

基于多分辨率分析的 GF-5 和 GF-1 遥感影像空—谱融合

孟祥超¹, 孙伟伟², 任凯², 杨刚², 邵枫¹, 符冉迪¹

1. 宁波大学 信息科学与工程学院, 宁波 315211;

2. 宁波大学 地理与空间信息技术系, 宁波 315211

摘要: 针对空间分辨率比率较大尺度差异下的高分五号 (GF-5) 与高分一号 (GF-1) 卫星影像的空—谱融合问题, 提出多传感器影像融合策略: 一方面, 通过现有空—谱融合方法的分步融合得到融合影像; 另一方面, 在分步融合理论基础上, 推导得出一体化融合基础框架, 并进一步提出基于多分辨率分析的多传感器一体化融合方法, 缓解现有方法因空间分辨率比率过大导致影像空、谱互补信息难以有效集成的问题。其中, 提出的一体化融合方法基于调制传递函数 MTF (Modulation Transfer Function) 滤波对多传感器影像空间 (高频) 和光谱 (低频) 分量进行分解提取, 并充分考虑多传感器高空间分辨率影像与高光谱分辨率影像之间的关系, 以及高光谱分辨率影像波段间关系, 设计合理的融合权重, 最终可得到具有最高空间分辨率和最高光谱分辨率的融合影像。通过 GF-1 全色影像、GF-1 多光谱影像、GF-5 高光谱影像数据对提出方法进行实验验证, 结果表明: 本文方法可有效集成多传感器影像间的空、谱互补信息, 得到较优融合结果。

关键词: 遥感, 高分五号 (GF-5), 空—谱融合, 大空间分辨率差异, 多传感器

引用格式: 孟祥超, 孙伟伟, 任凯, 杨刚, 邵枫, 符冉迪. 2020. 基于多分辨率分析的 GF-5 和 GF-1 遥感影像空—谱融合. 遥感学报, 24(4): 379–387

Meng X C, Sun W W, Ren K, Yang G, Shao F and Fu R D. 2020. Spatial-spectral fusion of GF-5/GF-1 remote sensing images based on multiresolution analysis Journal of Remote Sensing (Chinese), 24(4): 379–387 [DOI: 10.11834/jrs.20209214]

1 引言

近年来, 国产高分卫星得以迅猛发展, 其中高分五号 (GF-5) 卫星 (刘银年, 2018) 可见短波红外高光谱相机作为国际首台宽谱段覆盖的高光谱相机, 其空间分辨率为 30 m, 光谱分辨率为 5—10 nm, 光谱范围为 400—2500 nm, 共 330 个连续谱段。此外, 国产高分一号 (GF-1) 卫星同时提供全色影像和多光谱影像, 空间分辨率分别为 2 m 和 8 m, 但其光谱分辨率相对较低。因此, 如何有效集成两者优势, 得到 2 m 空间分辨率的高光谱影像, 这无疑将进一步提升高分五号卫星影像的应用潜力和价值。

空—谱融合 (张良培和沈焕锋, 2016; 孟祥超, 2017) 旨在缓解卫星成像系统在高空间分辨率和高光谱分辨率方面相互制约的限制, 通过集成同一区域多源遥感影像间的空、谱互补优势, 融合得到同时具有高空间分辨率和高光谱分辨率的遥感影像。现有空—谱融合正面临着影像间空间分辨率比率越发增大的挑战。这一方面由于现有空—谱融合方法 (全色/多光谱融合、全色/高光谱融合或多光谱/高光谱融合) 大多基于空间分辨率比率为 2 倍或 4 倍关系 (Cetin 和 Musaoglu, 2009; Yokoya 等, 2012; Loncan 等, 2015), 对空间分辨率比率较大情况下的空—谱融合问题考虑不足; 另一方面由于波段信噪比、数据存储、成

收稿日期: 2019-06-21; 预印本: 2019-11-06

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 41801252, 41971296, 41671342); 浙江省自然科学基金 (编号: LR1901D0001, LQ18D010001)

第一作者简介: 孟祥超, 1989 年生, 男, 讲师, 研究方向为遥感影像融合理论方法和应用。E-mail: mengxiangchao@nbu.edu.cn

通信作者简介: 孙伟伟, 1985 年生, 男, 教授, 研究方向为地理信息系统理论和方法、高光谱遥感理论和海岸带监测技术。E-mail: sunweiwei@nbu.edu.cn

