

遥感数据像素级融合统一模型及实现技术

杨景辉 张继贤 李海涛

(中国测绘科学研究院摄影测量与遥感研究所, 北京 100039)

摘要 研究遥感数据像素级融合统一模型及相应的实现技术具有重要的理论和应用价值。根据遥感数据成像机理和多光谱影像理想融合增强结果提出了遥感数据融合算法统一模型,该模型通过数学表达式的方式清晰地反映了参与融合的多光谱影像、从高分辨率全色影像提取的空间细节信息和采取的融合策略三者之间的运算关系,将三类典型融合算法推导成本文提出的统一模型;提出了基于统一模型的实现技术,该实现技术舍去对融合结果没有影响的计算步骤,只计算影响最终融合结果所需的参量,并列出常用融合算法实现过程中两个重要参量的求法。通过分析比较,本文的统一模型概括更全面、适用性更广;通过分析实现步骤和比较实验结果,证明了基于统一模型的实现技术具有减少运算量的优越性,且具有普遍适用性,能应用于已提出的大部分遥感数据融合算法,有助于遥感数据融合技术的应用推广。

关键词 遥感数据 像素级融合 统一模型 实现技术

中图分类号: TP751.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2009)04-0604-11

Generalized Model for Remotely Sensed Data Pixel-level Fusion and its Implementation Technology

YANG Jing-hui, ZHANG Ji-xian, LI Hai-tao

(Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039)

Abstract The generalized model characterizing most remotely sensed data pixel-level fusion techniques is very important for theory analysis and application. According to the imaging mechanism and the ideal pan-sharpening results of multi-spectral image, a generalized model for remote sensing data fusion is presented, which can clearly describe the mathematical relationship among original multi-spectral image, the spatial details extracted from high-resolution panchromatic image, and the adopted fusion strategy. Also three types of fusion algorithm are translated into the generalized model using mathematical expression. The implementation technology based on the generalized model is developed, which only calculates the variables affecting the fusion results instead of all variables. Then these calculation methods of the two key variables are listed for most common pixel-level fusion algorithms. Compared to other models, the generalized model is comprehensive and adaptive. Analyzing implementation steps and comparing with the regular fusion results, the implementation technology which can be applied to most fusion algorithms can reduce computation complexity and save calculation time, which is helpful to promote application of remote sensing data fusion.

Keywords remotely sensed data, pixel-level fusion, generalized model, implementation technology

1 引言

到目前为止,已经提出了许多针对遥感影像的

像素级融合方法^[1-30],其主要特征是通过高分辨率的全色影像来增强与其对应的多光谱影像的空间细节信息。因此,遥感影像数据融合的主要矛盾就集

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)基金项目(2006CB701303);国家高技术研究发展计划(863)基金项目(2007AA12Z151);工艺类科研院所基本科研业务费项目(77732)

收稿日期:2007-07-16;**改回日期**:2008-01-22

第一作者简介:杨景辉(1980~),男,助理研究员。主要研究方向为多源遥感数据融合、遥感数据高性能处理、信息提取。

E-mail:jhyang@casm.ac.cn

中,在最小损失多光谱影像光谱特征的情况下,最大限度地增强其空间细节信息。在多光谱和全色影像相关性不高的情况下,保持光谱信息和增强空间细节信息往往是相互制约的一对矛盾,因此融合算法的选择往往是根据具体的应用来决定侧重光谱特征还是空间细节特征。如果同一时相和遥感平台获取的全色与多光谱影像数据之间具有高度相关性,应用这样的数据进行融合操作能达到较好的融合结果,SPOT 5 和 IKONOS 卫星各自获取的多光谱与全色就是例子。典型的遥感影像数据融合算法一般可分为三大类^[31]:基于变量替换技术融合方法^[1-2,8-10,32]、基于调制融合方法^[11-12,31-36]、基于多尺度分析的融合方法^[14-30,37-41]。基于变量替换技术融合方法典型的代表算法有 IHS 变换融合算法^[1-2,42]、PCA 变换融合算法^[9]、LCM (local correlation modeling)算法^[10]和回归变量替换算法(RVS)^[9];基于调制技术的融合算法主要包括 Brovey 变换融合算法^[33]、SFIM (smoothing filter based intensity moulouation)融合算法^[11]和高通调制融合算法^[32];基于多尺度融合算法主要应用多尺度分析技术如小波分解技术^[14-29]、Laplacian 金字塔分解技术^[30,40-41]对参与融合的多光谱与全色影像进行不同尺度的分解,根据多光谱与全色影像在粗糙尺度之间的关系,推导多光谱影像精细尺度应注入的空间细节信息^[19-20,30,41,43],从而达到增强空间细节信息的目的,典型的基于多尺度融合算法有应用移不变性和非截取小波分解技术的 Atrous 小波融合算法^[22-24],和基于 Laplacian 金字塔融合算法^[30,40-41]。另外一些研究人员提出了小波分解和分量替换相结合的融合算法,如结合小波分解和 PCA 变换融合算法^[27],结合小波分解和 IHS 变换融合算法^[27-29]。近年来,一些研究人员,结合以上三大类融合算法,提出了利用传感器光谱响应函数和地物光谱信息的融合技术^[44-47],还有一些研究者应用正则化的方法对融合结果进行迭代^[48-49],以期满足融合结果应达到的条件。

研究人员在研究各种融合算法的时候,都忽略了两个问题。一是到目前为止提出的各种融合算法能否用统一的数学模型来描述^[50-51],能否通过一个简单的数学公式反映融合过程中的主要特征。统一理论模型的建立将有助于根据融合应用指导融合算法的设计和进行相关理论分析,有利于从不同方面定性和定量分析各种融合技术,最

主要的一点是统一理论模型的建立将揭示不同的融合技术只是数学模型中计算参量的方法不同。另一个被忽略的问题是不同的融合算法的计算复杂程度不同,有的算法运算量非常巨大,但其具有统一理论模型,能否研究出适合各种融合算法的实现技术^[45-46]。与 Wang 的工作^[51]相比,本文的工作主要集中在两个方面。一是提出了遥感数据像素级融合统一理论模型,该统一理论模型具有更广泛的适用性,把各种常用遥感数据融合算法推导成统一的数学模型;二是根据统一理论模型研究出适用于各个常见融合算法的实现技术,该实现技术只计算最终融合结果需要用到的参量,舍去对融合结果没有影响的计算步骤,节省了运算时间,使原来一些融合效果较好却因为计算量大而阻碍其推广的算法的应用成为可能。

