

文章编号: 1004-4213(2011)01-0126-6

# 基于特征结构相似度的遥感影像融合质量评价指标

刘军<sup>a</sup>, 邵振峰<sup>b</sup>

(武汉大学 a. 遥感信息工程学院; b. 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

**摘 要:** 在分析现有影像融合评价指标的基础上, 根据人眼视觉特性, 提出一种基于特征结构相似度的遥感影像融合质量评价指标. 首先从原始影像和融合影像中提取空间特征和光谱特征, 然后综合计算空间特征和光谱特征的结构相似度作为评价指标, 达到评价影像质量的目的. 通过对多种传感器获取的遥感影像进行融合实验, 结果表明该客观评价方法与主观评价结果一致, 是一种有效的遥感影像融合质量评价方法.

**关键词:** 结构相似度; 特征结构相似度指标; 遥感影像融合; 质量评价

中图分类号: TP391

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114001.0126

## 0 引言

影像融合的方法有很多, 最常用的是亮度-色调-饱和度(IHS)变换<sup>[1]</sup>、PCA变换<sup>[2]</sup>, 多分辨率分析(MRA)方法<sup>[3-5]</sup>, 以及其他方法<sup>[6]</sup>, 但是对融合质量评价的问题一直都没有很好地解决. 主要原因是同一方法对不同类型的影像的融合效果不一样, 不同观察者对融合影像的认知也不一样, 不同的应用场合对影像融合的需求又不一样.

目前, 人们提出的影像融合质量评价指标很多, 大致可分为主观评价和客观评价两大类. 主观评价方法具有简单直观的特点, 但也存在速度慢、困难大、人为因素多等缺点. 客观评价方法可以分为有参考影像和不需要参考影像两大类, 前者主要用于多聚焦图像的融合, 常用的指标有均方根误差、信噪比、相关系数(SCC)、UIQI<sup>[7]</sup>、ERGAS<sup>[8]</sup>、RASE<sup>[9]</sup>等, 后者多用一些统计量来表达影像的质量, 如熵、梯度、清晰度等. 遥感影像融合过程中一般难以获取理想的参考影像, 且具有多波段的特点, 不能直接应用上述指标, 因此需要研究更适用于遥感影像融合的评价指标.

考虑到遥感影像融合过程是个信息传递的过程, 即将全色影像的空间细节信息和多光谱影像的光谱信息传递到融合后的结果影像中, 可以用传递信息的多少来评价融合质量. 另外对于以人眼为最终信宿的影像来说, 也需要考虑到人眼视觉系统的

特点. 由于人眼视觉系统的侧抑制效应, 边缘等空间细节特征和颜色纹理等光谱特征对于人眼识别目标的结构有着非常重要的意义. 基于此, 本文提出了一种基于特征结构相似度的影像融合质量的指标 FSSI (Feature-based Structure Similarity Index), 实验表明该指标在综合表达影像融合质量的能力上较传统指标有明显的优势.

## 1 交互信息量和结构相似度

交互信息量(Mutual Information, MI)是信息论中的一个重要概念, 它可作为两个变量之间相关性的度量, 或一个变量包含另一个变量的信息量的度量. 它的值越大, 表示融合影像从源影像中获取的信息越丰富, 融合效果越好. 因此, 它可以用来评价融合效果的优劣. 设源影像为  $A$  和  $B$ , 融合影像为  $F$ , 则  $F$  与  $A$ 、 $F$  与  $B$  的交互信息量分别定义为

$$\begin{cases} MI_{FA} = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} h_{FA}(i, j) * \log_2 \frac{h_{FA}(i, j)}{h_F(i) * h_A(j)} \\ MI_{FB} = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} h_{FB}(i, j) * \log_2 \frac{h_{FB}(i, j)}{h_F(i) * h_B(j)} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $h_F$ 、 $h_A$  和  $h_B$  为  $F$ 、 $A$  和  $B$  的灰度直方图,  $h_{FA}$  和  $h_{FB}$  为  $F$  与  $A$ 、 $F$  与  $B$  的联合灰度直方图. 总的交互信息量为

$$MI = MI_{FA} + MI_{FB} \quad (2)$$

交互信息量基于源影像与融合影像的统计信息, 没有考虑人眼视觉感知特点和影像的结构信息.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (No. 2010CB731800)、国家高技术研究发展 (No. 2009AA121404)、国家自然科学基金 (No. 40801165 和 No. 10978003) 和中央高校基本科研业务费专项 (No. 20082130101000046) 资助