像幅宽等方面的限制,拥有几十甚至几百个光谱波段的星载高光谱影像空间分辨率往往较低,而目前星载全色影像和多光谱影像的空间分辨率越来越高,因此,需发展面向大空间分辨率差异下的空一谱融合方法。针对大空间分辨率差异下的空一谱融合问题,一种有效的融合策略为引入中间空间分辨率比率层次的影像,充分利用3个或更多传感器影像间的互补信息,弥补因空间分辨率比率过大导致影像间空、谱信息难以有效集成的难题。针对多传感器影像融合,分步融合为有效策略之一,即高光谱分辨率影像依次与临近空间分辨率层次的高分影像进行融合,通过分步逐层融合,最终得到具有最高空间分辨率和高光谱分辨率的融合影像,可采用的融合算法主要有成分替换类融合方法、多分辨率分析融合方法、基于变分优化的融合方法,以及基于深度学习的融合方法(Vivone等,2015; Meng等,2019)。其中,成分替换类融合方法和多分辨率分析融合方法应用最为广泛,成分替换类融合方法主要基于高空间分辨率影像替换高光谱分辨率影像空间分量的方式增强高光谱分辨率影像的空间信息,代表性方法包括IHS(Intensity Hue Saturation)融合方法(Tu等,2001; Xu等,2009)、PCA(Principal Component Analysis)融合方法(Chavez等,1991)、GS(Gram Schmidt)融合方法(Laben和Brower,2000)等。多分辨率分析融合方法主要基于小波变换、拉普拉斯金字塔等提取高空间分辨率影像的空间结构信息,并将其注入到高光谱分辨率影像中增强其空间细节信息,代表性方法有AWLP(Additive Wavelet Luminance Proportional)融合方法(Otazu等,2005)、MTF-GLP(Generalized Laplacian pyramid)融合方法(Aiazzi等,2006)等。相比于成分替换类融合方法,多分辨率分析融合方法往往具有更好的光谱保真度,受多源影像间的辐射差异影响相对较小。基于变分优化的融合方法(Shen等,2016; Meng等,2019)基于变分理论,通过建立融合模型,并通过迭代优化求解得到融合影像。该类融合方法融合精度往往较高,且对复杂问题的建模较为灵活,但其融合效率较低,目前不适用于工程应用。基于深度学习的融合方法基于深度学习理论(Huang等,2015; Zhu等,2017),于近年来提出并引起广泛关注,但其建立

在大量数据集训练的基础上。尽管分步融合可缓解大空间分辨率差异下影像间空间、光谱互补信息难以有效集成的难题,但一方面分步融合存在各步融合方法选择的不定性,另一方面分步融合易引入误差累计。因此,针对该问题,少数学者提出多传感器一体化融合方法,如Shen(2012)基于变分理论,提出多传感器融合框架,Meng等(2015)、孟祥超(2017)、Shen等(2016)在该基础上进一步扩展,发展了多传感器时一空一谱一体化融合方法,但该类方法效率较低,尤其针对大幅图像难以开展实际应用。

因此,本文针对上述问题提出多传感器空一谱融合方法与策略,在分步融合理论基础上,通过公式推导得出一体化融合基础框架,并进一步提出基于多分辨率分析的多传感器一体化融合方法。方法设计中采用MTF滤波对多传感器影像空间(高频)和光谱(低频)分量进行有效分解与提取,并充分考虑多传感器高空间分辨率影像与高光谱分辨率影像之间的关系,以及高光谱分辨率影像波段内部之间的关系,设计合理的融合权重,通过GF-1全色、多光谱、GF-5高光谱影像融合得到具有GF-1全色影像空间分辨率的GF-5高光谱影像。

2 一体化融合模型

本文通过多传感器分步融合理论公式推导得到一体化融合理论框架,该融合框架可将多传感器影像一次性输入,通过融合得到具有最高空间分辨率的高光谱分辨率输出影像。此外,本文在此框架基础上,进一步提出基于多分辨率分析的多传感器影像空一谱融合方法。

为表示方便,将融合影像表示为 x ,高光谱分辨率影像表示为 y ,高空间分辨率多传感器影像集合表示为 $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_N\}$,其中 $z_1, z_2, \dots, z_N$ 的空间分辨率由低到高排列,主要包括全色影像或多光谱影像, N 为影像个数,融合目的是得到具有 y 影像高光谱分辨率和 $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_N\}$ 中最高空间分辨率的融合影像。则分步融合过程可表示为

$$x^{(z_1)} = (y)^{\uparrow z_1} + w_1 z_1^h \quad (1)$$

式中, $x^{(z_1)}$ 为具有 z_1 空间分辨率的融合影像, $(y)^{\uparrow z_1}$ 为将高光谱分辨率影像上 y 采样到 z_1 空间分辨率大

小, $\uparrow$ 表示上采样操作, z_1^h 为高空间分辨率影像 z_1 的高频结构信息, w_1 为高频信息注入权重。

按照上述步骤, 依次将融合结果与 $z_2, \dots, z_N$ 进行融合, 表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^{(z_2)} &= (\mathbf{x}^{(z_1)})^{\uparrow z_2} + w_2 z_2^h = \\ &((\mathbf{y})^{\uparrow z_1} + w_1 z_1^h)^{\uparrow z_2} + w_2 z_2^h \approx \\ &(\mathbf{y})^{\uparrow z_2} + w_1 (z_1^h)^{\uparrow z_2} + w_2 z_2^h \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{x}^{(z_2)}$ 为在第一步 z_1 融合结果基础上与 z_2 进行融合得到具有 z_2 空间分辨率的融合影像, $(\mathbf{y})^{\uparrow z_2}$ 为将影像 $\mathbf{y}$ 上采样到 z_2 空间分辨率大小, $(z_1^h)^{\uparrow z_2}$ 为将 z_1^h 上采样到 z_2 空间分辨率, z_2^h 为高空间分辨率影像 z_2 的高频结构信息, w_2 为 z_2 高频信息的注入权重。依次类推, 将高光谱分辨率影像 $\mathbf{y}$ 融合得到 z_N 空间分辨率影像表示为

$$\mathbf{x}^{(z_N)} = (\mathbf{y})^{\uparrow z_N} + w_1 (z_1^h)^{\uparrow z_N} + w_2 (z_2^h)^{\uparrow z_N} + \dots + w_{N-1} (z_{N-1}^h)^{\uparrow z_N} + w_N z_N^h \quad (3)$$