2 统一理论模型

2.1 遥感数据融合的物理机理

至少有两个方面的限制,需要用到遥感数据融合技术,一是多光谱波段光谱范围窄,单个波段范围接受到的能量受到限制,所以 GIFOV (ground projected instantaneous field of view)^[52]的取值必须更大,因此要在较窄的光谱范围内取得更小的 GIFOV,需要用到数据融合技术提高多光谱波段的空间细节信息;二是传输能力受到限制,如果多光谱波段 GIFOV 取值更小,所得像素个数成倍增加,数据量巨大,需要更强的数据传输能力,目前的遥感系统传输能力无法达到要求,而接受数据量相对较少的多光谱波段之后再通过与高分辨率的全色波段融合能较大程度地解决这个问题。

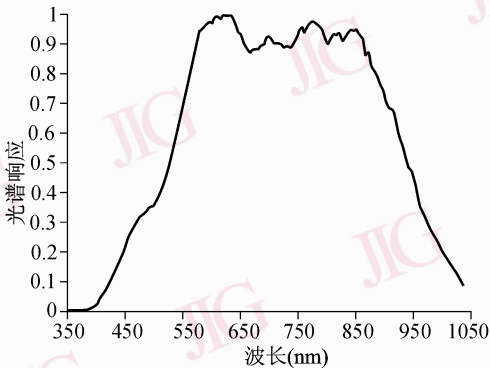
进入遥感传感器的辐射包括 3 个部分^[52],其分别为无散射地表反射、来自散射光的地表反射和路径散射。虽然包括以上 3 个部分能量,但进入整个全色和整个多光谱遥感传感器的能量是一致的。全色和多光谱传感器因为光谱范围(表 1)、传感器光谱响应和对应的 GIFOV 不一致,导致每个感光单元接受的辐射能量不同。

图 1 显示了 IKONOS 全色和多光谱波段光谱响应曲线^[53],从图中可以看出,IKONOS 全色传感器光谱覆盖了多光谱的 4 个波段,并且在各多光谱传感器之间有部分光谱重叠。归一化光谱响应曲线大致呈峰形,图中能清晰地反映出光谱波长与归一化

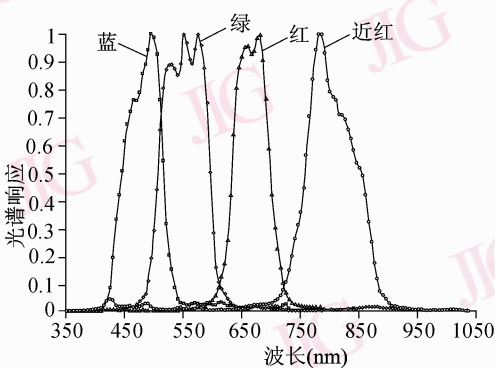
表 1 光学传感器全色和多光谱波段光谱范围(只给出可见光和近红外情况)

Tab. 1 Spectral range of optical panchromatic and multi-spectral bands (VNIR)

光学传感器	全色影像	多光谱波段			
	(μm)	XS1(μm)	XS2(μm)	XS3(μm)	XS4(μm)
SPOT 5	0.48 ~ 0.71		0.5 ~ 0.59	0.61 ~ 0.68	0.79 ~ 0.89
SPOT 4	0.50 ~ 0.73		0.50 ~ 0.59	0.61 ~ 0.68	0.79 ~ 0.89
ETM +	0.52 ~ 0.90	0.45 ~ 0.515	0.525 ~ 0.605	0.630 ~ 0.690	0.750 ~ 0.9
ASTER			0.52 ~ 0.60	0.63 ~ 0.69	0.76 ~ 0.86
IRS-P6			0.52 ~ 0.59	0.62 ~ 0.68	0.77 ~ 0.86
IKONOS-2	0.525 8 ~ 0.928 5	0.444 7 ~ 0.516	0.506 4 ~ 0.595	0.631 9 ~ 0.697 7	0.757 3 ~ 0.852 7
OrbView-3	0.45 ~ 0.90	0.45 ~ 0.52	0.52 ~ 0.60	0.625 ~ 695	0.76 ~ 0.90
QuickBird	0.45 ~ 0.90	0.45 ~ 0.52	0.52 ~ 0.60	0.63 ~ 0.69	0.76 ~ 0.90
EROS-A	0.5 ~ 0.9				
FormoSat-2	0.52 ~ 0.82	0.45 ~ 0.52	0.52 ~ 0.60	0.63 ~ 0.69	0.76 ~ 0.9
IRS-P5	0.5 ~ 0.85				
ALOS	0.52 ~ 0.77	0.45 ~ 0.50	0.52 ~ 0.60	0.61 ~ 0.69	0.76 ~ 0.89
KompSat-2	0.5 ~ 0.71	0.45 ~ 0.52	0.52 ~ 0.60	0.63 ~ 0.69	0.769 ~ 0.90



(a) IKONOS全色传感器光谱响应曲线



(b) IKONOS多光谱传感器光谱响应曲线

图 1 IKONOS 全色和多光谱波段光谱响应曲线

Fig. 1 IKONOS panchromatic and multi-spectral relative spectral response

相对光谱响应之间的关系。

每个传感器单元因为光谱范围、传感器光谱响应和 GIFOV 不同,第 b 个波段第 p 个像素的 DN (digital number) 值表示如下^[52]:

$$DN_{pb} = \text{int} [K_b \iint \int L_{\lambda}(x,y) d\lambda dx dy + offset_b] \tag{1}$$

$L_{\lambda}(x,y)$ 表示单位光谱范围和单位面积进入传感器单元的能量; K_b 表示第 b 个波段各种其他常数和传感器光谱响应一起作用的结果。 $Offset_b$ 为适用于第 b 个波段的增益。在特定波段和特定像素,式(1)可简单表示为

$$DN_{pb} = K_b L_{pb} + offset_b \tag{2}$$

假设理想融合结果为理想高分辨率多光谱传感器成像结果,该理想高分辨率多光谱传感器光谱响应曲线和光谱范围和原多光谱传感器一致,而 GIFOV 和高分辨率全色波段一致。图 2 给出全色和多光谱地面分辨率 1 : 4 (如 SPOT5、IKONOS 和 QuickBird) 情况下原多光谱、全色及理想高分辨率多光谱传感器 GIFOV 几何关系。

