

一种遥感图像融合质量评价方法

卫 薇 王忠武 汪承义

(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘 要 针对遥感图像融合质量评价中多波段、无地面真实参考图像的特点,提出了基于结构相似度和全局融合质量评价指标的融合质量评价方法。该方法首先采用均值变化量构造局部光谱质量加权方法,计算融合图像的光谱质量;然后结合方差构造局部空间质量加权方法,获得融合图像的空间质量;最后使用线性加权方法,计算融合图像的整体质量。通过对8种典型融合方法的结果图像进行质量评价,结果表明提出的评价方法与主观评价结果基本一致,具有可行性。

关键词 融合 质量评价 结构相似度 全局融合质量评价指标

中图法分类号: TP751 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)08-1488-06

A Quality Assessment for Remote Sensing Image Fusion

WEI Wei, WANG Zhong-wu, WANG Cheng-yi

(Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract Integrating structural similarity and global quality measurement index, a new non-reference fusion quality assessment method for multispectral remote sensing imageries is proposed. First, the spectral quality is obtained from local spectral quality based on the weighting strategy of mean variable. Then, the spatial quality is achieved from local spatial quality based on the weighting strategy of standard deviation. Finally, a combined quality is calculated by linear addition. Validating experiment is carried out on eight common fusion methods using CBERS-02 multispectral and Cartosat-1 panchromatic images. The result shows the new method is consistent with the judgments based on human visual system, which indicates its efficiency.

Keywords fusion, quality assessment, structural similarity, global quality measurement index

1 引 言

融合图像的评价方法一般可分为两大类:主观评价法和客观评价法^[1]。主观评价法是由判读人员直接对图像的质量进行评价,评价过程中很多主观因素会影响评价结果,导致其评价结果具有主观性、不全面性。客观评价方法可以分为需要参考图像的评价方法和不需要参考图像的评价方法^[2]。前者多以某一理想图像为参考,采用数学的方法构

造统计量,表示融合图像与理想图像的相似性,常见的有均方根误差、峰值信噪比、交叉熵、相关系数、互信息、光谱角^[3]、ERGAS(相对整体维数综合误差)^[4]、统一融合质量评价指标^[1]、全局融合质量评价指标^[3]、结构相似度^[5]等;后者多以融合图像的信息统计量来描述该图像中某类信息的多少,例如均值、方差、信息熵、平均梯度等。

以上许多方法大多用于多聚焦图像融合的质量评价,仅适合于单波段的融合质量评价。对于全色与多光谱图像的融合结果的质量评价,需要研究适

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA1202031)

收稿日期:2009-05-20; 改回日期:2009-06-02

第一作者简介:卫 薇(1982~),女,中国科学院遥感应用研究所信号与信息处理专业硕士研究生。主要研究方向为光学遥感图像处理。E-mail: mrs_cadbary@hotmail.com

合于多波段图像的质量评价方法。此外,虽然全局融合质量评价指标能同时考虑 3 个或 4 个多光谱波段的光谱变形,但是由于需要地面真实的参考图像,而该参考图像在实际情况下很难获得,导致其很难用于实际融合图像的质量评价。本文将结合结构相似度和全局融合质量评价指标的思想,旨在研究适合光学遥感图像的无参考图像的融合质量评价方法。

2 算法基础

2.1 结构相似度 (SSIM)

Wang 首次提出了 SSIM 的概念。假设 x, y 是两幅具有相关性的图像,SSIM 评价指标将这一任务划分为 3 个要素:亮度,对比度,相关系数,如式(1)所示。

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [s(x, y)]^\gamma \quad (1)$$

式中,

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}, c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2},$$

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3}$$

其中, μ_x, μ_y 分别为图像 x, y 的均值, σ_x, σ_y 分别为图像 x, y 的方差, σ_{xy} 为图像 x, y 的协方差, C_1, C_2, C_3 为非常小的正常量,是为了避免分母非常接近于零时造成的不稳定。

通常取 $\alpha = \beta = \gamma = 1, C_2 = 2C_3$ 则

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (2)$$

SSIM(x, y) 值越大,说明两幅图像越相似,当 x, y 分别表示融合图像和参考图像时,其值即是融合质量评价指标。

2.2 全局融合质量评价指标 (Q4)