因此, 多传感器影像的分步融合策略可化简为式 (3) 的统一形式。由式 (3) 可以看出, 多传感器影像的分步融合可通过式 (3) 进行一体化融合。其关键在于对多源遥感影像空间和光谱信息进行有效分解与融合集成, 即如何有效提取各高分影像的高频信息和设计合理的高频信息注入权重。基于此, 本文进一步提出基于多分辨率分析的多传感器空一谱一体化融合方法。方法步骤如下:

输入: GF-5 高光谱影像 $\mathbf{y}$, GF-1 全色、多光谱高空间分辨率影像集合 $\mathbf{Z} = \{z_1, z_2, \dots, z_N\}, N = 2$ 。

步骤1: 预处理。以高光谱影像 $\mathbf{y}$ 为基准影像, 对影像 $\mathbf{Z}$ 进行几何和辐射归一化处理。

步骤2: 高频信息分解。基于 MTF 滤波, 对 $\mathbf{Z}$ 中影像进行高频信息分解。

步骤3: 融合权重计算。高频信息注入权重由整体权重和波段权重两部分组成, 其中, 整体权重为 $\mathbf{Z} = \{z_1, z_2, \dots, z_N\}$ 中各影像对 $\mathbf{y}$ 的整体贡献度大小, z_n 与 $\mathbf{y}$ 间相关性越大, 所含空间细节信息越丰富, 其权重则越大; 波段权重表示影像 $\mathbf{y}$ 每个波段分配的高频信息大小, 由 $\mathbf{y}$ 波段间相关性计算得到。

步骤4: 融合影像计算。以 $\mathbf{x} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_B\}$ 表示融合影像, $\mathbf{x}_b$ 为融合影像的第 b 个波段, B 为总的波段数。表示为 $\mathbf{x}_b =$

$$(\mathbf{x}_b)^{\uparrow z_N} + \sum_{n=1}^N w_n C_{n,q,b} (z_{n,q}^h)^{\uparrow z_N}, \text{ 其中, } z_{n,q}^h \text{ 为 } \mathbf{Z} \text{ 集合第 } n \text{ 个影像的第 } q \text{ 波段的高频信息, 由步骤2计算得到, } C_{n,q,b} \text{ 为波段权重, } w_n \text{ 为整体权重, 由步骤3计算得到。}$$

输出: 具有 GF-1 全色影像空间分辨率的 GF-5 高光谱融合影像。

2.1 预处理

考虑到多传感器影像在传感器姿态、角度、大气条件, 以及获取时间等方面可能存在一定程度的差异, 需对多传感器遥感影像进行几何和辐射归一化处理。对于几何归一化处理, 以其中一幅影像为基准影像, 对其他各影像进行几何配准。对于辐射归一化处理, 本文基于矩匹配缓解各传感器影像间的辐射差异, 表示为

$$\hat{\mathbf{O}}_i = \frac{(\mathbf{O}_r)_{\text{std}}}{(\mathbf{O}_i)_{\text{std}}} \times (\mathbf{O}_i - (\mathbf{O}_i)_{\text{mean}}) + (\mathbf{O}_r)_{\text{mean}} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{O}_r$ 表示参考影像, $\mathbf{O}_i$ 为待处理目标影像, 下标 std 表示标准差, 下标 mean 表示均值。为保持高光谱分辨率影像的光谱信息不变, 以高光谱分辨率影像为参考影像, 对其他高空间分辨率影像进行归一化处理, 考虑到不同传感器影像与参考影像在空间和光谱维度上的差异, 对参考影像进行空间和光谱维度的预处理。在空间维度上, 基于各目标影像, 将高光谱参考影像针对性上采样; 在光谱范围上, 基于高空间分辨率影像光谱覆盖范围, 选择范围覆盖内的高光谱分辨率影像相应波段取均值进行光谱维度降采样, 得到与各目标影像相同空间尺度和光谱波段数的参考影像。

2.2 高频信息分解

为了充分利用多传感器影像的空间、光谱互补信息, 其前提是进行各影像空间 (高频)、光谱 (低频) 分量的提取。目前, 已提出大量方法, 如基于小波的方法、基于拉普拉斯金字塔方法, 以及基于 MTF 滤波的方法等, 其中基于 MTF 滤波方法考虑传感器物理参数, 可有效进行影像的空间、光谱信息的分解, 已被普遍认可为较优方法, 因此, 本文基于传感器 MTF 滤波 (Aiazzi 等, 2006; Vivone 等, 2015) 有效提取影像空间分量。表示为

$$z^h = z - \mathbf{F} * z \quad (5)$$

式中, z^h 为影像 z 的高频信息, $\mathbf{F}$ 为 MTF 滤波, $*$ 表示卷积操作。在实际应用中, 通常采用高斯滤波逼近 MTF 滤波, 其定义为

$$\text{MTF}(\theta) = k \exp \left(- \left(\frac{\theta - \mu}{\sqrt{2} \sigma} \right)^2 \right) \quad (6)$$