理想融合结果即高分辨率多光谱传感器成像结果 DN 值表示为

$$DN_{(k,i,j)} = K_k L_{(k,i,j)} + offset_k \tag{3}$$

全色影像 DN 值表示为

$$DN_{(p,i,j)} = K_p L_{(p,i,j)} + offset_p \tag{4}$$

根据不同的遥感数据融合技术,从全色影像中提取

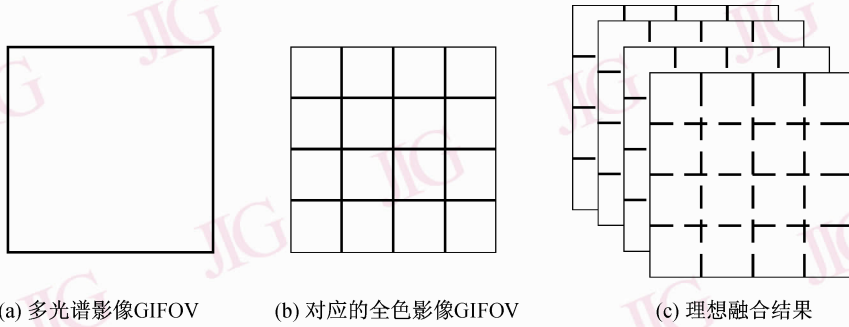


图2 高分辨率全色和低分辨率多光谱影像 GIFOV 对应关系

Fig. 2 Respective GIFOV of high-resolution panchromatic and low-resolution multispectral bands

的在位置 (i,j) 细节信息可表示为

$$\delta_{(i,j)} = DN_{(p,i,j)} - DN'_{(p,i,j)} \quad (5)$$

式中, DN' 是全色影像提取空间细节信息后所得影像 DN 值,原多光谱影像 DN 值为

$$DN_{(k,i,j)}^{XS} = K_k^{XS} L_{(k,i,j)}^{XS} + offset_k^{XS} \quad (6)$$

其中, K_k 、 K_p 和 K_k^{XS} 表示传感器光谱响应, $L_{(k,i,j)}$ 、 $L_{(p,i,j)}$ 和 $L_{(k,i,j)}^{XS}$ 表示进入单个传感器端单元接收的辐射值, $offset_k$ 、 $offset_k^{XS}$ 和 $offset_p$ 表示增益。理想融合结果 DN 值与原多光谱 DN 值存在以下关系^[49],

$$DN_{(k,i,j)}^{XS} = \xi_k * DN_{(k,i,j)} \quad (7)$$

式中, ξ_k 表示低通滤波。实验确认,彩色图像的基本几何信息包含在相应的灰度影像级别线中^[49],针对遥感多光谱影像,不同波段成像的同一场景的影像包含的几何信息一致,因此,从全色影像中提取空间细节信息与理想高分辨率多光谱各波段提取的空间信息存在线性关系。从全色影像中提取在 (i,j) 位置的细节信息为 $\delta_{(i,j)}$,融合结果如下式。

$$\begin{aligned} DN_{(k,i,j)} &= \xi_k * DN_{(k,i,j)} + \delta_{(k,i,j)} \\ &= DN_{(k,i,j)}^{XS} + \delta_{(k,i,j)} \\ &= DN_{(k,i,j)}^{XS} + \alpha_{(k,i,j)} \cdot \delta_{(i,j)} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\alpha_{(k,i,j)}$ 为添加空间细带信息 $\delta_{(i,j)}$ 到 $xs_{(k,i,j)}^L$ 中使用的融合系数; $xs_{(k,i,j)}^L$ 为 xs_k^L 波段位置为 (i,j) 的像素值。

2.2 统一理论模型的提出

遥感数据像素级融合技术的统一理论模型如下:

$$xs_{(k,i,j)}^H = xs_{(k,i,j)}^L + \alpha_{(k,i,j)} \cdot \delta_{(i,j)} \quad (9)$$

从式(9)可以得出,从高分辨率全色影像提取的空间细节信息根据一定的融合系数添加到低分辨率多光谱影像中,融合结果为空间细节信息得到增强的光谱影像。求出 $\delta_{(i,j)}$ 和 $\alpha_{(k,i,j)}$ 之后,融合操作

是按波段、按像素进行的,但在计算 $\delta_{x,y}$ 和 $\alpha_{(k,i,j)}$ 过程中,可能不仅要用到低分辨率多光谱第 k 波段和全色波段位置为 (i,j) 像素,还可能用到全局统计信息和 (i,j) 邻域像素。

$\delta_{(x,y)}$ 计算方法主要包括:

(1)线性组合法 全色波段减去多个多光谱波段线性组合得到 $\delta_{(x,y)}$,如 IHS^[1-2,42],PCA^[9],RVS^[9],Brovey^[33],Block-Regression^[31,35-36];

(2)滤波法和多尺度分析法 全色波段减去其滤波后或多级分解后影像得到 $\delta_{(x,y)}$,如 SFIM^[11],LCM^[10],à trous^[22-24],GLP (generalized laplacian pyramid)^[30,40-41],结合小波分解和 PCA 变换融合算法^[27],结合小波分解和 IHS 变换融合算法^[27-29],ARSIS 方法^[19-21]。

$\alpha_{(k,x,y)}$ 可能由以下因素决定:全色和多光谱传感器光谱响应曲线^[44,47]、全色和多光谱波段成像波段分布范围、参与融合的全色和多光谱波段成像 GIFOV、影像中地形特征和地物类型、不同传感器之间的辐射校验方法、参与数据融合数据时相、多光谱波段与全色波段的相关性、多光谱波段与全色波段的均值、方差和其他统计特性。

$\alpha_{(k,x,y)}$ 最常见的取值方法包括:

(1)取常数 如 IHS^[1-2,42],PCA^[9],RVS^[9],à trous^[22-24],结合小波分解和 IHS 变换融合算法^[27-29],结合小波分解和 PCA 变换融合算法^[27],LCM^[10];

(2)最小光谱失真模型 (SDM)^[41] SFIM^[11],Brovey^[33],à trous^[22-24],Block-Regression^[31,35-36];

(3)Context-based Decision (CBD) 等模型 如 GLP^[30,40-41],ARSIS^[19-21]。

式(9)中模型相比 Wang 文中提出的模型^[51]

概括更全面、适用性更广。Wang 提出的模型融合系数只限于调制融合和取常数的情况,而没有概括 LCM, ARSIS, GLP 等融合算法用到的融合系数;本文模型概括提取的空间细节的方法更全面, Wang 提出的模型只包括滤波和线性变换的方法,本文模型还包括直接降级 (LCM)、GLP 融合算法采用的方法;本文模型概括的算法适合绝大部分算法,不但包括 Wang 文中提到 IHS, PCA, à trous, Brovey, HPF 等算法,还包括 RVS, GLP, 结合小波分解和 PCA 变换融合算法,结合小波分解和 IHS 变换融合算法, LCM, ARSIS 和作者提出的 Block-Regression 方法。