由 SSIM 的定义式可知,它只能用于融合图像中单个波段的质量评价,Alparone 根据 IKONOS、QuickBird 等高分辨率卫星图像具有 4 个多光谱波段的特点,将单个像元在各波段中的灰度值组成四元组,提出了 Q4。同样假设 x, y 是两幅具有相关性的图像,首先将图像划分为若干个子块,分别计算两幅图像各相应子块的局部 $Q4_j(x, y)$,最后取所有窗口 $Q4_j(x, y)$ 值的平均值作为两幅图像整个区域的 $Q4(x, y)$ 值,其计算式为

$$Q4(x, y) = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T Q4_j(x, y) \quad (3)$$

$$Q4_j(x, y) = \frac{4 \left| \sigma_{x_4, y_4} \right| \cdot \left| \overline{x_4} \right| \cdot \left| \overline{y_4} \right|}{(\sigma_{x_4}^2 + \sigma_{y_4}^2) \left(\left| \overline{x_4} \right|^2 + \left| \overline{y_4} \right|^2 \right)} \quad (4)$$

式中, T 为总子块图像的个数; x_4, y_4 分别为图像 x, y 的第 j 个子块图像中单个像元各波段的灰度值组成的四元组; σ_{x_4, y_4} 为 x_4, y_4 的广义协方差; $\sigma_{x_4}, \sigma_{y_4}$ 分别为 x_4, y_4 的广义方差; $\overline{x_4}, \overline{y_4}$ 分别表示 x_4, y_4 的广义均值; $|\cdot|$ 为求模运算。 $Q4(x, y)$ 越大,说明图像 x, y 越相似,当 x, y 分别表示融合图像和参考图像时,即表明融合质量越好,反之越差。

3 基于 SSIM 和 Q4 的融合质量评价方法

图像融合的目的是通过一定的融合方法,获得融合图像,使其既继承多光谱图像的光谱信息,又具备全色图像的细节信息。所以,当无法获得地面真实参考图像时,可以首先分别计算以上两种信息的保持程度,即光谱质量和空间质量,然后通过某种方式将两种质量集成起来,作为整体的融合质量评价指标。

3.1 融合图像的光谱质量

光学遥感图像的融合图像和原始多光谱图像都具有多个波段,所以可以借鉴 Q4 的计算公式,比较融合图像与原始多光谱图像的亮度、对比度和相关系数,然后借用 SSIM 中对以上 3 个要素的指数加权的方法获得融合图像的光谱质量。该过程需要考虑图像分块的大小、3 个要素的指数、局部融合质量的加权方式 3 方面的问题。

对于图像分块的大小问题,现有成果表明:相同源图像的多种融合图像的采用 Q4 评价的质量优劣顺序,与图像分块的大小无关^[3]。所以,文中采用 80×80 像素的窗口进行计算。对于 3 个要素的指数问题,亮度、对比度、相关系数都是衡量两幅图像相似关系的重要指标,具有无可代替性,应当平等对待,所以本文将 3 者的指数也都设置为 1。

对于局部融合质量的加权方式,Q4 融合质量采用所有局部融合质量的简单平均,即加权系数为 1,而 SSIM 用于多聚焦图像融合质量评价时,一般都采用该子块图像的方差与整个图像中所有子块方差的和的比值作为加权系数^[6]。然而,对于遥感融合

图像的光谱质量评价,并非方差越大的子块,其局部融合质量就占据较大的权重。相对而言,如果某子块的均值变化越大,该子块的光谱变形程度越大,融合质量越差,加权计算全局光谱质量,应使后者向劣的方向靠近,所以应当赋予该子块较小的加权系数,以降低全局光谱质量。因此,设计了一种新的加权方式,设 F 和 Ms 分别为融合图像和原始多光谱图像。

$$Dm_j = 1 - (|\overline{F4_j} - \overline{Ms4_j}| / L_{\max})$$

$$w_j = Dm_j / \sum_{j=1}^T Dm_j$$

$$IQ4(F, Ms) = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T [w_j \times Q4_j(F, Ms)] \quad (5)$$