式中, θ 为归一化采样频率, μ, k, σ 为待定参数, 根

据MTF曲线的对称性得 $\mu = 0$, 由MTF曲线在零频处的逼近条件 $MTF(0) = 0$, $k=1$ 。 σ 根据传感器物理参数求得, 表示为 $\sigma = \sqrt{-(N \times (\xi/2))^2 / 2 \lg(\varepsilon)}$ 。 ξ 通常设置为 $1/r$, r 为影像间的空间分辨率比率, ε 为各波段影像对应的Nyquist频率, N 为窗口大小。

2.3 融合权重计算

充分考虑高空间分辨率多传感器影像与高光谱分辨率影像间关系, 以及高光谱分辨率影像波段内部间关系合理设计权重函数。权重函数由整体权重与波段权重组成, 其中, 整体权重为高分影像集合 $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_N\}$ 对高光谱分辨率影像 y 的整体贡献度大小, z_n 与 y 间相关性越大, 且所含空间细节信息越丰富, 其权重则越大; 波段权重表示高光谱影像 y 每个波段分配的高频信息大小, 由 y 波段间相关性计算得到。其中, 整体权重表示为

$$w_n = (G'_n \times R'_n \times U_n) / \sum_{n=1}^N (G'_n \times R'_n \times U_n) \quad (7)$$

式中, w_n 表示第 n 个影像 z_n 对融合影像的整体贡献度大小, 影像 z_n 与高光谱分辨率影像间的相关性越大, 所含空间细节信息越丰富, 其权重则越大。

其中, $G'_n = G_n / \sum_{n=1}^N G_n$ 为归一化梯度, G_n 表示 z_n 的平均梯度, 影像梯度越大, 空间细节信息越丰富, 其高频信息对融合影像的贡献度越大。 $R'_n = \log_2(R_n) / \sum_{n=1}^N \log_2(R_n)$ 为归一化空间分辨率比率, 其中, R_n 为第 n 个高分影像 z_n 与高光谱分辨率影像 y 之间的空间分辨率比率, 空间分辨率比率越大, z_n 空间分辨率越高, 其对应的权重越大。 U_n 为第 n 个高分影像 z_n 与高光谱分辨率影像 y 间的相关性大小, 考虑不同传感器影像间灰度值范围差异的影响, 基于通用评价指标UIQI (Universal Image Quality

Index) (Wang和Bovik, 2002) 计算得到。

考虑到高光谱分辨率影像波段内部之间的关联与差异, 进一步计算高光谱影像每个波段的高频信息分配权重, 由高光谱影像波段间相关性计算得到, 表示为

$$C_{n,q,b} = \frac{\text{cov}((y_b) \uparrow^{z_n}, I_{n,q}) / \text{var}(I_{n,q})}{\sum_{b=1}^{B_{n,q}} (\text{cov}((y_b) \uparrow^{z_n}, I_{n,q}) / \text{var}(I_{n,q}))} \quad (8)$$

式中, $C_{n,q,b}$ 为第 n 个高分影像的第 q 个波段对融合影像第 b 个波段的权重, $I_{n,q}$ 表示亮度分量, 由被高分影像波段 $z_{n,q}$ 光谱范围覆盖内的高光谱分辨率影像波段取均值得到, 可近似表示高分影像波段 $z_{n,q}$ 的降分辨率影像, 高光谱影像波段与亮度分量相关性越大, 在保持其光谱信息的同时可注入的空间信息越多, 其权重越大。 $\text{cov}(\cdot)$ 表示协方差, $\text{var}(\cdot)$ 为方差。

3 融合实验

基于高空间分辨率GF-1全色影像、中空间分辨率GF-1多光谱影像、低空间分辨率GF-5高光谱影像进行融合实验, 为充分验证融合方法的有效性, 基于两组典型区域数据进行实验, 如表1所示。其中, GF-1全色影像空间分辨率为2 m, 多光谱影像空间分辨率为8 m, 具有4个光谱波段, GF-5高光谱影像空间分辨率为30 m, 具有330个波段, 实验中去除受水汽吸收影响较大波段, 选用168个波段进行融合实验, 实验一中GF-1影像获取时间为2018-05-14, GF-5影像获取时间为2018-06-01, 影像位于城区, 地物类型复杂多样, 包括建筑物、道路、水体、植被等多种地物。实验二中GF-1影像获取时间为2018-10-07, GF-5影像获取时间为2018-10-06, 地物类型以植被和河流为主。

表1 融合实验数据
Table 1 The experimental data

传感器	空间分辨率/m	光谱分辨率	获取时间
GF-1全色	2	0.45—0.90 μm , 1波段	实验一 2018-05-14
GF-1多光谱	8	0.45—0.89 μm , 4波段	实验二 2018-10-07
GF-5高光谱	30	0.4—2.5 μm , 330波段	实验一 2018-06-01 实验二 2018-10-06

