

文章编号:1001-1595(2009)02-0131-07

光学遥感影像像素级融合的理论框架

窦 闻¹, 陈云浩², 何辉明¹

1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 北京师范大学 资源学院, 北京 100875

Theoretical Framework of Optical Remotely Sensed Image Fusion

DOU Wen¹, CHEN Yun-hao², HE Hui-ming²

Transportation College, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. College of Resources Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Image fusion on pixel level is a common process for information analysis of remotely sensed data. However, there is a lack of theoretical research in the field. Based on comparative analysis of GIF and GCOS model, the paper proposed a unified theoretical framework of remotely sensed image fusion. Description of several typical fusion methods are provided. Moreover, works of algorithm equivalence discriminant, fusion performance analysis and fusion algorithm development in the framework are provided. Some interesting and valuable conclusions are drawn by analysis in the unified theoretical framework. The result shows that BT is equivalent to IHS based on triangle model, and PCA is a special case of GS. The reason why hybrid methods could improve fusion performance is also revealed. The study proves the validation and effectivity of the framework on theoretical analysis of image fusion.

Key words: remote sensing; image fusion; mathematical model; theoretical framework

摘 要: 遥感影像像素级融合是遥感信息分析与处理过程中十分常用的处理方法之一, 但目前该领域缺乏相应的理论研究。通过对 GIF 和 GCOS 模型的对比分析, 建立遥感数据像素级融合的统一理论框架, 并给出几种具有代表性的融合方法在统一框架下的表达。在此基础上, 例证统一理论框架在算法等价性判别、融合性能理论分析、融合算法设计等方面的作用。在此框架下的研究表明, Brovey 变换融合法与基于三角形模型的 IHS 方法完全等价, PCA 方法为 GS 方法的特例。此外还揭示了组合现有方法以提高融合性能的原理。这些研究结果说明统一理论框架在问题分解方面的合理性和进行遥感影像像素级融合理论分析的有效性。

关键词: 遥感; 图像融合; 数学模型; 理论框架

中图分类号: P237

文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(40671122, 40671130); 北京市自然科学基金(4072016); 霍英东教育基金(111017)

1 像素级融合理论现状

多源遥感数据融合包括像素级、特征级和决策级 3 个层次^[1~2]。像素级融合能够充分应用原始数据中包括的数据和信息量, 综合集成多源遥感信息的优越性, 尽可能多的保持对象的原始信息, 充分利用现有数据、获取更高质量数据, 因此像素级融合不仅是遥感信息处理研究的一个重要方向, 更是近年图像工程研究和应用的新热点^[3]。

随着遥感数据源和应用的发展, 像素级图像融合研究呈现出以下特征: ① 理论基础和研究工具: 应用新的数学理论和计算智能理论等, 如小波和小波包^[4~5]、脊波^[6]、数学形态学^[7]等的使用, 更加重视图像融合的数学意义, 向更专业的信号处理方向发展; ② 研究手段: 研究思路逐步拓宽,

对已有方法进行组合、集成, 结合不同的融合方法的优点, 从而达到更好的效果, 如 IHS 方法和小波方法的结合^[8], PCA 和小波方法的结合^[9], 小波方法和金字塔方法的结合^[10~11], 等等。③ 研究目标: 当前的图像融合研究已经脱离了主要以空间增强为目标的阶段, 融合结果逐渐以光谱信息提取为目标^[12~13], 因此图像融合方法的光谱保持能力越来越受到重视^[9, 14~16], 具有明确物理意义的融合理论正成为研究的主流。

在这一背景下, 宫鹏等人指出, 目前图像融合技术缺乏理论指导, 需要建立图像融合的理论框架^[17]。图像融合的统一理论框架研究逐渐得到国内外研究人员的重视, 并且已经开始有零星的文献报道。目前查阅到的文献中, 除了文献^[18~20]对图像融合算法分类进行的思考外, 文献^[21]对

