^{(l_j)}(x, y) \end{cases} \quad (11)$$

### 2.2 融合算法流程

首先，对全色影像和多光谱影像进行精确几何配准、辐射矫正等预处理，并将多光谱影像进行重采样，使重采样后图像的空间分辨率与全色影像一致；然后，对多光谱影像和全色影像分别进行  $\text{I}\alpha\beta$  变换和 Contourlet 变换；最后，采用 2.1 节中的融合模型进行融合。具体步骤如下：

a) 对多光谱影像、全色影像分别进行  $\text{I}\alpha\beta$  变换，得到  $I_{\text{multi}}$ 、 $\alpha_{\text{multi}}$ 、 $\beta_{\text{multi}}$  三个分量，将全色波段组合成 RGB 图像(每个通道都保持全色波段的值)，然后对其进行  $\text{I}\alpha\beta$  变换，得到  $I_{\text{pan}}$ 、 $\alpha_{\text{pan}}$ 、 $\beta_{\text{pan}}$  三个分量。

b) 分别对  $I_{multi}$ 、 $I_{pan}$  进行 Contourlet 变换,得到低频分量系数  $C_{multi}^L$ 、 $C_{pan}^L$  和 高频分量系数  $C_{j,k,multi}^{(l)}$ 、 $C_{j,k,pan}^{(l)}$ 。根据 2.1 节中提出的融合规则,融合后的低频系数取算术平均值,即  $C_{fused}^L = (C_{multi}^L + C_{pan}^L)/2$ ;融合后的高频系数按基于匹配度的区域能量法则进行选取,最终得到融合后的高频系数  $C_{j,k,fused}^{(l)}$ 。

c) 将 b) 中得到的低频分量系数  $C_{fused}^L$ 、高频分量系数  $C_{j,k,fused}^{(l)}$  进行 Contourlet 逆变换,得到融合后的  $I_{fused}$  分量。

将  $I_{fused}$ 、 $\alpha_{multi}$ 、 $\beta_{multi}$  三个分量从 Iαβ 彩色空间变换到 RGB 彩色空间。这样就得到了融合后的图像。

### 3 实验结果与分析

本文采用北京 1 号小卫星的北京市某郊区的影像数据进行实验。北京 1 号小卫星的多光谱数据的分辨率为 32 m,全色波段数据的分辨率为 4 m。波长范围分别为:绿波段(523 ~ 605 nm)、红波段(630 ~ 690 nm)、近红外(774 ~ 900 nm);全色波段(500 ~ 800 nm)。

首先,将影像数据进行预处理,包括辐射校正、精确几何配准、调色等工作,并把 32 m 多光谱图像重采样到 4 m,使其分辨率与 4 m 全色波段相同;然后,裁剪出一块 512 × 512 像素大小的图像如图 3、4 所示进行实验。

在融合实验中,设置匹配度阈值为  $I_{multi}$  与  $I_{pan}$  之间的相关系数,权重矩阵取  $w = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$ ,然后按本文提出的融合算法与

融合规则进行融合。为了比较本文提出的融合方法,本文还用其他的方法对图像进行融合实验:传统的 IHS 融合方法、IHS + Contourlet 融合方法、PCA 融合方法。最终的融合结果如图 5 ~ 9 所示。

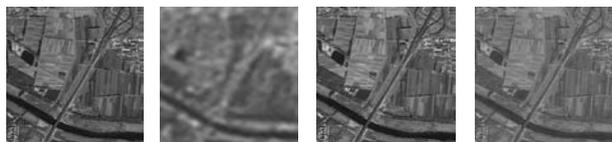


图3 北京1号小卫星全色波段图像 图4 北京1号小卫星多光谱图像 图5 传统IHS融合图像 图6 改进的IHS融合图像



图7 IHS+Contourlet 变换融合图像 图8 PCA融合图像 图9 本文方法融合图像

从实验结果图中可以看出所有融合方法均在不同程度上提高了融合图像的质量,但本文提出的融合方法在提高影像的空间分辨率和保持原始影像光谱特征方面有更好的表现。在所有融合结果中,传统的 IHS 融合方法虽然提高了影像的分辨率,但却损失了较多的光谱信息,这不太符合影像融合的目的与要求;基于改进的 IHS 融合方法,较传统方法在光谱保持方面有了很大的提高,但融合后的影像却显得有点模糊不清,色彩饱和度不够;IHS + Contourlet 变换融合方法既提高了影像的分辨率,使不同地物之间的界线清晰明了,又在很大程度上保持了多光谱数据的光谱特征,但由于北京 1 号小卫星的多光谱与全色波段之间的比率相差太大(达 8:1),导致水域与陆地边界处出现了混合现象;PCA 融合方法在一定程度上保持了多光谱数据的光谱特征,但融合后图像清晰度较其他方法有所下降,而且在水域与陆地边界的混合现象也显得非常突出。