3 常见融合算法的模型推导

典型的遥感影像数据融合算法一般可分为三大类^[31], 基于变量替换技术融合方法^[1-2, 8-10, 32]、基于调制融合方法^[11-12, 31-36]、基于多尺度分析的融合方法^[14-30, 37-41]。本部分通过数学推导的方式把以上 3 类融合算法推导成统一理论模型, 也就是式 (9) 提出的模型。通过推导可以发现, 不同的融合算法求得 $\delta_{(i,j)}$ 和 $\alpha_{(k,i,j)}$ 的方法不同。

3.1 基于变量替换技术融合方法

基于变量替换技术融合方法典型代表算法有 IHS 变换融合算法^[1-2, 42]、PCA 变换融合算法^[9]、LCM 算法^[10]和回归变量替换算法^[9], 下面以 PCA 融合算法为例说明基于变量替换技术融合算法的推导过程。

经过精确配准之后, 参与融合的低分辨率多光谱波段 xs_k 重采样到和高分辨率全色波段 pan 具有相同的像元大小: $xs_k^L = r_{sp}(xs_k)$; 完成采样操作之后实现 PCA 算法大致分成以下几个步骤^[9]:

- (1) 计算参与融合的 n 个低分辨率波段 xs_k^L 的相关矩阵, n 的取值为 4;
- (2) 由相关矩阵计算特征值和特征向量;
- (3) 将特征值按由大到小的顺序排序, 特征向量也做相应的排列, 得到变换矩阵 Φ ;
- (4) 根据主成分变换技术, 依次计算各主成分变量, 也即是进行主成分正变换

$$pc = \Phi \cdot xs^L \quad (10)$$

- (5) 取主成分正变换后所得第一主分量;
- (6) 用高分辨率影像替代主成分变换的第一

分量;

$$pan_{(i,j)} = pc_{(1,i,j)} + \delta_{(i,j)} \quad (11)$$

(7) 进行逆主成分变换, 最后得到融合以后的影像。

$$xs^H = \Omega \cdot pc' \quad (12)$$

式中

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} xs_1^H \\ xs_2^H \\ xs_3^H \\ xs_4^H \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{13} & \omega_{14} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \omega_{23} & \omega_{24} \\ \omega_{31} & \omega_{32} & \omega_{33} & \omega_{34} \\ \omega_{41} & \omega_{42} & \omega_{43} & \omega_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} pan \\ pc_2 \\ pc_3 \\ pc_4 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{13} & \omega_{14} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \omega_{23} & \omega_{24} \\ \omega_{31} & \omega_{32} & \omega_{33} & \omega_{34} \\ \omega_{41} & \omega_{42} & \omega_{43} & \omega_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} pc_1 + \delta \\ pc_2 \\ pc_3 \\ pc_4 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \omega_{11} \\ \omega_{21} \\ \omega_{31} \\ \omega_{41} \end{bmatrix} \cdot (pc_1 + \delta) + \begin{bmatrix} \omega_{12} & \omega_{13} & \omega_{14} \\ \omega_{22} & \omega_{23} & \omega_{24} \\ \omega_{32} & \omega_{33} & \omega_{34} \\ \omega_{42} & \omega_{43} & \omega_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} pc_2 \\ pc_3 \\ pc_4 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \omega_{11} \\ \omega_{21} \\ \omega_{31} \\ \omega_{41} \end{bmatrix} \cdot pc_1 + \begin{bmatrix} \omega_{12} & \omega_{13} & \omega_{14} \\ \omega_{22} & \omega_{23} & \omega_{24} \\ \omega_{32} & \omega_{33} & \omega_{34} \\ \omega_{42} & \omega_{43} & \omega_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} pc_2 \\ pc_3 \\ pc_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{11} \\ \omega_{21} \\ \omega_{31} \\ \omega_{41} \end{bmatrix} \cdot \delta \\ &= \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{13} & \omega_{14} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \omega_{23} & \omega_{24} \\ \omega_{31} & \omega_{32} & \omega_{33} & \omega_{34} \\ \omega_{41} & \omega_{42} & \omega_{43} & \omega_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} pc_1 \\ pc_2 \\ pc_3 \\ pc_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{11} \\ \omega_{21} \\ \omega_{31} \\ \omega_{41} \end{bmatrix} \cdot \delta \\ &= \begin{bmatrix} xs_1^L \\ xs_2^L \\ xs_3^L \\ xs_4^L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{11} \\ \omega_{21} \\ \omega_{31} \\ \omega_{41} \end{bmatrix} \cdot \delta \quad (13) \end{aligned}$$

整个算法主要运算部分包括求相关矩阵、主成分正变换和反变换。通过推导, PCA 融合算法的最终融合结果为

$$xs_{(k,i,j)}^H = xs_{(k,i,j)}^L + \omega_{k1} \cdot \delta_{(i,j)} \quad (14)$$

其中, $\delta = pan - pc_1$

3.2 基于调制融合方法

基于调制技术的融合算法主要包括, Brovey 变换融合算法^[33]、SFIM 融合算法^[11]和高通调制融合

算法^[32],下面以本文研究的融合算法 Block-Regression 为例说明基于调制融合算法的推导过程。

经过精确配准之后,参与融合的低分辨率多光谱波段 xs_k 重采样到和高分辨率全色波段 pan 具有相同的像元大小: $xs_k^L = rsp(xs_k)$; 完成采样操作之后实现 Block-Regression 融合算法大致分成以下几个步骤^[31,35-36]:

(1) 对每一个像素块进行多元回归,得到回归系数,假设参与融合的多光谱波段数为 4;

$$pan = c_1 \cdot xs_1^L + c_2 \cdot xs_2^L + c_3 \cdot xs_3^L + c_4 \cdot xs_4^L + \delta \quad (15)$$

(2) 利用回归所得系数,计算低分辨率多光谱波段线性组合;

$$syn = c_1 \cdot xs_1^L + c_2 \cdot xs_2^L + c_3 \cdot xs_3^L + c_4 \cdot xs_4^L \quad (16)$$