第一作者: 刘军 (1984-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为遥感图像处理及分析. Email: luck0209@163.com

导 师: 邵振峰 (1976-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为图像处理与网络技术. Email: shaozhenfeng@163.com

收稿日期: 2010-07-13; 修回日期: 2010-11-09

而实际上,人眼视觉感知与统计意义上的信息分布并不完全一致,影像中像素之间具有很大的相关性,从而显示出很强的结构性.人眼视觉系统的主要功能是提取影像中的结构信息,对影像的结构失真的度量是影像感知质量的最好近似,基于此原理,Wang 和 Bovik 提出了结构相似度 (Structure SIMilarity, SSIM)<sup>[10]</sup> 的评价指标.设  $X$  和  $Y$  表示待比较的两幅影像,则它们之间的结构相似度定义为

$$\text{SSIM}(X, Y) = l(X, Y) * c(X, Y) * s(X, Y) = \frac{(2\mu_X\mu_Y + C_1)(2\sigma_{XY} + C_2)}{(\mu_X^2 + \mu_Y^2 + C_1)(\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + C_2)} \quad (3)$$

式中  $l(X, Y)$ 、 $c(X, Y)$  和  $s(X, Y)$  分别是亮度、对比度和结构,分别定义如下

$$\begin{cases} l(X, Y) = \frac{2\mu_X\mu_Y + C_1}{\mu_X^2 + \mu_Y^2 + C_1} \\ c(X, Y) = \frac{2\sigma_X\sigma_Y + C_2}{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + C_2} \\ s(X, Y) = \frac{\sigma_{XY} + C_3}{\sigma_X\sigma_Y + C_3} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\mu_X$  和  $\mu_Y$  是  $X$  和  $Y$  的均值,  $\sigma_X^2$  和  $\sigma_Y^2$  表示  $X$  和  $Y$  的方差,  $\sigma_{XY}$  是  $X$  和  $Y$  的协方差,  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  是小的常量,为避免分母为 0 而设置的.在影像融合中,设  $A$  为全色影像,  $B$  为多光谱影像,则总的结构相似度定义为

$$\text{SSIM}(F, A, B) = \text{SSIM}(F, A) + \text{SSIM}(F, B) \quad (5)$$

为叙述方便,本文称  $\text{SSIM}(F, A)$  为空间结构相似度,  $\text{SSIM}(F, B)$  为光谱结构相似度.

## 2 基于特征结构相似度的评价指标

如前所述,遥感影像融合的过程是一个信息传递的过程,在融合过程中,融合结果影像从全色影像上获取的主要是空间细节信息,例如边缘等,而不是全色影像的所有内容,这些空间细节信息构成空间特征;同样的,从多光谱影像上获取的主要是光谱信息,而不是多光谱影像的所有内容,光谱信息则构成光谱特征.因此将空间特征和光谱特征分别从融合结果影像上分离出来,并综合评价其影响,就能够更合理地对整个融合质量进行客观评价.基于上述思想,采用结构相似度的概念,本文提出了基于特征结构相似度的评价指标,该指标的计算方法包括特征提取和计算特征结构相似度指标两个步骤.