快速 IHS 方法的探索也可以认为蕴含了这样的思想,但最终仍未能上升到理论高度,而是通过统计的方法以大量的实例研究取代了理论思考。文献[22]第一次比较严格地从观测对象光谱特性、传感器特性出发,以概率为测度表现不同传感器获取信息之间的数学关联,并得到了一个比较通用的小波融合模型,为图像融合理论框架的研究提供了一个很好的模式;文献[23]从遥感图像成像过程出发,建立通用图像融合模型 GIF,这是查阅到的文献中第一次公开提出通用模型研究的文章,然而模型建立过程中采用的假设条件过强,存在一定的主观性与随意性。文献[24]从遥感机理、物理模型和数学推理出发,建立分量替换融合法的通用模型 GCOS,提出以数学推导建立通用的数学模型,以实际应用结合物理解释进行模型实现。

本文在 GIF 和 GCOS 模型基础上,提出像素级数据融合的统一数学模型,并应用于现有像素级数据融合方法的分析。

2 数学模型

2.1 GIF 模型

GIF 模型是通过对简化的遥感图像成像过程进行分析构建的。传感器接收的辐射可以分为三个显著的部分:①未被散射的直射光在地表的反射能量;②向下散射的天空光在地表的反射能量;③向上散射的天空光。若图像已经经过了大气校正,消除了天空光对图像造成的大气效应,假设地表为朗伯面,则波段 b 记录的 DN 值可以表示为

$$DN_b(x, y) = k_b \rho_b(x, y) \cos[\gamma(x, y)] + O_b \quad (1)$$

其中, k_b 为传感器定标系数的增益因子, O_b 为传感器定标系数的偏移量因子, ρ_b 为 (x, y) 位置上的地表反射率, γ 为成像时的太阳直射光与地表之间的夹角。

为简化起见,将 O_b 设为 0,并作如下假设:

① 全色与多光谱数据获取时的太阳高度角和方位角相同;② 低分辨率图像一个像元对应的地表范围内的反射率相同。

由此可以得到不同分辨率多光谱图像在同一位置上记录的 DN 值之间的关系如下:

$$DN_{MS}^h(\Omega_n) = DN_{MS}^l(\Omega_n) + \alpha\omega \quad (2)$$

其中,上标 h 表示高分辨率图像,上标 l 表示低分辨率图像。当 $DN_{MS}^l(\Omega_n) \neq 0$ 时, $\alpha = DN_{MS}^h(\Omega_n) / DN_{PAN}^l(\Omega_n)$; 否则置为 1, $\omega = DN_{PAN}^h(\Omega_n) - DN_{PAN}^l(\Omega_n)$ 。

公式即为 GIF 方法的数学模型。GIF 模型的详细建立过程参见文献[23]。

GIF 模型建立在简化的遥感成像模型基础之上,所采用的基本假设较强。其中假设 1 限制了该模型不适合融合不同光照条件下成像的遥感图像,特别是不同季节成像的多时相遥感图像;假设 2 则会在融合图像的强烈边缘处引入较大偏差。

2.2 GCOS 模型

Shettigara 将经过正变换、变量替换以及逆变换这三个步骤获取融合影像的方法统称为分量替换融合法(COS)[25]。Dou 等人从分量替换法数学形式的分析出发,建立通用分量替换模型 GCOS[24]。以 V_{MS}^l 表示以某种方式(DN 值或辐射值)记录的低分辨率 MS 影像数据, V_{MS}^h 表示以同种方式记录的融合结果; I^h 表示以同种方式记录的高分辨率空间分量, I^l 及 V_c 构成变换后的影像数据 V_c , 其中 I^l 是与 I^h 高度相关的分量(替换分量)。令 $\delta = I^h - I^l$, 并将逆变换矩阵的第一列构成的向量记为 W , 则基于线性变换的 COS 方法可表示为

$$V_{MS}^h = V_{MS}^l + W\delta \quad (3)$$

上式即为基于正交变换的分量替换法的数学模型 GCOS。

2.3 统一数学模型

GIF 模型和 GCOS 模型的数学形式非常相似,都指明融合图像由两部分组成,即低分辨率多光谱数据和经过调制的空间细节信息。分析两个模型之间的区别,则有可能在相似的数学模型基础上建立更具一般性的遥感数据像素级融合模型。表 1 列举了 GIF 模型与 GCOS 模型之间的主要区别。需要指出的是,GCOS 模型中高分辨率空间分量不一定是高分辨率的全色数据,最为常见的是经过直方图拉伸的全色数据,或者全色数据与某个多光谱波段的线性组合[26]。综合 GIF 与 GCOS 模型的优缺点,本文提出如下的遥感数据像素级融合的统一数学模型:

$$V_{MS,k}^h(i, j) = V_{MS,k}^l(i, j) + W_k(i, j)\delta(i, j) \quad (4)$$

其中, $V_{MS,k}^h(i, j)$ 为第 k 波段在位置 (i, j) 上的融合结果, $V_{MS,k}^l(i, j)$ 为这一位置上的低分辨率多光谱数据的记录值, $W_k(i, j)$ 为相应的空间细节调制参数, δ 为空间细节信息。

在该模型中,对于给定波段, $W(i, j)$ 是关于空间位置的函数。为避免歧义,图像融合统一框架明确规定,图像融合过程中的空间细节信息 δ

是高分辨率全色数据 V_{PAN}^h 与低分辨率多光谱数据尺度上的全色数据估计值 V_{PAN}^l 之间的差值,即 $\delta = V_{PAN}^h - V_{PAN}^l$ 。

表 1 GIF 与 GCOS 模型对比

Tab. 1 Comparison between GIF and GCOS

	GCOS 模型	GIF 模型
建模途径	对 COS 模型的数学推导	对简化的遥感图像成像方程推导
理论假设	不包含显式的物理假设	包含多个较强的物理假设
调制参数定义	对于单个波段而言是常量,反映的是一定地表类型构成条件下不同波段数据之间的统计信息	不同分辨率的空间分量的比值,反映的是高分辨率对应尺度下每个像元某一邻域内的能量分布
空间细节定义	高、低分辨率空间分量之间的差	全色数据与低分辨率空间分量的差
适用范围	基于正交线性变换的分量替换融合方法(GS, PCA 等);基于细节注入思想的融合方法(HPF 等);不能解释基于非线性变换的分量替换方法以及一些涉及代数乘除的空间域数据融合法	基于非线性变换的融合方法(BT, HPM 等);不能解释采用空间位置无关且不等于 1 的调制参数的融合方法

低分辨率全色数据一般由两种方法获取:

- ① 对高分辨率全色数据进行低滤波等方法估计得到,如 HPM、小波方法等,一般适用于 PAN 与 MS 数据获取条件相近的情况,利于保持光谱特性;
- ② 由多光谱数据通过某种线性组方法得到,如 IHS, PCA 等方法,此类方法可以有效地避免频谱混淆问题。

通过对公式的解释和规定可以看出,一种融合方法就可以由二元组 $\langle W, \delta \rangle$ 惟一确定,由于融合任务中 V_{PAN}^h 已给定,因此也可以由二元组 $\langle W, V_{PAN}^l \rangle$ 刻画。本文提出的像素级数据融合理论框架的基本思想是,通过构建统一的数学模型,将融合方法以相同的数学形式进行表达,从而将融合问题分解为空间细节调制参数构建与空间细节信息提取方式的研究,有助于融合方法之间的比较研究,进而对融合过程的基本假设、融合效果进行分析,并有可能根据实际应用进行融合方法设计。

3 融合方法的统一形式表达

3.1 IHS 变换融合方法

IHS 变换融合方法是融合多源遥感图像最

常用的方法。由于 IHS 方法灵活实用,并且处理速度快,因而被广泛应用,是图像融合领域中一种比较成熟的经典方法^[21]。由于存在多种彩色空间模型,因此 IHS 变换融合方法也有多种对应的形式。比较常见的 IHS 变换形式有球体变换、圆柱体变换、三角形变换和单六角锥变换。IHS 圆柱体变换的正变换形式如下:

$$\begin{pmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{-2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (5)$$

考虑融合过程中对直方图进行均值-方差拉伸的情况,则圆柱体变换在统一框架下的表达为

$$W_k = \frac{\sigma(I)}{\sigma(V_{PAN}^h)} \quad (k=1, 2, 3) \quad (6)$$

$$V_{PAN}^l = \frac{\sigma(V_{PAN}^h)}{\sigma(I)} [I - \mu(I)] + \mu(V_{PAN}^h) \quad (7)$$