式中, $\overline{F4_j}$, $\overline{Ms4_j}$ 分别为 F 和 Ms 的第 j 个子块图像中所有像素的四元组的广义均值; L_{\max} 为图像的灰度等级; Dm_j 为第 j 个子块中 F 和 Ms 的广义均值变化量的函数; w_j 为第 j 个子块图像的光谱质量加权系数; T 为总子块的个数; $Q4_j(F, Ms)$ 为第 j 个子块的局部光谱质量; $IQ4(F, Ms)$ 为改进的整体光谱质量。

3.2 融合图像的空间质量

融合图像的空间质量的计算比较复杂,需要将全色图像转换为多波段的多光谱图像,只是 3 个波段的灰度值完全相同,然后借鉴融合图像光谱质量的方法计算其空间质量。该方法首先采用高通滤波法提取融合图像和全色图像各波段的细节信息,然后对其进行 2% 线性拉伸处理,最后对两者进行空间质量评价。

与融合图像的光谱质量类似,其空间质量也涉及相同的问题。图像分块大小和亮度、对比度、相关系数的指数等问题,上节中已经讨论了,这里不再赘述;对于局部融合质量的加权方式,由于空间质量主要考虑细节保持程度,灰度变化平缓的地方不应参与计算,方差能有效地反应图像中细节信息的多少,所以本文选择方差构造融合图像空间质量中局部融合质量的加权系数。设 F 和 Pan 分别为融合图像和原始全色图像,则 F' 和 Pan' 分别为经过高通滤波和 2% 线性拉伸处理后的融合图像和原始全色图像的细节图像。

$$w'_j = \sigma_j / \sum_{j=1}^T \sigma_j$$

$$IQ4(F', Pan') = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^T [w'_j \times Q4_j(F', Pan')] \quad (6)$$

式中, σ_j 表示图像 Pan' 的第 j 个子块图像中所有像素的四元组的广义方差; w'_j 为第 j 个子块图像的空间质量加权系数; T 为总子块的个数; $Q4_j(F', Pan')$ 为第 j 个子块的局部空间质量; $IQ4(F', Pan')$ 为改进的整体空间质量。

3.3 融合图像的质量

至此,已经获得了融合图像的光谱质量和空间质量,下面需要将两者组合为一个综合质量评价指标。对于遥感图像的融合中,以上两个质量的加权方式,研究的较少,主要是线性加权法。该方法假设综合质量是光谱质量和空间质量的线性关系,可用式(7)描述^[5-6]。

$$IQ = a \times IQ4(F, Ms) + (1 - a) \times IQ4(F', Pan') \quad (7)$$

式中, a 为加权系数。

4 实验与分析

4.1 融合实验与主观评价

采用的实验数据为中巴资源卫星 CBERS-02 多光谱图像(1, 2, 4 波段)和印度 Cartosat-1 (IRS-P5) 全色图像。首先对原始数据进行调色处理,使各地物的颜色尽可能接近地面真彩色,且整幅图像亮度适中,反差适当。然后,从全色图像中截取 400×400 像素的子图像,并在多光谱图像中截取相应区域的子图像,作为融合输入数据,如图 1 所示。

采用的融合方法有 ERDAS Imagine 的高通滤波法 (HPF)、ENVI 的 Gram-Schmidt 光谱增强方法 (GS)、PCI 的 PANSHARP 方法、亮度色调饱和度变换法 (IHS)、主成分变换法 (PCA)、Brovey 变换法、Multiplicative 法,以及国产遥感图像处理软件 IRSA 提供的一种 HPF 和 GS 的组合融合方法,融合结果如图 2 所示。

可以看出,对于 IRSA 方法(图 2(a)),其融合图像与原始多光谱的色彩保持一致,并且在裸地、河流等地方光谱也基本一致,特别是在图像正中间的厚云区域,色调保持的较好。图 2(b) 为采用两级高通滤波、默认融合参数的 HPF 融合结果,融合结果出现了较明显的浮雕效果,主要原因是分辨率相差很大,多光谱图像重采样时增加了很多的虚假信息;河流处也出现了明显的马赛克现象,原因在于全色图像中河流的灰度值存在较小的差别,经过高通滤波后被放大,并注入多光谱图像中。GS 融合结果