### 2.1 特征提取

特征提取步骤主要是对全色影像、多光谱影像和融合结果影像各波段进行滤波,可以采用各种高通、低通滤波器或者边缘检测算子如 Sobel 算子等.本文采用的滤波器是 B3 样条函数,其  $5 \times 5$  的滤波

器卷积核为

$$H = \frac{1}{256} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

设原始全色影像为  $Pan$ , 原始多光谱影像和融合结果影像各波段分别为  $Mul_i$  和  $Fus_i$ , 其中  $i=1, 2, \dots, N$ ,  $N$  为波段数,  $*$  表示卷积运算,则滤波后全色影像与融合结果影像各波段的空间特征  $SC_1$  可以表示为

$$SC_1: \begin{cases} Pan\_h = Pan * H \\ Fus_i\_h = Fus_i * H \end{cases} \quad (7)$$

滤波后原始多光谱影像和融合结果影像各波段的光谱特征  $SC_2$  可以表示为

$$SC_2: \begin{cases} Mul_i\_l = Mul_i - Mul_i * H \\ Fus_i\_t = Fus_i - Fus_i * H \end{cases} \quad (8)$$

由于融合影像加入了全色影像的空间细节信息,因此其空间分辨率比原始多光谱影像要高,不能直接将  $Fus_i\_t$  作为融合影像第  $i$  波段的光谱特征,而需要将  $Fus_i\_t$  按照空间分辨率比进行重采样,重采样的方法应该与将原始多光谱影像重采样至全色影像空间分辨率的方法一样,从而达到尽可能逼近原始多光谱影像的光谱信息的目的,最终的光谱特征  $SC_2$  表示为

$$SC_2: \begin{cases} Mul_i\_l = Mul_i - Mul_i * H \\ Fus_i\_l = \text{resample}(Fus_i\_t) \end{cases} \quad (9)$$

### 2.2 计算 FSSI

本文借鉴了 Wang 和 Bovik 提出的 SSIM 中对比度和结构的相关概念,并调整了亮度的表达式,考虑到综合评价空间特征和光谱特征对融合结果的影响,用乘法替换了式(5)中的加法.用  $x, y, z, k, M, F$  分别表示  $Pan\_h, Fus_i\_h, Mul_i\_l, Fus_i\_l, Mul_i, Fus_i$ , 影像大小为  $N=m \times n$ , FSSI 定义为

$$\text{FSSI} = f(SC_1) \times f(SC_2) = l \times c \times s \quad (10)$$

而经过调整的  $l, c, s$  的定义分别为

$$\begin{cases} l = \frac{\bar{M} - |\bar{M} - \bar{F}| + C_1}{\bar{M} + C_1} \\ c = \frac{2\sigma_x\sigma_y \times 2\sigma_z\sigma_k + C_2}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)(\sigma_z^2 + \sigma_k^2) + C_2} \\ s = \frac{|\sigma_{xy}| \times |\sigma_{zk}| + C_3}{\sigma_x\sigma_y \times \sigma_z\sigma_k + C_3} \end{cases} \quad (11)$$

$C_1, C_2, C_3$  为无穷小量,主要目的是防止分母为零.从式(11)可以看出,对比度  $c$  由空间特征和光谱特征的对比度乘积表达,结构  $s$  的表达式亦是如此,因为乘法能够达到比加法更为综合的评价.设  $C_3 =$

$C_2/4$ , 则第  $i$  波段的 FSSI 定义为

$$\text{FSSI}_i = l \times c \times s = \frac{\bar{M} - |\bar{M} - \bar{F}| + C_1}{\bar{M} + C_1} \times \frac{4|\sigma_{xy}| \times |\sigma_{zk}| + C_2}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)(\sigma_z^2 + \sigma_k^2) + C_2} \quad (12)$$

由于  $C_2$  为无穷小量, 上式可描述为

$$\text{FSSI}_i = \frac{\bar{M} - |\bar{M} - \bar{F}| + C_1}{\bar{M} + C_1} \times \frac{2|\sigma_{xy}| + C_2}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) + C_2} \times \frac{2|\sigma_{zk}| + C_2}{(\sigma_z^2 + \sigma_k^2) + C_2} \quad (13)$$

式中  $\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$ ,  $\bar{x}$  表示  $x$  的均值,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  和  $\sigma_k$  的表达式与  $\sigma_x$  类似.