除了从视觉方面评价外,为了更好地评价融合结果,本文还从熵、清晰度、光谱扭曲度、偏差指数四个方面对融合结果进行了定量计算,得到的评价结果如表 1 所示。

表1 实验结果客观评价比较表

融合方法	波段	熵	清晰度	光谱扭曲度	偏差指数
传统IHS	R	7.182 3	3.220 7	24.649 3	0.395 9
	G	7.185 7	3.220 6	2.863 7	0.007 2
	B	7.008 9	3.209 8	10.452 5	0.182 2
改进的IHS	R	6.645 3	2.672 6	8.773 5	0.087 7
	G	6.912 8	2.687 6	8.667 4	0.010 1
	B	6.642 1	2.659 1	9.020 2	0.122 2
IHS+Contourlet	R	7.130 8	3.238 1	9.131 3	0.090 8
	G	7.326 4	3.259 7	9.123 4	0.017 2
	B	7.089 4	3.234 1	9.128 4	0.122 4
PCA	R	6.772 2	2.755 2	13.285 0	0.196 0
	G	6.958 1	2.408 2	6.892 0	0.001 2
	B	6.742 2	2.765 7	13.259 8	0.258 7
本文方法	R	7.124 0	3.063 2	8.220 3	0.049 7
	G	7.510 6	3.687 1	13.980 0	0.047 4
	B	7.024 8	2.892 3	7.701 0	0.055 6

从实验结果评价表中可以看出,相对于 IHS + Contourlet、改进的 IHS、传统的 IHS、PCA 方法,本文提出的融合方法能够从源图像中提取更多的有用信息并注入到融合图像中,在很大程度上保持了原始多光谱的光谱数据特征,得到更高性能的融合图像。

### 4 结束语

Iαβ 彩色空间最小化了三个彩色轴之间的相关性,各个分量相对独立,这在光谱保真度方面有着独特的优势;Contourlet 变换具有多尺度、良好的空域和频域局部特性以及多方向性,能够很好地捕捉二维几何图像的特征与细节信息,是提高融合图像质量与增加图像细节信息的有效方法。在融合规则上采用了基于匹配度的局部区域能量法则,考虑了单个像素的区域相关性,使得融合的高频系数更加有效地反映地面实际情况。与其他多光谱和全色波段之间的融合不同的是,北京 1 号小卫星的多光谱数据与全色波段数据分辨率的比率较大。基于以上事实,本文提出了基于 Iαβ 彩色空间和 Contourlet 变换相结合的融合方法。实验结果表明,本文提出的融合方法从多光谱和全色影像中获得了更多的有效信息,得到了具有更好视觉效果和更优化指标的融合图像。

#### 参考文献:

- [1] SIDDQUI Y. The modified IHS method for fusing satellite imagery [C]// Proc of the ASPRS 2003 Annual Conference Proceedings. Anchorage: [s. n.], 2003: 1-10.
- [2] 黄伟,敬忠良,李建勋,等. 基于 Iαβ 空间的多光谱和全色图像融合[J]. 计算机工程,2006,32(11): 22-23.
- [3] 韩耀东,狄红卫. 基于 Iαβ 色彩空间非线性变换的彩色图像边缘检测[J]. 光学技术,2004,30(6): 685-686.
- [4] DO M N, VETTERLI M. The Contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2005, 14(12): 2091-2105.
- [5] 苗启广, 王宝树. 基于 Contourlet 的图像融合新方法[J]. 计算机科学, 2008, 35(5): 231-235.
- [6] 易文娟, 郝梅, 蒋刚毅. Contourlet 一种有效的方向多尺度变换分析方法[J]. 计算机应用研究, 2006, 23(9): 18-22.
- [7] 李光鑫, 王珂. 基于 Contourlet 变换的彩色图像融合算法[J]. 电子学报, 2007, 35(1): 112-117.
- [8] 陈蜜, 李德仁, 秦前清, 等. 基于 Contourlet 变换的遥感影像融合算法[J]. 小型微型计算机系统, 2006, 27(11): 2052-2055.
- [9] RUDERMAN D L, CRONIN T W, CHIAO C C. Statistics of cone responses to natural images: Implications for visual coding[J]. Journal of the Optical Society of America, 1998, 15(8): 2036-2045.
- [10] 郭雷, 李晖晖, 鲍永生. 图像融合[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 121-123.