其中, $I = \sum_{i=1}^3 V_{MS,i}^l / \sqrt{3}$, $\mu(\cdot)$ 表示均值, $\sigma(\cdot)$ 为标准差。

IHS 三角形变换的正变换形式如下:

$$I = \frac{R+G+B}{3} \quad (8)$$

$$H = \begin{cases} \frac{G-B}{3(I-B)}, & \text{if } B = \min(R, G, B), \\ \frac{B-R}{3(I-R)} + 1, & \text{if } R = \min(R, G, B), \\ \frac{R-G}{3(I-G)} + 2, & \text{if } G = \min(R, G, B). \end{cases} \quad (9)$$

$$S = \begin{cases} 1 - \frac{B}{I}, & \text{if } B = \min(R, G, B), \\ 1 - \frac{R}{I}, & \text{if } R = \min(R, G, B), \\ 1 - \frac{G}{I}, & \text{if } G = \min(R, G, B). \end{cases} \quad (10)$$

考虑融合过程中对直方图进行均值-方差拉伸的情况,则三角形变换在统一框架下的表达为

$$W_k = \frac{V_{MS,k}^l \sigma(I)}{I \sigma(V_{PAN}^h)} \quad (k=1, 2, 3) \quad (11)$$

$$V_{PAN}^l = \frac{\sigma(V_{PAN}^h)}{\sigma(I)} [I - \mu(I)] + \mu(V_{PAN}^h) \quad (12)$$

其中, I 由式(8)定义。

3.2 Brovey 变换融合方法

Brovey 变换融合法(BT)也称为色彩标准化变换融合方法,是一种基于彩色变换的方法^[16]。

BT 融合过程如下:

$$V_{MS,i}^h(x,y) = \frac{V_{PAN}^h(x,y)}{I(x,y)} V_{MS,i}^l(x,y) \quad (13)$$

其中,亮度分量构建方法如下:

$$I = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 V_{MS,i}^l \quad (14)$$

考虑融合过程中对直方图进行均值-方差拉伸的情况,则 Brovey 变换融合法在统一框架下的表达为

$$W_k(i,j) = \frac{V_{MS,k}^l(i,j)}{I(i,j)} \frac{\sigma(I)}{\sigma(V_{PAN}^h)} \quad (k=1,2,3) \quad (15)$$

$$V_{PAN}^l = \frac{\sigma(V_{PAN}^h)}{\sigma(I)} [I - \mu(I)] + \mu(V_{PAN}^h) \quad (16)$$

3.3 主成分变换融合方法

主成分分析(Principal Component Analysis, 简称 PCA)变换,又称为 K-L 变换,是由 Karhunen 和 Loeve 两人对连续随机过程作为级数展开而引出的^[27]。PCA 变换是一种最小均方根误差(RMSE)意义上的最优正交变换。PCA 变换的基本步骤如下:

1. 计算参与融合的多光谱影像的协方差矩阵或相关矩阵 S ;
2. 由 S 计算特征值和特征向量,构建 PCA 正变换矩阵 $\Phi = \{\phi_{ij}\}$,进行 PCA 正变换;
3. 将高空间分辨率影像进行均值-标准差拉伸以匹配第一主成分并替换之;
4. 进行 PCA 逆变换得到融合影像。

PCA 逆变换矩阵 $\Phi^{-1} = \Phi^T$,由于融合过程中需要进行直方图拉伸,因此 PCA 融合法在统一框架下的表达为:

$$W_k = \varphi_{1k} \frac{\sigma(PC1)}{\sigma(V_{PAN}^h)} = \rho(V_{MS,k}^l, PC1) \frac{\sigma(V_{MS,k}^l)}{\sigma(V_{PAN}^h)} \quad (17)$$

$$V_{PAN}^l = \frac{\sigma(V_{PAN}^h)}{\sigma(PC1)} [PC1 - \mu(PC1)] + \mu(V_{PAN}^h) \quad (18)$$