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \bar{x} \text{ 与 } \bar{y} \text{ 分别表示 } x \text{ 和 } y \text{ 的均值, } \sigma_{zk} \text{ 与 } \sigma_{xy} \text{ 的表达式类似.}$$

和  $y$  的均值,  $\sigma_{zk}$  与  $\sigma_{xy}$  的表达式类似.

$$\bar{M} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_i, \bar{F} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i, \text{ 分别为 } M \text{ 和 } F \text{ 的均值.}$$

值.

FSSI 从三个方面评价了融合结果影像对于原始全色和多光谱影像信息的保持度, 第一部分  $\frac{\bar{M} - |\bar{M} - \bar{F}| + C_1}{\bar{M} + C_1}$  是均值偏差, 值域是  $[0, 1]$ , 当且

仅当  $\bar{M} = \bar{F}$  时, 其值等于 1. 它描述的是融合结果影像各波段与原始多光谱影像各波段的均值差异, 均值偏差越小, 融合影像越符合人眼的视觉感受. 根据人眼视觉系统 HVS 中广泛使用的韦伯定律, HVS

对相对亮度改变的敏感性要高于绝对亮度改变, 设  $R$  为相对于背景亮度的亮度改变, 融合结果影像的亮度为  $\bar{F} = (1+R)\bar{M}$ , 代入  $l$  的表达式, 得

$$l = \frac{1 - |R|}{1 + C_1/\bar{M}} \quad (14)$$

由于  $C_1$  是无穷小量, 可以忽略, 因此  $l$  只是  $R$  的函数, 这与韦伯定律是一致的.

第二部分  $\frac{2|\sigma_{xy}| + C_2}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) + C_2}$  是滤波后融合结果影像各波段和全色影像的空间结构相似度, 描述的是融合结果影像对空间特征的保持度. 由于空间特征主要是边缘等细节信息, 因此不需要考虑亮度.  $\sigma_{xy}$  取了绝对值, 因此值域是  $[0, 1]$ . 第三部分  $\frac{2|\sigma_{zk}| + C_2}{(\sigma_z^2 + \sigma_k^2) + C_2}$  是经过滤波和重采样处理后的融合结果影像各波段与原始多光谱影像的光谱结构相似度, 描述的是融合结果影像对光谱特征的保持度, 值域同样是  $[0, 1]$ . 由于在第一部分中已经考虑了亮度, 因此光谱特征的结构相似度就没有再加入亮度.

从以上分析可以得知, 由于将空间特征和光谱特征进行了分离, 并加入了基于人眼视觉系统的结构相似性判断, 因此对影像模糊、噪音、亮度变化等空间特征和光谱特征的扭曲都能很好地适应.

### 3 FSSI 在影像融合中的应用

为了验证本文提出的遥感影像融合质量评价指标的正确性和有效性, 进行了实验. 图 1(a)和(c)