(3) 每一分块根据下式进行融合运算:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} xs_1^H \\ xs_2^H \\ xs_3^H \\ xs_4^H \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} xs_1^L \\ xs_2^L \\ xs_3^L \\ xs_4^L \end{bmatrix} \cdot \frac{pan}{syn} = \begin{bmatrix} xs_1^L \\ xs_2^L \\ xs_3^L \\ xs_4^L \end{bmatrix} \cdot \frac{syn + \delta}{syn} \\ &= \begin{bmatrix} xs_1^L \\ xs_2^L \\ xs_3^L \\ xs_4^L \end{bmatrix} \cdot \left(1 + \frac{\delta}{syn}\right) = \begin{bmatrix} xs_1^L \\ xs_2^L \\ xs_3^L \\ xs_4^L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} xs_1^L \\ xs_2^L \\ xs_3^L \\ xs_4^L \end{bmatrix} \cdot \frac{\delta}{syn} \\ &= \begin{bmatrix} xs_1^L \\ xs_2^L \\ xs_3^L \\ xs_4^L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} xs_1^L/syn \\ xs_2^L/syn \\ xs_3^L/syn \\ xs_4^L/syn \end{bmatrix} \cdot \delta \end{aligned} \quad (17)$$

因此,最后融合结果为

$$xs_{(k,i,j)}^H = xs_{(k,i,j)}^L + \frac{xs_{(k,i,j)}^L}{\sum_k c_k \cdot xs_{(k,i,j)}^L} \cdot \delta_{(i,j)} \quad (18)$$

式中, $\delta = pan - (c_1 \cdot xs_1^L + c_2 \cdot xs_2^L + c_3 \cdot xs_3^L + c_4 \cdot xs_4^L)$, c_k 为 (i,j) 像素所在影像块多元线性回归所得线性回归系数。

3.3 基于多尺度分析的融合方法

基于多尺度融合算法主要应用多尺度分析技术如小波分解技术^[14-29]、Laplacian 金字塔分解技术对参与融合的多光谱与全色影像进行不同尺度的分解,根据多光谱与全色影像在粗糙尺度之间的关系,推导多光谱影像精细尺度应注入的空间细节信息^[19-20,30,41,43],从而达到增强空间细节信息的目的,

典型的基于多尺度融合算法有应用移不变性和非截取小波分解技术的 à trous 小波融合算法^[22-24]、基于 Laplacian 金字塔融合算法。另外一些研究人员提出了小波分解和分量替换相结合的融合算法,如结合小波分解和 PCA 变换融合算法、结合小波分解和 IHS 变换融合算法^[27-29]。下面以 ARSIS、结合小波分解和 IHS 变换的融合方法为例说明基于多尺度分析的融合算法的推导过程。

3.3.1 ARSIS

经过精确配准之后,参与融合的低分辨率多光谱波段 xs_k 重采样到和高分辨率全色波段 pan 具有相同的像元大小: $xs_k^L = rsp(xs_k)$, 完成采样操作之后实现 ARSIS 算法大致分成以下几个步骤^[19-21]:

(1) pan_A^n 表示 pan 经过 n 级多尺度分析后所得的近似分量, pan_D^n 表示细节分量,多尺度分析方法可以是 GLP, à trous, UDWT (undecimated discrete wavelet transform), 其中 $\delta = pan - pan_A^n = \sum_n pan_D^n$

(2) 每个像素的融合操作为

$$xs_{(k,i,j)}^H = xs_{(k,i,j)}^L + \alpha_{(k,i,j)} \cdot \delta_{(i,j)} \quad (19)$$

CBD 模型^[27]为

$$\alpha_{(k,i,j)} = \begin{cases} \min\left(\frac{\sigma_{(k,i,j)}^{xs}}{1 + \sigma_{(i,j)}^{pan}}, 3\right) & \rho_{(k,i,j)} \geq \theta_k \\ 0 & \rho_{(k,i,j)} < \theta_k \end{cases} \quad (20)$$

式中, $\rho_{(k,i,j)}$ 为以 $xs_{(k,i,j)}^L$ 为中心的 $N \times N$ (IKONOS 可取 9×9 , SPOT1-4 可取 7×7) 窗口多光谱波段像素与 $pan_{A(i,j)}^n$, 相应像素之间的线性相关系数; θ_k 为融合第 k 波段所用的阈值常数,范围 $0.3 \sim 0.6$, 其取值依赖于 xs_k 和 pan_A^n 的全局相关性,相关性越低, θ_k 取值越大;

(3) $\sigma_{(k,i,j)}^{xs}$ 为以 $xs_{(k,i,j)}^L$ 为中心的 $N \times N$ 窗口多光谱波段像素标准差, $\sigma_{(i,j)}^{pan}$ 为以 $pan_{A(i,j)}^n$ 为中心的 $N \times N$ 窗口全色波段像素标准差。

$\alpha_{(k,i,j)}$ 取值也可以是 Ranchin- Wald- Mangolini (RWM) 模型^[20]。

3.3.2 结合小波分解和 IHS 变换融合算法

经过精确配准之后,参与融合的低分辨率多光谱波段 xs_k 重采样到和高分辨率全色波段 pan 具有相同的像元大小: $xs_k^L = rsp(xs_k)$, 完成采样操作之后实现结合小波分解和 IHS 变换融合算法大致分成以下几个步骤^[27-29]:

(1) 把 3 个参与融合的低分辨率多光谱波段 xs_k^L 变换到 IHS 色彩空间,得到分量 I, H, S;

$$\begin{bmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ -\sqrt{2}/6 & -\sqrt{2}/6 & 2\sqrt{2}/6 \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} xs_1^L \\ xs_2^L \\ xs_3^L \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$H = \tan^{-1} \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \quad (22)$$

$$S = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \quad (23)$$

(2) 采用基于 à trous 技术的多尺度分析方法对全色波段进行多尺度分析, 将全色波段的细节分量加到分量 I 中, 得 I' ;

$$pan = pan_A^n + \sum_1^n pan_D^n \quad (24)$$

$$I' = I + \sum_1^n pan_D^n \quad (25)$$

(3) 将分量 I' 替代原分量 I , 并进行 IHS 逆变换:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} xs_1^H \\ xs_2^H \\ xs_3^H \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ -\sqrt{2}/6 & -\sqrt{2}/6 & 2\sqrt{2}/6 \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} I' \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I + \sum_1^n pan_D^n \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} xs_1^L \\ xs_2^L \\ xs_3^L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \sum_1^n pan_D^n = \begin{bmatrix} xs_1^L \\ xs_2^L \\ xs_3^L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \delta \end{aligned}$$

因此, 最后融合结果为

$$xs_{(k,i,j)}^H = xs_{(k,i,j)}^L + \delta_{(i,j)} \quad (26)$$

式中

$$\delta = \sum_1^n pan_D^n = pan - pan_A^n \quad (27)$$

和 à trous 算法融合结果一致。

4 基于统一模型的实现技术

根据前一部分提出的融合算法统一理论模型, 将提出直接计算融合结果的实现技术, 并列出了上述融合算法实现技术中两个重要参量求法。基于统一模型的实现技术相比常规实现算法能减少计算量, 节省运算时间, 同时不改变最终的融合结果。