其中, $PC1$ 为 V_{MS}^l 的第一主成分。

3.4 高通滤波融合方法

高通滤波方法^[25, 28]的出现被认为是图像融合领域发展的一个重要转变,其基本思想是向低分辨率数据中注入细节信息,因而可以很大程度上提高融合结果的光谱保持能力,使得融合结果有可能进行进一步的计算机分析。基于高通滤波方法实现多光谱图像融合的基本思想是将较高分辨率影像的高频信息(细节和边缘等)逐像素叠加到低空间分辨率的多光谱影像上。根据高频信息分量叠加方式的不同可以分为不加权高通滤波融

合法(High Pass Filter method, 简称 HPF)和加权高通滤波融合法(High Pass filter Modulation method, 简称 HPM)。

HPF 的融合表达式为

$$V_{MS,i}^h = V_{MS,i}^l + HP(V_{PAN}^h) \quad (19)$$

其中, $HP(V_{PAN}^h)$ 为采用高通滤波器对高空间分辨率全色数据滤波的结果。

考虑融合过程中对直方图进行均值-方差拉伸的情况,则 HPF 融合法在统一框架下的表达为

$$W_k = \frac{\sigma(V_{MS,k}^l)}{\sigma(V_{PAN}^h)} \quad (20)$$

$$V_{PAN}^l = LP(V_{PAN}^h) \quad (21)$$

其中, LP 是用于与高通滤波器对应的低通滤波器对全色数据进行滤波的函数,其与 HP 之间关系为

$$V_{PAN}^h = HP(V_{PAN}^h) + LP(V_{PAN}^h) \quad (22)$$

HPM 采用与 HPF 相同的 V_{PAN}^l 定义(式(21)),改进了 HPF 的调制参数,以 MS 数据与 PAN 低频成分对应位置的比值为权重注入高频信息。HPM 融合过程中无须对低分辨率 PAN 进行直方图拉伸,其空间细节调制参数为

$$W_k(i,j) = \frac{V_{MS,k}^l(i,j)}{V_{PAN}^l(i,j)} \quad (23)$$

3.5 Gram-Schmidt 变换融合方法

Gram-Schmidt 变换(GS)是线性代数和多元统计中常用的方法,它通过对矩阵或多维影像进行正交化,从而可消除冗余信息。它与主成分变换的区别在于主成分变换的第一分量 $PC1$ 包含信息最多,而后面的分量信息含量依次减少,而 Gram-Schmidt 变换产生的各个分量只是正交,各分量的信息量没有明显的多寡区别。GS 变换融合法是一种数学意义比较明确的融合算法,不仅对一次处理的波段数没有限制,而且光谱信息保持能力比较强,是目前公认的一种光谱保持性能比较好的融合算法^[29]。GS 正变换递归过程如下:

$$GS_k = V_{MS,k}^l - \sum_{i=0}^{k-1} \Phi(V_{MS,k}^l, GS_i) GS_i \quad (24)$$

$$\text{其中, } \Phi(V_{MS,j}^l, GS_i) = \frac{\sigma(V_{MS,j}^l, GS_i)}{\sigma^2(GS_i)}$$

GS_0 是对低分辨率全色数据的估计,GS 融合法未规定 GS_0 的构建方法,既可以是高分辨率全色数据的低频成分,也可以是多光谱数据的线性组合。

考虑融合过程中对直方图进行均值-方差拉伸的情况,则 GS 融合方法在统一框架下的表达为

$$W_k = \rho(V_{MS,k}^l, GS_0) \frac{\sigma(V_{MS,k}^l)}{\sigma(V_{PAN}^h)} \quad (25)$$

$$V_{PAN}^h = \frac{\sigma(V_{PAN}^h)}{\sigma(GS_0)} [GS_0 - \mu(GS_0)] + \mu(V_{PAN}^h) \quad (26)$$

3.6 小波融合法

根据统一框架可以看出,各类利用不同小波分解进行图像融合的方法,根本上属于空间细节信息提取的研究,并非完整的融合方法研究。利用小波分解获取空间细节信息后,不同的融合方法采用不同的“细节注入”的方式获取融合图像,Otazu 等人根据细节注入的方式将小波融合法分为三类^[22]:直接注入、通过 IHS 变换注入和通过 PCA 变换注入。在统一框架下,容易证明所谓的“细节注入”方式就是空间细节调制参数,证明过程如下:

令实施细节注入的融合方法在统一框架下的表达为 $\langle W_1, \delta_1 \rangle$, 直接注入的小波融合方法在统一框架下的表达为 $\langle W_2, \delta_2 \rangle$ 。则将小波分解得到的空间细节信息,注入低分辨率多光谱数据第 k 波段的融合结果为

$$\begin{aligned} V_{MS,k}^h &= V_{MS,k}^l + W_{1,k} \delta_1 = \\ &V_{MS}^l + W_{1,k} (I^h - I^l) = \\ &V_{MS}^l + W_{1,k} ((I^l + W_2 \delta_2) - I^l) = \\ &V_{MS}^l + (W_{1,k} W_2) \delta_2 \end{aligned} \quad (27)$$

其中, I^l 为注入算法构建的低分辨率全色数据的估计, I^h 为 I^l 与高分辨率全色数据经直接注入的小波方法融合的结果。由于 W_2 一般为 1 或仅包含直方图拉伸的元素,因此式(27)表明,小波融合方法的调制参数是由注入细节的融合方法决定的。从上文可以看出,调制参数可以以多种方式构建,因此 Otazu 等人根据细节注入方式对小波融合法的分类是不完全的。

4 讨论与结论

统一框架将像素级图像融合问题进行了适当的分解,从而以空间调制参数和空间细节信息提取方式为特征对融合方法进行刻画。在统一框架下进行像素级图像融合的理论意义和实践价值主要表现在以下两个方面:等价性研究、融合方法评价与设计。

4.1 融合算法等价性

分量替换法是最为常见的像素级图像融合方

法,这一类方法都需要经过正变换和逆变换过程,因此融合结果与待融合图像之间的关系不明显。在统一框架下,所有的融合方法都可以由空间调制参数和空间细节信息提取方式进行刻画,因此可以十分方便地进行融合算法等价性的判断。前文提到的基于三角形模型的 IHS 融合法与 BT 融合法,两者的融合过程之间差别非常大,前者属于分量替换法,后者属于空间域融合法。通过比较两者在统一框架下的表达可以发现,两者的调制参数(式(11)和式(15)),以及空间细节提取方式(式(12)和式(16))完全相同,因此这两种方法是完全等价的。实际上,BT 方法虽然是空间域融合法,但其本质是一种基于彩色变换的方法,因此 BT 方法与基于三角形模型的 IHS 方法完全等价是容易理解的。

融合算法等价性判断的另一方面是判断两种融合方法之间是否为从属关系。对比前文 GS 融合法与 PCA 融合法在统一框架下的表达,两者的空间细节调制参数(式(17)和式(25))与空间细节信息(式(18)和式(26))的形式完全相同,惟一的的不同点是 PCA 方法中规定 V_{PAN}^l 为经直方图匹配的 MS 第一主成分 $PC1$ 构建,而 GS 融合法则没有规定 GS_0 的构建方法。因此,PCA 融合法是 GS 融合法的一个特例。

4.2 融合方法评价与设计

数据融合属于病态问题,不可能得到与实际完全相符的解。不同的融合方法得到的融合结果,是从不同角度对高分辨率多光谱信息的估计。目前各类文献中对融合方法的评价,一般采用实例验证的方法,即对于给定数据,将不同方法得到的融合图像的某种指标,如平均梯度、熵、相对偏差、相关系数、UIQI 等,作为融合方法性能的代表,进而进行对比。在统一框架下,则有可能从空间调制参数和空间细节信息两方面对融合方法作出理论上的分析和评价,并进而指导面向应用的融合方法。

一方面,空间细节信息提取的合理性影响融合结果的合理性。空间细节信息提取方式由 V_{PAN}^l 的构建方法决定,目前 V_{PAN}^l 的构建方法主要有两种:滤波方式和线性组合方式。滤波方式将高分辨率 PAN 的低通滤波结果视为 V_{PAN}^l ,如高通滤波方法、金字塔方法和各类小波方法等;线性组合方式通过规定或回归得到的参数,对参与融合的 MS 各波段进行线性组合获取 V_{PAN}^l ,如 IHS