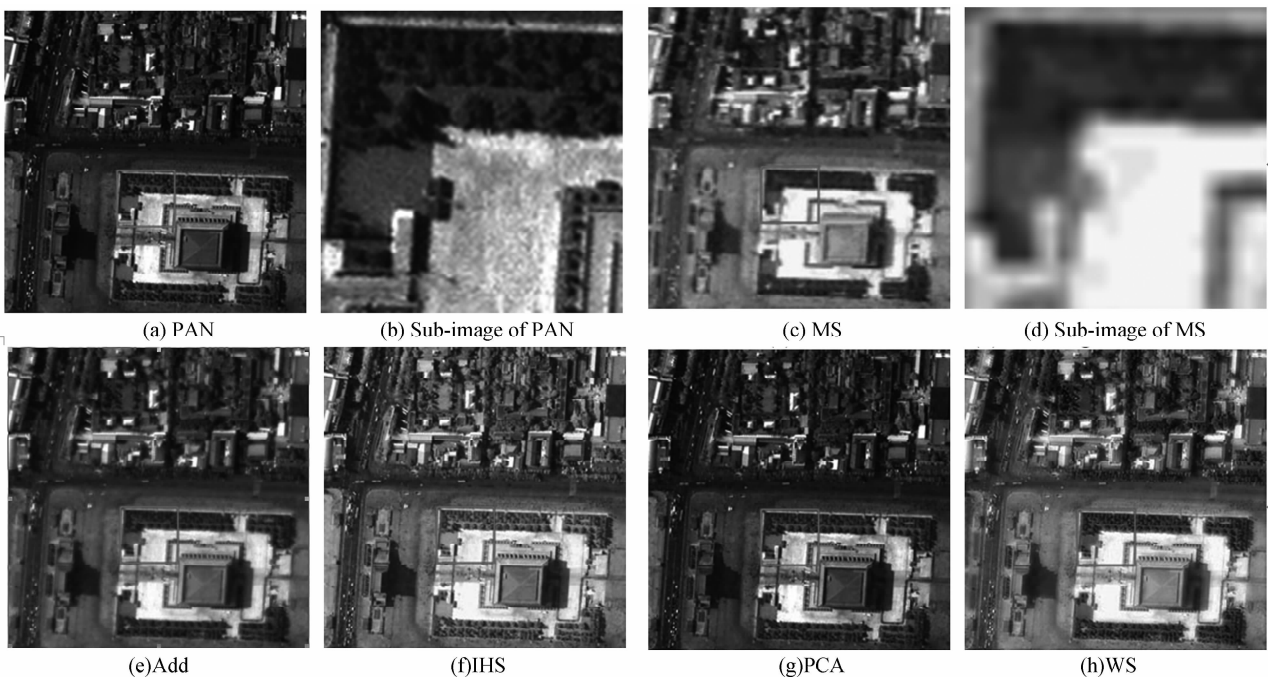


图 1 原始影像及不同融合方法的融合结果影像

Fig. 1 Original images and fused images of different methods

为本文实验中用于影像融合的原色全色和多光谱 IKONOS 影像,全色影像的空间分辨率为 1 m,多光谱影像的空间分辨率为 4 m,实验影像的大小为  $512 \times 512$  pixel,多光谱影像采用 RGB 三波段影像合成的真彩色影像,融合前已将全色影像和多光谱影像进行了严格的几何配准,并将多光谱影像重采样至全色影像同样的像素大小,采样的方法为双线性内插法.(b)和(d)为(a)(c)对应方框区域的局部放大图,(e)为直接加权融合,全色和多光谱影像的加权系数均为 0.5,(f)和(g)分别为 IHS 变换和 PCA 变换的融合结果,(h)为文献[11]提出的 Wavelet Substitution (WS)方法的融合结果,图 2 (e1)~(h1)为图 1(e)~(h)对应方框区域的局部放大图.

同时为了检验本文提出的指标对于影像模糊、噪音、亮度变化等空间特征和光谱特征扭曲的表现能力,对图 1(e)~(h)的融合结果影像进行了各种扭曲操作,包括窗口大小为 3,方差为 1 的高斯模糊、添加均值为 0,方差为 625 的高斯白噪音和均值降低 1.5 倍.

从图 2(e1)~(h1)的局部放大图可以看出,直接加权融合方法的结果最模糊,同时与原始多光谱影像的颜色偏差是最大的;其次是 PCA 变换的结果,灌木丛和草地的颜色与原始多光谱影像有较严重的差距;WS 方法的结果是最好的,既具有高的清晰度,也与原始多光谱影像的颜色最接近.因此从视觉上看,这四种方法的质量排序从高到低为:WS、IHS、PCA、直接加权融合.