(图2(c))的整体色调偏亮,裸地变为亮白色,原因在于低分辨率全色图像与高分辨率全色图像的直方图不同,采用线性拉伸或非线性调整的方法,无法使该类地物在两幅图像中的灰度值一致,导致提取细节信息时,灰度值的差异同时被提取出,并注入多光谱图像中,最终引起光谱变形;厚云区域的颜色也发生了较大变化。PANSHARP融合结果(图2(d))中,裸地变为了暗灰色,河流区域出现了空间增强过量的现象,这会影响对图像的后续处理,特别是图像分类;厚云区域的颜色也发生了较大变化。图2(e)~图2(h)分别为IHS, Multiplicative, PCA, Brovey方法的融合结果,其中IHS融合结果在厚云处也变成了灰色,裸地的色调也变得明显偏灰; Multiplicative方法的融合结果整体偏暗,河流处几乎变为黑色,原因在于经验系数可能不适合于该景图像;PCA方法的融合结果与GS融合结果相比,整体亮度较接近原

始多光谱图像,但是也具有与GS融合结果类似的光谱变形,例如裸地、厚云等区域; Brovey方法的融合结果光谱变形最严重,总体来说多光谱图像的红、蓝色波段被注入了大量的多余信息。

通过比较可以看出,在众多常用的融合方法中,IRSA融合方法能较好地保持图像的光谱信息,同时也能有效地提高图像的空间分辨率。

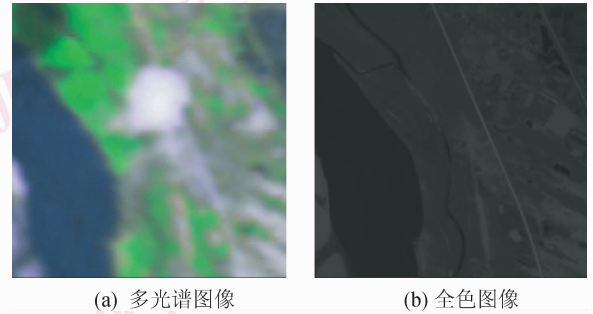


图1 实验数据

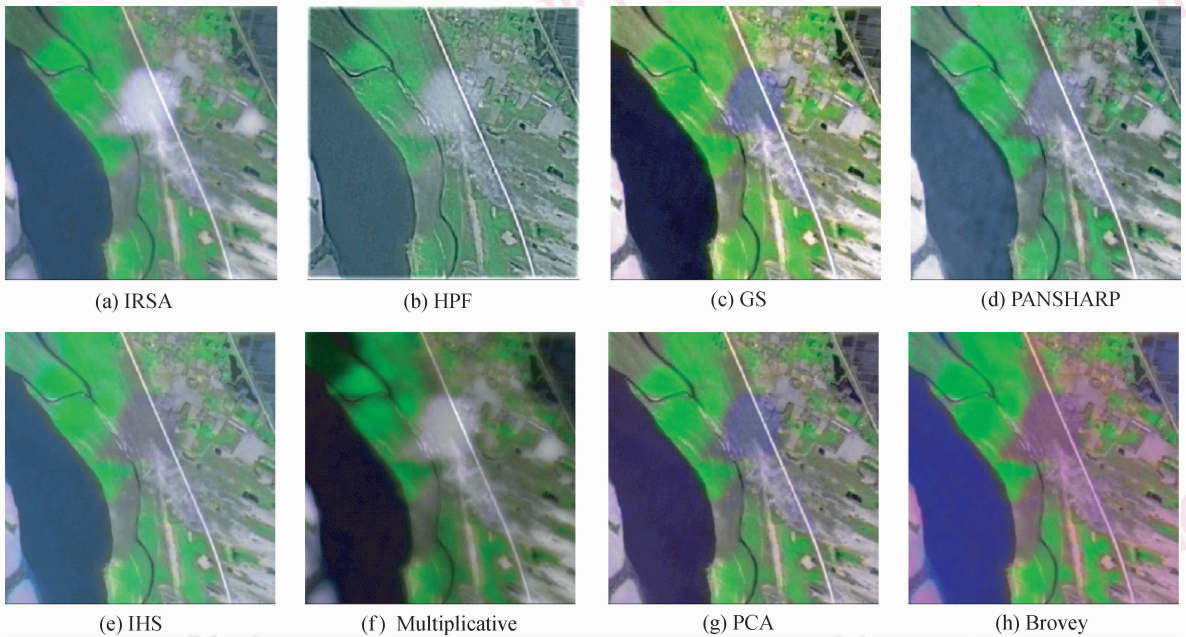


图2 不同融合方法的融合结果

Fig. 2 Fusion results of eight methods

4.2 客观质量评价

为了在计算融合图像的光谱质量和空间质量时考虑所有像素,同时兼顾运算时间,设定图像分块大小为 80×80 像素,整个图像被分为 $5 \times 5 = 25$ 个子块。

(1) 光谱质量

8种融合方法整体光谱质量如图3所示。可见,整体光谱质量方面,无加权系数和基于均值变化