方法、PCA 方法以及其他大多数分量替换方法等。

滤波方式获得的融合结果,其低频分量为 MS 的线性组合,因此其表现出的辐射能量空间分布由 MS 决定;线性组合方式获得的融合结果,其低频分量为 PAN 的低频分量,因此其表现出的辐射能量空间分布由 PAN 决定。由此可知,对于物理意义比较明确的融合过程,如同角度同时相的数据融合,滤波方式更为合理,其结果相对于 MS 的色彩偏差和光谱扭曲均较小,适合于如影像制作和定量分析等应用。结合在统一框架下对 PCA 和 GS 融合法之间关系的判断,可以看出,此类应用中基于滤波方式的 GS 融合法优于 PCA 融合法。对于物理意义不太明确的融合过程,如雷达数据与可见光数据的融合,或通过多时相数据融合进行变化检测等,则线性组合方式更有利于表达不同来源数据之间的差异,因此在雷达数据与可见光数据融合等应用中,广泛使用 IHS 和 PCA 融合法。

另一方面,空间细节调制参数决定了对 MS 空间增强的程度。空间细节调制参数从构建方法上也可以分为两类:基于先验知识的方法和基于图像特征的方法。目前常用的融合方法大多数属于基于图像特征的方法,即通过对 MS 与 PAN 之间数学关系的计算,作为对高分辨率 MS 与 PAN 之间关系的估计,如前文提到的 GS,PCA,HPM 等方法均属此列。对基于图像特征的空间细节调制参数的结构进行分析,不仅可以判断该融合方法的空间增强程度,还可以判断所采用的基本假设,以便讨论其合理性。受篇幅限制,本文不讨论空间细节调制参数的结构问题。基于先验知识的方法目前并不常见,就遥感图像融合而言,先验知识主要包括传感器特性、地表特性、成像条件等,如文献[22],文献[24]利用传感器光谱响应函数进行图像融合的方法。此外,利用 GIS 数据或分类结果进行空间细节调制参数的设计也是可能的途径。由于在空间细节调制参数的构建过程中避免了图像运算,因此根据先验知识的方法可以极大地提高运算速度。

通过以上讨论可以看出,在统一理论框架下对融合问题进行研究和探讨,不仅可以改变目前图像融合领域纷繁芜杂的局面,而且以理论分析取代实例验证进行融合方法性能评价。除此之外,根据图像融合方法在统一框架下的表达,融合

结果可以直接以数组运算的方式给出,避免了目前这些融合方法实现中的正变换、逆变换过程,或递归过程。根据统一理论框架进行表达的融合算法,其算法复杂度与传统实现方法相比大大降低,因此,统一理论框架可以作为现有融合方法快速算法设计的工具。下一步将分别对空间细节调制参数结构分析与设计、空间细节信息提取等问题进行深入研究,进一步充实和完善本文提出的遥感影像像素级融合统一理论框架。

参考文献:

- [1] POHL C, VAN GENDEREN J L. Multisensor Image Fusion in Remote Sensing: Concepts, Methods and Applications[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(5): 823-854.
- [2] WALD L. Some Terms of Reference in Data Fusion[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions, 1999, 37(3): 1190-1193.
- [3] ZHANG Yu-jin. Image Engineering in China and Some Current Research Focuses[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2002, 14(6): 489-500. (章毓晋. 中国图像工程及当前的几个研究热点[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(6): 489-500.)
- [4] MALLAT S G. Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674-693.
- [5] DAUBECHIES I. Ten Lectures on Wavelets[M]. Philadelphia: [s. n.], 1992.
- [6] CHOI M, KIM R Y, NAM M R, KIM H O. Fusion of Multispectral and Panchromatic Satellite Images Using the Curvelet Transform [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005, 2(2): 136-140.
- [7] MATSOPOULOS G K, MARSHALL S, BRUNT J N H. Multiresolution Morphological Fusion of MR and CT Images of the Human Brain[A]. Vision, Image and Signal Processing, IEEE Proceedings [C]. [s. l.]: [s. n.], 1994. 137-142.
- [8] LI Z H, JING Z L, YANG X H, SUN S Y. Color Transfer Based Remote Sensing Image Fusion Using Non-Separable Wavelet Frame Transform [J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(13): 2006-2014.
- [9] GONZALEZ-AUDICANA M, SALETA J L, CATALAN R G, GARCI A R. 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.
- [10] LI Zhen-hua, JING Zhong-liang, SUN Shao-yuan, LIU Gang. Remote Sensing Image Fusion Based on Steerable Pyramid Frame Transform[J]. Acta Optica Sinica, 2005,