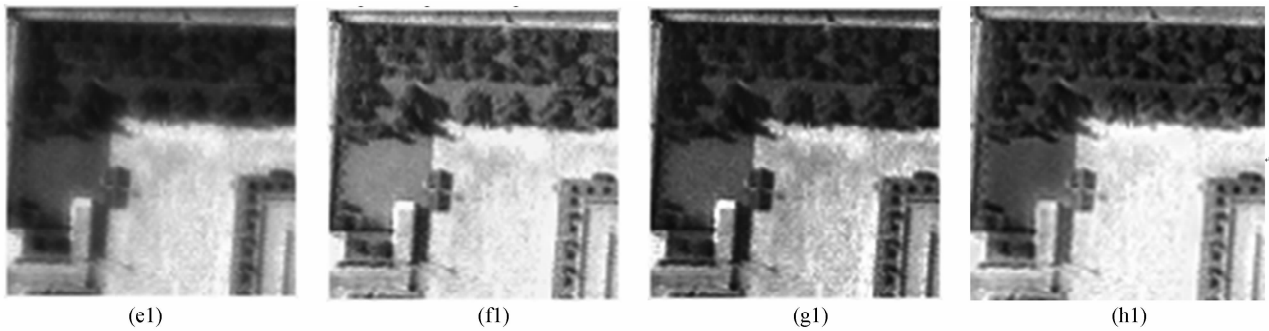


图 2 (e)~(h)影像的局部放大图

Fig. 2 Sub-images of (e)~(h)

作为对比,本文采用了 MI、SSIM 和 FSSI 三个指标对上述融合结果影像进行了客观质量评价,评

价结果如图 3. 其中 e2~h2、e3~h3 和 e4~h4 分别代表高斯模糊、高斯白噪音、均值降低的结果.

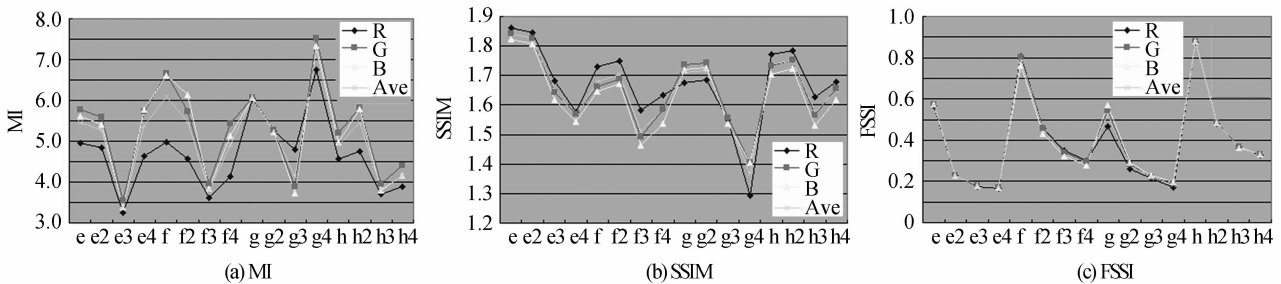


图 3 各影像的客观质量评价结果

Fig. 3 Objective quality evaluation results of all images

从 MI 的计算结果看,IHS 变换的交互信息量最高,WS 的最低,说明 IHS 变换的融合效果是最好的,WS 是最差的;而从 SSIM 的计算结果看,直接加权融合的 SSIM 值远高于其它方法,说明直接加权融合的效果是最好的.但是这与人眼的视觉评价结果完全不一致.而在 FSSI 的计算结果中,WS 的计算结果远高于其他方法,直接加权融合的 FSSI 值最低,其次是 PCA 变换,IHS 变换的效果比直接加权融合和 PCA 变换的效果要好,这与人眼视觉评价结果是完全一致的.

加噪音后影像质量均为最低,PCA 变换结果的亮度降低后 MI 值反而增高,WS 方法结果进行高斯模糊后 MI 值增高,这与实际效果是不一致的,这也说明 MI 在这两种特征扭曲的评价上不够稳定.在 SSIM 指标中,直接加权融合和 PCA 变换结果亮度降低后效果最差,而 IHS 变换和 WS 方法却是添加噪音后效果最差,这说明 SSIM 指标的评价结果也不够稳定.而在 FSSI 指标上,四种融合方法对应的特征扭曲影像评价结果是一致的,亮度降低后质量均为最差,最好的是影像模糊,这也与人眼的视觉评价是一致的,同时 WS 方法的结果影像经特征扭曲后计算

对于各种特征扭曲客观评价,在 MI 指标中,添

的 FSSI 值仍然比同样扭曲的其它方法结果影像要高,这都说明 FSSI 指标的评价结果非常稳定.