此外，为验证融合方法的有效性，从定性和定量两方面对融合方法进行评价分析。定性评价主要以视觉角度评价融合影像的空间锐化和光谱保持，定量评价由于无真实参考影像，基于Wald协议 (Wald, 2000)，将融合影像进行空间降采样，以原始高光谱分辨率影像作为参考影像进行光谱保真度评价。采用影像融合中常用定量评价指标 (Meng 等, 2019)，包括相关系数 CC (Correlation Coefficient)、结构相似性指标 SSIM (Structural Similarity)、峰值信噪比 PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio)、相对全局误差 ERGAS (relative dimensionless global error in synthesis)、光谱角 SAM (Spectral Angle Mapper)、Q 指数 6 个评价指标进行评价。基于现有 GS 融合方法、PCA 融

合方法、MTF_GLP 融合方法进行分步融合，以及统一框架融合策略进行融合实验，并对两种多传感器融合策略进行比较分析。

图 1 为实验一结果，其中图 1 (a) 为 GF-1 全色影像，图 1 (b) 为 GF-1 多光谱影像，图 1 (c) 为 GF-5 高光谱影像。图 1 (d) —图 1 (f) 为不同融合方法通过多传感器分步融合策略得到的实验结果，图 1 (g) 为统一融合框架一体化融合策略得到的融合结果。从图 1 中可以看出，PCA 分步融合方法和 GS 分步融合方法具有清晰的空间纹理信息，但其存在较大的光谱扭曲，MTF-GLP 分步融合与基于 MTF 滤波的一体化融合策略在目视上差别不大，具有相似的空间信息和光谱保真度。表 2 定量评价结果显示基于 MTF 滤波的一体化融合结果多数评价指标最优，其光谱保真性更好。