参数构造加权系数的加权策略对融合图像光谱质量的排序影响不大,说明了本文方法的正确性。而且,无论采用哪种加权方法,IRSA融合方法具有最大的质量指标值,是唯一一个超过0.85的融合方法。其他融合方法的光谱质量均不高,尤其是HPF融合方法,无加权系数和基于均值变化参数构造加权系数,整体融合质量已经下降到0.6以下,严格来说,光谱质量已经相当差。按照基于均值变化参数构造加权

系数的整体光谱质量,各方法的排序从优到劣依次是:IRSA, IHS, PCA, Multiplicative, PANSHARP, GS, Brovey。

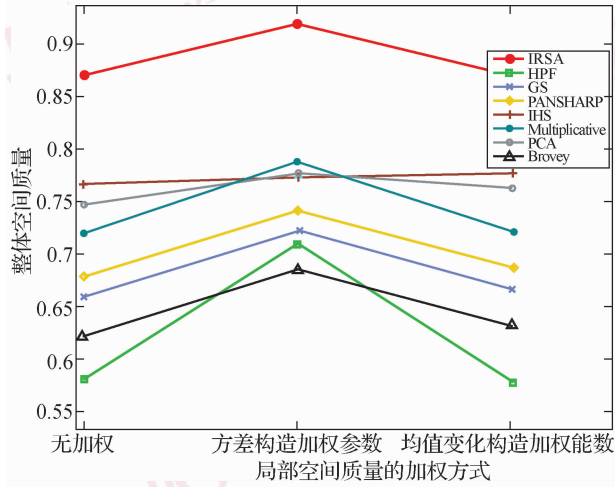


图 3 各融合图像的整体光谱质量

Fig. 3 Spectral quality of eight fusion results

(2)空间质量

图 4 为 8 种融合方法整体空间质量的图示化比较。从图中可以看出,基于方差构造加权系数法的空间质量指标值普遍优于无加权系数方法,原因在于无加权系数方法将许多方差较小的子块与方差较大的子块采用了相同的加权系数,导致整体空间质量指标值降低。从基于方差构造加权系数的方法上看,8 种融合方法中,表现最优的是 IHS 融合方法,这与统一融合理论框架中各公式比较结果基本一致。HFP 融合方法从理论上来说应当具备最佳的

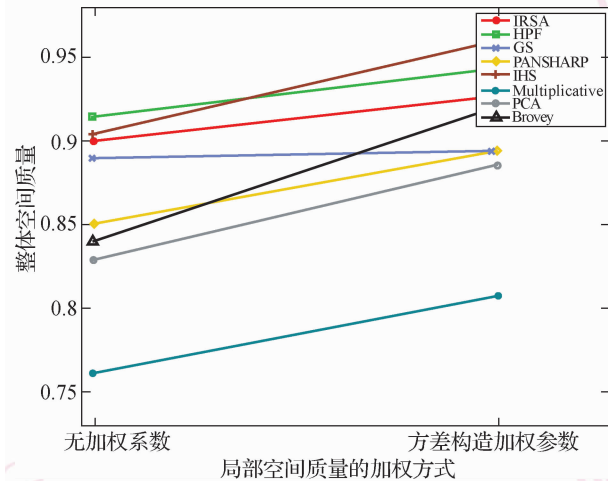


图 4 各融合图像的整体空间质量

Fig. 4 Spatial quality of eight fusion results

空间质量,但是由于其对初始融合图像进行了均值方差直方图匹配,可能会降低其空间质量。所有融合方法的空间质量排序依次为: IHS, HPF, IRSA, Brovey, PANSHARP, GS, PCA, Multiplicative。