4.1 常见融合算法基于统一模型的实现技术

根据遥感数据像素级融合统一模型和各种融合算法公式, 直接计算数学模型中用到的参量, 也即是直接计算式 (9) 中的 $\delta_{(i,j)}$ 和 $\alpha_{(k,i,j)}$ 参量, 就可以完成融合操作。表 2 列举了常用融合算法基于统一模型实现时用到的两个重要参量的 $\delta_{(i,j)}$ 和 $\alpha_{(k,i,j)}$ 的求法。因此, 基于统一模型的实现技术去除了对融合结果没有影响的计算步骤, 只执行影响融合结果的步骤, 减少了运算量, 节省了运算时间, 提高了实际应用效率。

表 2 中基于 GLP 融合技术在计算 xs_k^L 时采用了与其他技术不同的方法, GLP 融合方法采用 Down-sampling 方法, 而其他算法都采用了重采样的方法。表 2 中 ω_{kl} 对应于 PCA、RVS、结合小波分解和 PCA 变换融合算法中逆变换矩阵第 1 列各元素, 如下式:

$$\Omega = \Phi^{-1} = \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{13} & \omega_{14} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \omega_{23} & \omega_{24} \\ \omega_{31} & \omega_{32} & \omega_{33} & \omega_{34} \\ \omega_{41} & \omega_{42} & \omega_{43} & \omega_{44} \end{bmatrix} \quad (28)$$

4.2 基于统一模型的实现技术的优越性

以 PCA 融合算法为例说明基于统一模型的实现技术的优越性, PCA 融合算法常规实现所需步骤如第 3 节所述, 而 PCA 融合算法基于统一模型的实现只要执行的步骤包括:

- (1) 计算参与融合的 n 个低分辨率影像波段 xs_k^L 的相关矩阵;
- (2) 由相关矩阵计算特征值和特征向量;
- (3) 将特征值按由大到小的顺序排序, 特征向量也做相应的排列, 并求出对应的逆矩阵;

$$\Omega = \Phi^{-1} \quad (29)$$

- (4) 取最大特征值所对应的特征向量, 根据该特征向量计算第 1 分量, 求出

$$pc_1 = \varphi_{11} \cdot xs_1^L + \varphi_{12} \cdot xs_2^L + \varphi_{13} \cdot xs_3^L + \varphi_{14} \cdot xs_4^L \quad (30)$$

$$\delta = pan - pc_1 \quad (31)$$

- (5) 根据下式进行以下融合操作。

$$xs_{(k,i,j)}^H = xs_{(k,i,j)}^L + \omega_{kl} \cdot \delta_{(i,j)} \quad (32)$$

比较两个实现过程, 很容易得出, 新的实现方法相比原来实现方法去除了主成分正变换和主成分逆变换两个运算量大的步骤, 减少了整个算法计算量, 节省了执行时间。

表 2 常用融合算法基于统一模型的实现技术两个重要参量 $\delta_{(i,j)}$ 和 $\alpha_{(k,i,j)}$ 的计算方法

Tab. 2 Two important parameters $\delta_{(i,j)}$ and $\alpha_{(k,i,j)}$ of most data fusion algorithms

融合算法	$\alpha_{(k,i,j)}$	$\delta_{(i,j)}$
PCA ^[9]	ω_{k1}	$pan_{(i,j)} - pc_{1(i,j)}$
IHS ^[1-2,42]	1	$pan_{(i,j)} - I_{(i,j)}$
RVS ^[9]	ω_{k1}	$pan_{(i,j)} - (c_1 \cdot xs_{(1,i,j)}^L + c_2 \cdot xs_{(2,i,j)}^L + c_3 \cdot xs_{(3,i,j)}^L)$
SFIM ^[11]	$\frac{xs_{(k,i,j)}^L}{syn_{(i,j)}}$	$pan_{(i,j)} - syn_{(i,j)}$ 其中: $syn = f * pan$
Brovey ^[33]	$\frac{3xs_{(k,i,j)}^L}{\sum_k xs_{(k,i,j)}^L}$	$pan_{(i,j)} - \frac{1}{3}(xs_{(1,i,j)}^L + xs_{(2,i,j)}^L + xs_{(3,i,j)}^L)$
à trous ^[22-24]	Additive: 1 最小光谱失真: $\frac{xs_{(k,i,j)}^L}{pan_{\Lambda(i,j)}^2}$ 最小光谱失真: $\frac{xs_{(k,i,j)}^L}{pan_{p(i,j)}^L}$	$pan_{(i,j)} - pan_{\Lambda(i,j)}^2$ 其中, $pan_{\Lambda}^1 = f_1 * pan$; $pan_{\Lambda}^2 = f_2 * pan_{\Lambda}^1$
GLP ^[30,40-41]	Context-based decision: $\begin{cases} \min\left(\frac{\sigma_{(k,i,j)}^{xs}}{1 + \sigma_{(i,j)}^{pan}}, 3\right) & \rho_{(k,i,j)} \geq \theta_k \\ 0 & \rho_{(k,i,j)} < \theta_k \end{cases}$	$pan_{(i,j)} - pan_{p(i,j)}^L$ 其中, $pan_p^L = e_p(\uparrow p(\downarrow p(r_p(pan))))$
结合小波分解和 PCA 变换融合算法 ^[27]	ω_{k1}	$pan_{(i,j)} - pan_{\Lambda(i,j)}^2$ 其中, $pan_{\Lambda}^1 = f_1 * pan$; $pan_{\Lambda}^2 = f_2 * pan_{\Lambda}^1$
结合小波分解和 IHS 变换融合算法 ^[27-29]	1	$pan_{(i,j)} - pan_{\Lambda(i,j)}^2$ 其中, $pan_{\Lambda}^1 = f_1 * pan$; $pan_{\Lambda}^2 = f_2 * pan_{\Lambda}^1$
LCM ^[10]	b_k 其中, $xs_k^L = b_k \cdot pan^L + a_k + \varepsilon_k$	$pan_{(i,j)} - pan_{(i,j)}^L$ 其中, pan^L 由 pan 直接降级得到
ARSIS ^[19-21]	Context-based decision: $\begin{cases} \min\left(\frac{\sigma_{(k,i,j)}^{xs}}{1 + \sigma_{(i,j)}^{pan}}, 3\right) & \rho_{(k,i,j)} \geq \theta_k \\ 0 & \rho_{(k,i,j)} < \theta_k \end{cases}$ Ranchin-Wald-Mangolini 参考文献 ^[20]	$pan_{(i,j)} - pan_{\Lambda(i,j)}^n = \sum_{n=1}^N pan_{\Lambda(i,j)}^n$ pan_{Λ}^n 表示 pan 经过 n 级多尺度分析后所得的近似分量, 多尺度分析方法可以是 GLP, à trous, UDWT (Undecimated Discrete Wavelet Transform) 等方法。
Block-Regression ^[31,35-36]	$\frac{xs_{(k,i,j)}^L}{\sum_k c_k \cdot xs_{(k,i,j)}^L}$	$pan_{(i,j)} - syn_{(i,j)}$ 其中针对每一块: $syn = c_1 \cdot xs_1^L + c_2 \cdot xs_2^L + c_3 \cdot xs_3^L + c_4 \cdot xs_4^L$ $pan = c_1 \cdot xs_1^L + c_2 \cdot xs_2^L + c_3 \cdot xs_3^L + c_4 \cdot xs_4^L + \delta$