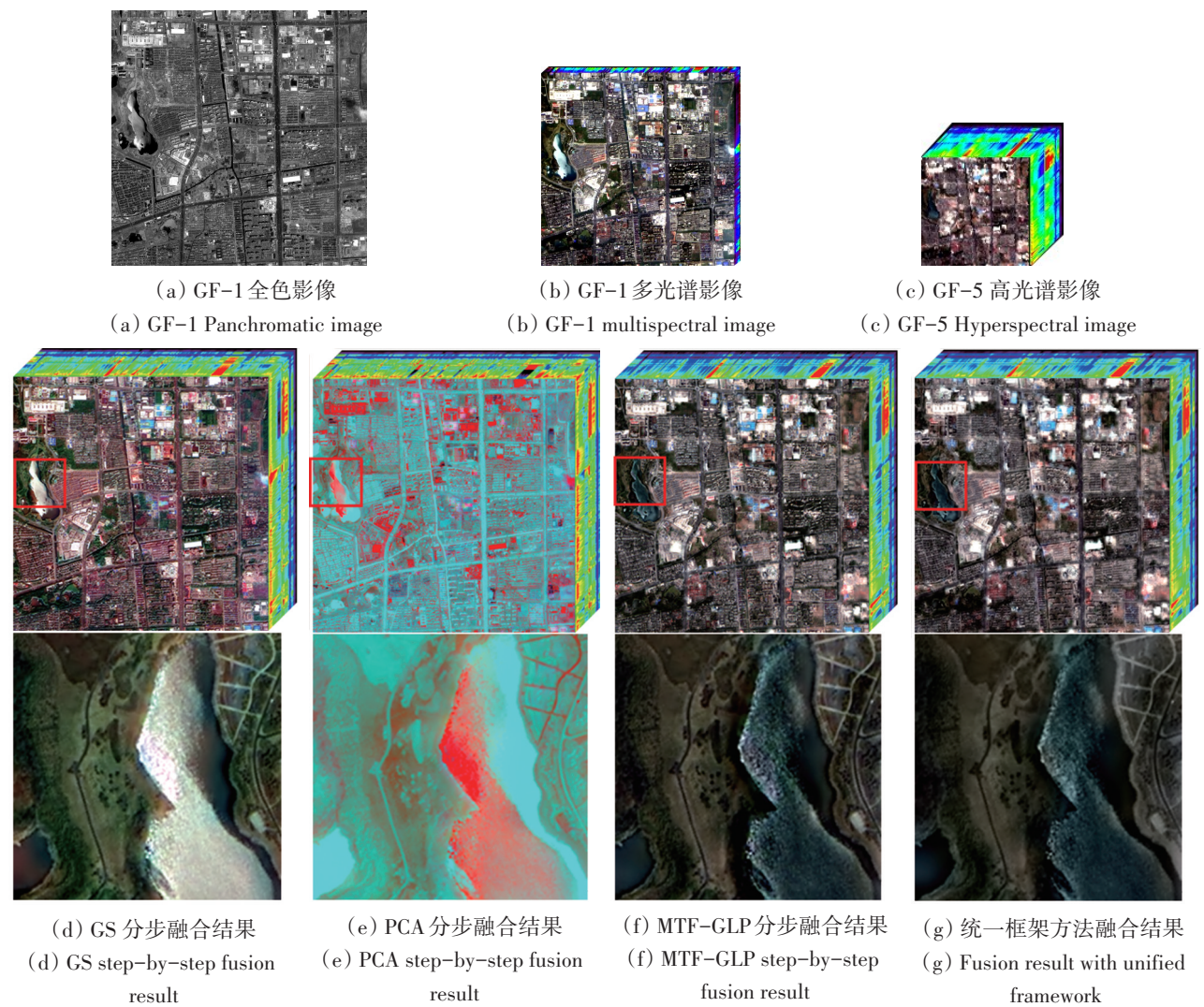


图 1 实验一多传感器融合实验结果
Fig. 1 The multi-sensor fusion results in the experiment 1

表2 融合结果定量评价
Table 2 The quantitative evaluation results

评价指标	GS分步融合	PCA分步融合	MTF-GLP分步融合	一体化融合
CC	0.770	0.627	0.971	0.984
PSNR	70.506	63.083	79.264	79.023
SSIM	0.998	0.992	0.999	0.999
ERGAS	3.610	5.789	1.344	1.308
SAM	3.777	6.775	1.431	1.127
Q指数	0.732	0.287	0.963	0.979

图2为基于实验数据二的融合结果，从图2中可以看出，GS和PCA融合方法均存在严重的光谱扭曲，其中以PCA融合结果光谱畸变最为严重，MTF-GLP分步融合策略和一体化融合策略均具有较好的光谱保持特性，表3定量评价结果显示，一体化融合策略融合结果稍好。

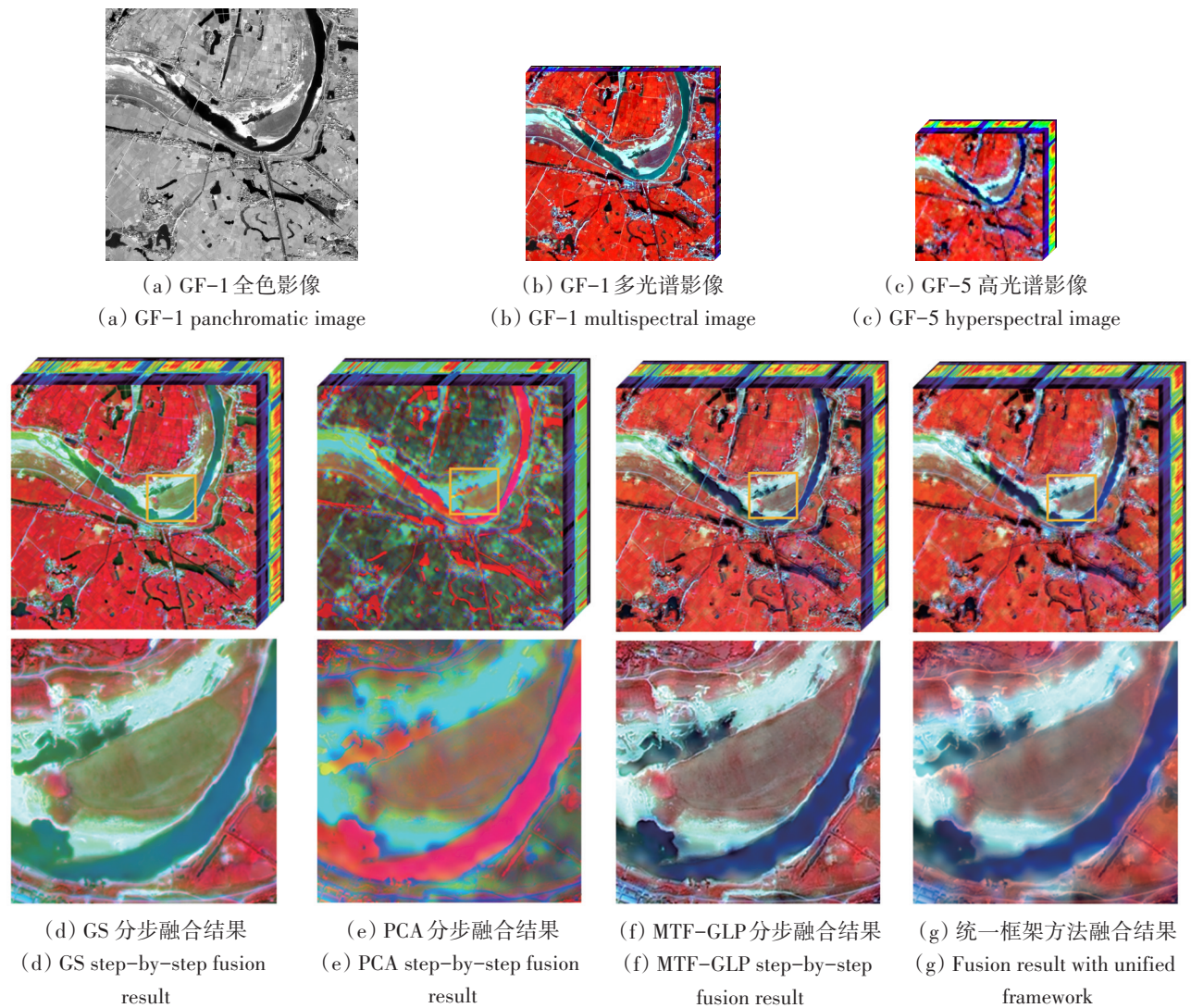


图2 实验二多传感器融合实验结果
Fig. 2 The multi-sensor fusion results in the experiment 2

表3 融合结果定量评价
Table 3 The quantitative evaluation results

评价指标	GS分步融合	PCA分步融合	MTF-GLP分步融合	一体化融合
CC	0.827	0.643	0.977	0.988
PSNR	6.328	3.782	13.969	18.646
SSIM	0.626	0.058	0.916	0.956
ERGAS	4.419	8.554	1.695	1.301
SAM	4.319	8.788	1.564	0.997
Q指数	0.786	0.018	0.969	0.985