(3)整体质量

线性加权法的整体质量评价结果如图 5 所示。随着加权系数 a 的增大,整体融合质量呈线性下降。当对 8 种融合方法进行纵向比较时,可以看出,许多的融合方法都存在交点,例如对于 IRSA 融合方法和 IHS 融合方法,在 $[2, 3]$ 之间存在交点 $a_threshold$,也就是说,当 $a = a_threshold$,以上两种融合方法在本文的质量评价体系下也相等,综合质量相当;当 $a < a_threshold$ 时, IHS 融合方法的融合质量优于 IRSA 融合方法;当 $a > a_threshold$ 时, IRSA 融合方法的融合质量优于 IHS 融合方法。表现在图像上时,当 $a < a_threshold$ 时, IHS 由于空间质量较好,弥补了其光谱质量的不足,综合后的质量要优于 IRSA 融合方法;当 $a = a_threshold$ 时,虽然 IHS 融合方法的高空间质量弥补了其的光谱质量,但是 IRSA 融合方法也用高光谱质量弥补了其空间质量的不足,两者的总体质量相当;当 $a > a_threshold$ 时,由于权重的减小, IHS 融合方法的高空间质量弥补其光谱质量的量也随之降低,反而 IRSA 融合方法的高光谱质量弥补其空间质量的量却随之升高,使后者的整体质量高于前者,这种情况下出现的评价结果与主观评价方法的结果基本一致。其他融合方法的交点也可以用同样的原理解释。

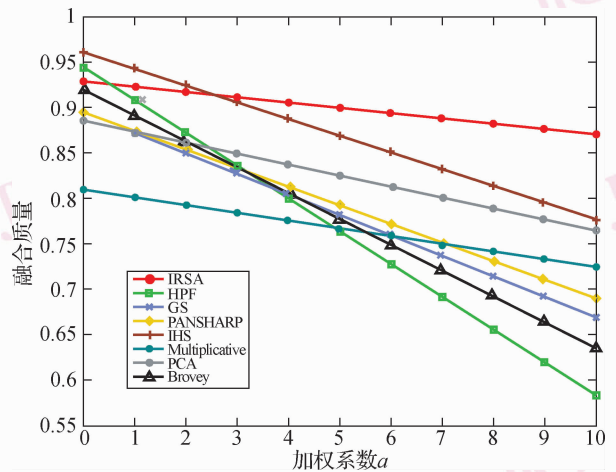


图 5 基于线性加权法的融合图像整体质量

Fig. 5 Quality of eight fusion results by linear addition

5 结 论

主要开展了光学遥感融合图像的无参考图像的质量评价方面的研究,分别对融合图像的光谱质量和空间质量展开研究,分析了两种质量中局部质量的加权方法,通过对光谱质量和空间质量加以组合,得到了融合图像的综合质量。在理论总结与比较分析的基础上,进行了8种融合方法的结果图像的比较,实验结果表明,提出融合质量的评价结果与主观评价结果基本一致,也验证了本文方法的可行性。

参考文献 (References)

- 1 Wang Z, Bovik A C. A universal image quality index[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(3): 81-84.
- 2 Yang Cui. Research on the fusion technologies of Multi-spectral Electro-optical Images[D]. Xi'an: Xidian University, 2006. [杨翠. 多波段光电图像融合技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学硕士学位论文, 2006.]
- 3 Alparone L, Baronti S, Garzelli A, et al. A global quality measurement of pan-sharpened multispectral imagery [J]. IEEE Geoscience Remote Sensing. Letter, 2004, 1(4): 313-317.
- 4 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(10): 49-61.
- 5 Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.
- 6 Piella G. New quality measures for image fusion[A]. In: Proceedings of the 7th International Conference on Information Fusion [C], Stockholm, Sweden, 2004: 542-546.