- 25(5): 598-602. (李振华, 敬忠良, 孙韶媛, 刘 刚. 基于方向金字塔框架变换的遥感图像融合算法[J]. 光学学报, 2005, 25(5): 598-602.)
- [11] PETROVIC V S, XYDEAS C S. Gradient-Based Multi-resolution Image Fusion [J]. Image Processing, IEEE Transactions, 2004, 13(2): 228-237.
- [12] ALPARONE L, AIAZZI B, BARONTI S, *et al.* Spectral Information Extraction from Very-high Resolution Images through Multiresolution Fusion[A]. Image and Signal Processing for Remote Sensing X[C]. Bellingham:SPIE,2004.
- [13] AIAZZI B, BARONTI S, SELVA M, *et al.* Spectral Information Extraction by Means of Ms+Pan Fusion[A]. European Space Agency (Special Publication), ESA SP, 2004[C/CD]. Madrid:[s. n.],2004.
- [14] 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): 3 821-3 833.
- [15] NUNEZ 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): 1 204-1 211.
- [16] 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): 3 461-3 472.
- [17] GONG Peng, LI Xia, XU Bing. Interpretation Theory and Application Method Development for Information Extraction from High Resolution Remotely Sensed Data[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(1): 1-5. (宫 鹏, 黎 夏, 徐 冰. 高分辨率影像解译理论与应用方法中的一些研究问题[J]. 遥感学报, 2006, 10(1): 1-5.)
- [18] 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.
- [19] TU T M, SU S C, SHYU H C, HUANG P S. A New Look at IHS-Like Image Fusion Methods[J]. Information Fusion, 2001, 2(3): 177-186.
- [20] SCHOWENGERDT R A. Remote Sensing , Models and Methods for Image Processing[M] San Diego: Academic Press, 1997. 522.
- [21] TU T M, HUANG P S, HUNG C L, CHANG C P. 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.
- [22] OTAZU X, GONZALEZ-AUDICANA M, FORS O, NUNEZ J. Introduction of Sensor Spectral Response into Image Fusion Methods. Application to Wavelet-Based Methods[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions, 2005, 43(10): 2 376-2 385.
- [23] WANG Z, ZIOU D, ARMENAKIS C, LI D, LI Q. A Comparative Analysis of Image Fusion Methods[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions, 2005, 43(6): 1 391-1 402.
- [24] DOU W, CHEN Y, LI X, SUI D Z. A General Framework for Component Substitution Image Fusion; An Implementation Using the Fast Image Fusion Method[J]. Computers & Geosciences, 2007, 33(2): 219-228.
- [25] 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.
- [26] CARPER W J, LILLESAND T M, KIEFER R W. The Use of Intensity-Hue-Saturation Transformations for Merging SPOT Panchromatic and Multispectral Image Data [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1990, 56(4): 459-467.
- [27] CHAVEZ P S, SIDES S C, ANDERSON J 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.
- [28] CHAVEZ P S, KWARTENG A Y. Extracting Spectral Contrast in Landsat Thematic Mapper Image Data Using Selective Principal Component Analysis[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1989, 55 (3): 339-348.
- [29] LI C, LIU L, WANG J, *et al.* Comparison of Two Methods of the Fusion of Remote Sensing Images with Fidelity of Spectral Information[A]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS' 04)[C]. Anchorage:[s. n.],2004.

(责任编辑:雷秀丽,郭新新)

收稿日期: 2008-03-05

修回日期: 2008-10-15

第一作者简介: 窦 闻(1980-),男,讲师,主要研究方向为遥感数据融合和遥感信息提取。

First author : DOU Wen(1980-), male, lecturer, majors in remotely sensed data fusion and information extraction.