4 讨 论

(1) 星载高空间分辨率全色、多光谱影像的空间分辨率从十米级到米级再到分米级，其空间分辨率越来越高，而星载高光谱影像受波段维数的限制，其空间分辨率受到限制，因此，全色/多光谱影像与高光谱影像的融合面临空间分辨率尺度差异愈发增大的挑战，需发展大空间分辨率差异下的空一谱融合方法。

(2) 针对大空间分辨率差异下的空一谱融合，直接融合易产生较大信息损失，而多传感器分步融合为有效策略之一，其具有方法选择灵活、且现有融合方法可选择性多的优势，但同样面临着每步融合中方法选择的不定性与可能存在的误差累计，尤其不同遥感应用往往需选择不同的融合方法。此外，如何克服分步融合中的误差传递需设计合理的方法，本文认为分步融合中误差累计的量化包括空间传递误差和光谱传递误差，对于空间传递误差主要在于多传感器间的空间配准误差，需进行多传感器影像的高精度配准；对于光谱传递误差，可通过计算各步融合影像与高光谱分辨率影像的光谱角等定量评价指标进行量化，并通过误差补偿机制进行消除。

(3) 一体化融合将多传感器影像一起输入，并一次性输出具有最高空间分辨率和最高光谱分辨率的融合影像，具有整体性特点，可一定程度上避免分步融合中的误差累计，但存在以下问题亟需解决：

1) 大空间分辨率差异下的高分影像的一体化融合对多源影像间的配准精度要求更高，因此，需发展多传感器影像的联合配准方法；

2) 光学影像获取过程中难免受云覆盖的影响，大空间分辨率差异下云覆盖光学影像的一体

化融合算法复杂性高；

3) 大空间分辨率差异下多传感器融合，由于难以获取参考影像，需发展无参考质量评价方法，以有效评估融合影像。

5 结 论

针对空间分辨率比率较大尺度差异下 GF-5 与 GF-1 卫星影像的空一谱融合问题，提出多传感器融合方法与策略，弥补空间分辨率比率较大尺度差异下多源影像间空、谱信息难以有效集成的不足。一方面，引入中间空间分辨率层次高分影像，通过分步融合逐步提升高光谱分辨率影像的空间分辨率；另一方面，在分步融合理论基础上，推导出多传感器影像统一融合基础框架，并进一步提出基于多分辨率分析的多传感器一体化融合方法。通过 GF-1 全色影像、GF-1 多光谱影像、GF-5 高光谱影像数据进行融合实验，实验结果表明，多传感器空一谱融合方法可有效集成影像间空、谱互补信息，得到具有最高空间分辨率和最高光谱分辨率的融合影像。

参考文献(References)

Aiazzi B, Alparone L, Baronti S, Garzelli A and Selva M. 2006. MTF-tailored multiscale fusion of high-resolution MS and Pan imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72(5): 591-596 [DOI: 10.14358/PERS.72.5.591]
Cetin M and Musaoglu N. 2009. Merging hyperspectral and panchromatic image data: qualitative and quantitative analysis. International Journal of Remote Sensing, 30(7): 1779-1804 [DOI: 10.1080/01431160802639525]
Chavez Jr P S, Sides S C and Anderson J A. 1991. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: landsat TM and SPOT panchromatic. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 57(3): 295-303 [DOI: 10.1306/44b4c288-170a-11d7-8645000102c1865d]