选取河南新乡 IKONOS 数据中的一块, 全色影像像元个数为 1 761 × 1 649, 多光谱影像包括 B, G, R, NIR 共 4 个波段, 像元个数为 441 × 413, 分别在相同的硬件和软件平台下为该融合技术编写常规实现和基于统一模型实现 Matlab 程序。实验所用软硬件平台为 Intel Pentium(R)4 CPU 3.00 GHz 双核处理器, 内存 2.0 G, Windows XP 操作系统, Matlab v 7.0。

记录 PCA 融合算法常规实现和基于统一模型实现运行时间, 该运行时间不包括全色影像和多光谱影像输入输出操作所消耗的时间, 也不包括把多光谱影像重采样所消耗的时间。其中常规实现算法运行时间为 1.390 6 s, 而基于统一模型实现运行时间为 1.093 8 s, 节省运行时间 0.296 9 s, 节省了 21.35% 运行时间。同时, 比较两种实现的融合结



图 3 常规实现和基于统一模型实现的比较

Fig. 3 Fusion results of common implementation and generalized model based implementation

果,如图 3(c)和(d)所示;通过 PCI Geomatics v 9.0 软件提供查看指定位置像素值的工具显示该两个实现所得融合结果完全一致。图 3(a)和(b)显示了选取的原多光谱数据和 PCA 融合后结果。

实验数据证明,在相同的硬件和软件平台下,实现 PCA 融合算法,基于统一模型的实现技术节省了一定的时间,且具有相同的融合结果。

5 结 论

遥感数据像素级融合统一理论模型,能描述已提出的大部分融合算法,包括 PCA, IHS, SFIM, Brovey, à trous, GLP, 结合小波分解和 PCA 变换融合算法, LCM, ARSIS, Block-Regression 等融合算法,通过数学推导的方式可以把以上算法推导成该理论模型。该模型通过数学表达式的方式清晰地反映了参

与融合的多光谱影像、从高分辨率全色影像提取的空间细节信息和采取的融合策略三者之间的运算关系。因此,遥感数据融合统一理论模型的建立,将有助于将设计融合算法的主要矛盾集中在从高分辨率全色影像提取空间细节的方法和添加空间细节信息的策略。同时,有了遥感数据融合统一理论模型之后,就可以对已提出的融合算法进行相关理论分析,将所有的融合算法纳入到统一的模型框架下,对遥感数据融合过程有统一的认识。

通过数学推导的方式和实验结果比较的方式证明,应用遥感数据融合统一理论模型的实现技术具有减少运算量的优越性,并且该实现技术具有普遍适用性,可以应用于已提出的大部分遥感数据融合算法,尤其对运算量大的数据融合算法,减少的运算量尤为可观。本文给出了 PCA 融合算法常规实现和基于统一模型实现的一个例子,基于统一模型的

实现相对常规实现减少了 PCA 正变换和逆变换运算,使用相同的硬件和软件计算平台,节省了 21.35% 运行时间,且这两个融合实现具有相同的结果。

未来研究工作包括根据遥感数据融合应用要求,应用本文的统一理论模型,指导遥感数据像素级融合算法的选择和设计,并在实现过程中应用本文提出的基于统一模型的实现技术,使遥感数据融合技术得到更广泛的应用。

参考文献 (References)

- Carper J W, Lillesand T M, Kiefer R W. The use of intensity-hue-saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1990, **56**(4): 459-467.
- Schetselaar E M. Fusion by the IHS transform: should we use cylindrical or spherical coordinates? [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, **19**(4): 759-765.
- Munehika C K, Warnick J S, Salvaggio C, et al. Resolution enhancement of multispectral image data to improve classification accuracy [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1993, **59**(1): 67-72.
- Boris Z, Dieter O, Franz L, et al. Unmixing- based multisensor multiresolution image fusion [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, **37**(3): 1212-1226.
- Price J C. Combining panchromatic and multispectral imagery from dual resolution satellite instruments [J]. Remote Sensing of Environment, 1987, **21**(2): 119-128.
- Price J C. Combining multispectral data of differing spatial resolution [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, **37**(3): 1199-1203.
- Lillo S M, Gonzalo C, Arquero A, et al. Fusion of multispectral and panchromatic satellite sensor imagery based on tailored filtering in the fourier domain [J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, **26**(6): 1263-1268.
- Pellemans A H J M, Jordans R W L, Allevijn R. merge multispectral and panchromatic SPOT images with respect to the radiometric properties of sensor [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1993, **59**(1): 81-87.
- Shettigara V K. A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1992, **58**(5): 561-567.
- Hill J, Diemer C, Stöver O, et al. A local correlation approach for the fusion of remote sensing data with different spatial resolutions in forestry applications [A]. In: Proceedings of International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing [CD], Valladolid, Spain, 1999, **32**: Part 7-4-3 W6.
- Liu J G. Smoothing filter-based intensity modulation: a spectral preserve image fusion technique for improving spatial details [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, **21**(18): 3461-3472.
- Zhang Y. A new merging method and its spectral and spatial effects [J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, **20**(10): 2003-2014.
- Zhang Y. Highlight article: understanding image fusion [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2004, **70**(6): 657-661.
- Garguet-duport B, Girel J, Chasseny J M, et al. The use of multiresolution analysis and wavelet transform for merging SPOT panchromatic and multispectral image data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996, **62**(9): 1057-1066.
- Yocky C A. Multiresolution wavelet decomposition image merger of landsat thematic mapper and SPOT panchromatic data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996, **62**(9): 1067-1074.
- Zhou J, Civco D L, Silander J A. A wavelet transform method to merge landsat TM and SPOT panchromatic data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, **19**(4): 743-757.
- Kumar A S, Kartikeyan B, Majumdar K L. Band sharpening of IRS-multispectral imagery by cubic spline wavelets [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, **21**(3): 581-594.
- Choi M, Kim R Y, Nam M R, et al. Fusion of multispectral and panchromatic satellite images using the curvelet Transform [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005, **2**(2): 136-140.
- Ranchin T, Wald L. Fusion of high spatial and spectral resolution images: the ARSIS concept and its implementation [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2000, **66**(1): 49-61.
- Ranchin T, Aiazzi B, Alparone L, et al. Image fusion—the ARSIS concept and some successful implementation schemes [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2003, **58**(1-2): 4-18.
- Blanc P, Blu T, Ranchin T, et al. Using iterated rational filter banks within the ARSIS concept for producing 10 m Landsat multispectral images [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, **19**(12): 2331-2343.
- Núñez J, Otazu X, Fors O, et al. Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, **37**(3): 1204-1211.
- Teggi S, Cecchi R, Serafini F. TM and IRS-1C-PAN data fusion using multiresolution decomposition methods based on the ‘à trous’ algorithm [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, **24**(6): 1287-1301.
- González-Audicana M, Otazu X, Fors O, et al. Comparison between Mallat’s and the à trous discrete wavelet transform based algorithms for the fusion of multispectral and panchromatic images [J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, **26**(3): 595-614.
- Chen Y H, Deng L, Li J, et al. A new wavelet-based image fusion method for remotely sensed data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, **27**(7): 1465-1476.

- 26 Pradhan P S, King R L, Younan N H, *et al.* Estimation of the number of decomposition levels for a wavelet-based multiresolution multisensor image fusion [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(12): 3674-3686.
- 27 González- Audicana M, Saleta J L, Catalán R G, *et al.* Fusion of multispectral and panchromatic images using improved IHS and PCA mergers based on wavelet decomposition [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(6): 1291-1299.
- 28 Chibani Y, Houacine A. The joint use of IHS transform and redundant wavelet decomposition for fusing multispectral and panchromatic images [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, **23**(18): 3821-3833.
- 29 Zhang Y, Hong G. An IHS and wavelet integrated approach to improve pan-sharpening visual quality of natural colour IKONOS and QuickBird images [J]. *Information Fusion*, 2005, **6**(3): 225-234.
- 30 Aiazzi B, Alparone L, Baronti S, *et al.* Context-driven fusion of high spatial and spectral resolution images based on oversampled multiresolution analysis [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, **40**(10): 2300-2312.
- 31 Zhang J X, Yang J H, Zhao Z. Block- Regression- based fusion of optical and SAR imagery for feature enhancement [A]. In: Plenary Presentation, ISPRS Mid- term Symposium Remote Sensing: From Pixels to Processes [EB/CD]. Enschede, the Netherlands, 2006.
- 32 Chavez S, Sides C, Anderson A. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1991, **57**(3): 295-303.
- 33 Vrabel J. Multi- spectral imagery advanced band sharpening study [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, **66**(1): 73-79.
- 34 Alparone L, Baronti S, Garzelli A, *et al.* Landsat ETM + and SAR image fusion based on generalized intensity modulation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(12): 2832-2839.
- 35 Zhang J X, Yang J H, Zhao Z, *et al.* Block-Regression-based fusion of optical and SAR imagery for feature enhancement [A]. In: Proceedings of ISPRS Mid- term Symposium 2006 Remote Sensing: From Pixels to Processes [CD], Enschede, the Netherlands, 2006.
- 36 Zhang J X, Yang J H, Li H T, *et al.* Generalized model for remotely sensed data pixel-level Fusion [A]. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences [C], Beijing, China, 2008, **37**(Part B7): 1051-1056.
- 37 Li H, Manjunath B S, Mitra S K. Multi-sensor image fusion using the wavelet transform [A]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP' 94) [C], Austin, Texas, USA, 1994: 51-55.
- 38 Zhang Z, Blum R S. A categorization of multiscale-decomposition-based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application [J]. *Proceeding of IEEE*, 1999, **87**(8): 1315-1326.
- 39 Gonzalo P, Jesús M. A wavelet- based image fusion tutorial [J]. *Pattern Recognition*, 2004, **37**(9): 1855-1872.
- 40 Alparone L, Baronti S, Garzelli A, *et al.* A global quality measurement of pan- sharpened multispectral imagery [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, **1**(4): 313-317.
- 41 Aiazzi B, Alparone L, Baronti S, *et al.* MTF- tailored multiscale fusion of high-resolution MS and Pan imagery [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2006, **72**(5): 591-596.
- 42 Choi M. A new intensity- hue- saturation fusion approach to image fusion with a tradeoff parameter [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(6): 1672-1682.
- 43 Garzelli A, Nencini F. Interband structure modeling for Pan- sharpening of very high-resolution multispectral images [J]. *Information Fusion*, 2005, **6**(3): 213-224.
- 44 Otazu X, González- Audicana M, Fors O, *et al.* Introduction of sensor spectral response into image fusion methods: Application to Wavelet- Based Methods [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, **43**(10): 2376-2385.
- 45 González- Audicana M, Otazu X, Fors O, *et al.* A low computational- cost method to fuse IKONOS images using the spectral response function of its sensors [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(6): 1683 -1691.
- 46 Tu T M, Huang P S, Hung C L, *et al.* A fast intensity- hue- saturation fusion technique with spectral adjustment for IKONOS imagery [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, **1**(4): 309-312.
- 47 Andreja Š, Krištof O. High- resolution image fusion: methods to preserve spectral and spatial resolution [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2006, **72**(5): 565-572.
- 48 Joshi M V, Bruzzone L, Chaudhuri S. A model- based approach to multiresolution fusion in remotely sensed images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(9): 2549-2562.
- 49 Ballester C, Caselles V, Igual L, *et al.* A variational model for P + XS image fusion [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2006, **69**(1): 43-58.
- 50 Tu T M, Su S C, Shyu H C, *et al.* A new look at IHS-like image fusion methods [J]. *Information Fusion*, 2001, **2**(3): 177-186.
- 51 Wang Z J, Djemel Z, Armenakis C, *et al.* A comparative analysis of image fusion methods [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, **43**(6): 1391-1402.
- 52 Schowengerdt R A. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing* [M]. 2nd ed, Orlando, FL: Academic, 1997.
- 53 GeoEye. IKONOS Relative Spectral Response and Radiometric Calibration Coefficients [EB/OL]. <http://www.geoeye.com/CorpSite/assets/docs/technical-papers/2008/IKONOS-Relative-Spectral-Response.xls>, 2008.