- Huang W, Xiao L, Wei Z H, Liu H Y and Tang S Z. 2015. A new pan-sharpening method with deep neural networks. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(5): 1037-1041 [DOI: 10.1109/LGRS.2014.2376034]
- Laben C A and Brower B V. 2000. Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening. *U. S.*, No. 6011875
- Liu Y N. 2018. Visible-shortwave infrared hyperspectral imager of GF-5 satellite. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 39(3): 25-28 (刘银年. 2018. “高分五号”卫星可见短波红外高光谱相机的研制. *航天返回与遥感*, 39(3): 25-28) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2018.03.003]
- Loncan L, De Almeida L B, Bioucas-Dias J M, Briottet X, Chanussot J, Dobigeon N, Fabre S, Liao W Z, Licciardi G A, Simões M, Tourneret J Y, Veganzones M A, Vivone G, Wei Q and Yokoya N. 2015. Hyperspectral pansharpening: a review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 3(3): 27-46 [DOI: 10.1109/MGRS.2015.2440094]
- Meng X C, Shen H F, Zhang L P, Yuan Q Q and Li H F. 2015. A unified framework for spatio-temporal-spectral fusion of remote sensing images//*Proceedings of 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. Milan, Italy: IEEE: 2584-2587 [DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7326340]
- Meng X C. 2017. *The Variational Fusion Methods for Multisource Spatio-Temporal-Spectral Optical Remote Sensing Images*. Wuhan: Wuhan University (孟祥超. 2017. 多源时空一谱光学遥感影像的变分融合方法. 武汉: 武汉大学)
- Meng X C, Shen H F, Li H F, Zhang L P and Fu R D. 2019. Review of the pansharpening methods for remote sensing images based on the idea of meta-analysis: practical discussion and challenges. *Information Fusion*, 46: 102-113 [DOI: 10.1016/j.inffus.2018.05.006]
- Meng X C, Shen H F, Yuan Q Q, Li H F, Zhang L P and Sun W W. 2019. Pansharpening for cloud-contaminated very high-resolution remote sensing images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(5): 2840-2854 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2878007]
- Otazu X, González-Audicana M, Fors O and Núñez J. 2005. Introduction of sensor spectral response into image fusion methods. Application to wavelet-based methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(10): 2376-2385 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.856106]
- Shen H. 2012. Integrated fusion method for multiple temporal-spatial-spectral images//*International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Melbourne, Australia: [s. n.]: 407-410 [DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B7-407-2012]
- Shen H F, Meng X C and Zhang L P. 2016. An integrated framework for the spatio-temporal-spectral fusion of remote sensing images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(12): 7135-7148 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2596290]
- Tu T M, Su S C, Shyu H C and Huang P S. 2001. A new look at IHS-like image fusion methods. *Information Fusion*, 2(3): 177-186 [DOI: 10.1016/S1566-2535(01)00036-7]
- Vivone G, Alparone L, Chanussot J, Mura M D, Garzelli A, Licciardi G A, Restaino R and Wald L. 2015. A critical comparison among pansharpening algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(5): 2565-2586 [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2361734]
- Wald L. 2000. Quality of high resolution synthesised images: is there a simple criterion?//*Proceedings of the 3rd Conference “Fusion of Earth Data: Merging Point Measurements, Raster Maps and Remotely Sensed Images”*. Sophia Antipolis, France: [s. n.]: 99-103
- Wang Z and Bovik A C. 2002. A universal image quality index. *IEEE Signal Processing Letters*, 9(3): 81-84 [DOI: 10.1109/97.995823]
- Xu J, Guan Z Q, He X F and Hu J W. 2009. Novel method for merging panchromatic and multi-spectral images based on sensor spectral response. *Journal of Remote Sensing*, 13(1): 97-102 (徐佳, 关泽群, 何秀凤, 胡俊伟. 2009. 基于传感器光谱特性的全色与多光谱图像融合. *遥感学报*, 13(1): 97-102) [DOI: 10.3321/j.issn:1007-4619.2009.01.013]
- Yokoya N, Yairi T and Iwasaki A. 2012. Coupled nonnegative matrix factorization unmixing for hyperspectral and multispectral data fusion. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(2): 528-537 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2161320]
- Zhang L P and Shen H F. 2016. Progress and future of remote sensing data fusion. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 1050-1061 (张良培, 沈焕锋. 2016. 遥感数据融合的进展与前瞻. *遥感学报*, 20(5): 1050-1061) [DOI: 10.11834/jrs.20166243]
- Zhu X X, Tuia D, Mou L C, Xia G S, Zhang L P, Xu F and Fraundorfer F. 2017. Deep learning in remote sensing: a comprehensive review and list of resources. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 5(4): 8-36 [DOI: 10.1109/MGRS.2017.2762307]

Spatial-spectral fusion of GF-5/GF-1 remote sensing images based on multiresolution analysis

MENG Xiangchao¹, SUN Weiwei², REN Kai², YANG Gang², SHAO Feng¹, FU Randi¹

1. Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, China

Abstract: This study proposed a multisensor image fusion solution for the GF-5/GF-1 spatial-spectral fusion with large spatial resolution ratio. We aimed to obtain the fused image through step-by-step fusion of multisensor remote sensing images. A unified fusion framework for multisensor image fusion was derived on the basis of step-by-step fusion theory. An integrated multisensor image fusion method based on multiresolution analysis theory was proposed in accordance with the unified framework. The proposed method can overcome the difficulty of integrating complementary high spatial and spectral information of multisource images under high spatial resolution ratio. In the proposed method, a modulation transfer function was applied to separate the spatial (high frequency) and spectral components (low frequency) of multisource images. The fusion weight was constructed by comprehensively considering the relationship between multisensor high spatial resolution images and high spectral resolution images and the relationship among the spectral bands of the high spectral resolution image. Fused images with the highest spatial and spectral resolutions can be obtained. The GF-1 panchromatic, GF-1 multispectral, and GF-5 hyperspectral images were used in the experiments. Experimental results show that the proposed multisensor spatial - spectral fusion can effectively integrate the complementary spatial and spectral information to obtain the comparative fused results.

Key words: remote sensing, GF-5 satellite, spatial-spectral fusion, large spatial resolution difference, multi-sensor

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41801252, 41971296, 41671342); Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No. LR1901D0001, LQ18D010001)