采用其他几种传感器所获取的全色和多光谱影像,包括 QuickBird、WorldView-2、SPOT 和 TM 进行融合实验并进行质量评价,表 1 中仅列出了 3 个波段的平均值:

表 1 多种传感器全色和多光谱影像融合质量评价结果

Table 1 Quality assessment of multi-sensors image fusion

		Weighted	IHS	PCA	WS
SPOT+TM	MI	6.184 8	5.609 5	5.633 3	5.169 5
	SSIM	1.721 1	1.518 9	1.530 1	1.607 8
	FSSI	0.558 7	0.703 4	0.632 5	0.801 0
QuickBird	MI	6.257 3	7.304 3	8.065 0	6.548 8
	SSIM	1.801	1.615 9	1.665 1	1.686 9
	FSSI	0.626 0	0.763 6	0.625 1	0.809 3
WorldView-2	MI	7.880 1	7.056 8	7.404 2	6.285 8
	SSIM	1.942 7	1.889 7	1.891 0	1.899 0
	FSSI	0.715 5	0.882	0.697	0.899 4

结合表 1 和图 3 可以看出,直接加权融合影像计算出的 SSIM 值都要高于其它方法,传感器类型不一样,得到最大 MI 值的融合方法也不一样,对与 SPOT 和 TM、WorldView-2,直接加权融合方法计算的 MI 值最大,而对于 IKONOS 和 QuickBird 影像,则分别是 IHS 变换和 PCA 变换.但是无一例外的是,WS 方法计算的 MI 和 SSIM 值都是最低,说明 WS 方法得到的融合影像的质量是最差的.而实际上,这与人眼视觉评价结果是完全相反的.只有 FSSI 指标的计算结果与人眼视觉评价结果完全一致,这也说明了 FSSI 指标要优于 MI 和 SSIM.

从上述多种传感器影像的融合实验可以看出,MI 指标出现的波动非常大,与实际结果有较大的差别,这是因为 MI 指标是基于统计信息的评价方法,在统计过程中没有考虑影像的结构信息,同时也不符合人眼的视觉特性,因此往往得出与人眼主观评价不一致的结果.SSIM 指标考虑了影像的结构信息,符合人眼视觉特性,因此在大多数情况下都能得出正确的结论,但是在实验中也发现,空间结构相似度和光谱结构相似度随融合方法的不同有很大的差别,例如在 QuickBird 影像融合实验中,PCA 变换的平均空间结构相似度高达 0.991 0,而平均光谱结构相似度仅为 0.674 2,WS 方法则相反,平均空间结构相似度和平均光谱结构相似度为 0.748 1 和 0.938 8,直接加权融合方法由于将全色和多光谱影像等同对待,因此平均空间结构相似度和平均光谱结构相似度非常接近,为 0.899 8 和 0.901 8.但是将两者相加之后,直接加权融合的 SSIM 值最大.PCA 变换等方法在保持全色影像空间细节方面具

有很大的优势,而 WS 方法则更能保持多光谱影像的光谱信息,因此它们的 SSIM 指标在空间和光谱结构上均有所偏重,造成整体值不高,这也说明 SSIM 指标具有一定的局限性,与融合方法有较大的关系.而 FSSI 指标继承了 SSIM 在结构判断和人眼视觉特性方面的优势,综合考虑了空间结构和光谱结构的特性,能取得与人眼主观评价一致的结果.

## 4 结论

本文在分析现有影像融合评价指标的基础上,根据人眼视觉特性,引入结构相似度概念,提出了一种基于结构相似度的遥感影像融合评价指标 FSSI,首先从融合结果影像和原始全色和多光谱影像中提取空间特征和光谱特征,然后综合计算空间特征和光谱特征的结构相似度作为评价指标,达到评价影像质量的目的.通过对多种传感器获取的遥感影像进行融合实验,结果表明本文方法是一种客观有效的遥感影像融合质量评价方法,它能够充分考虑人眼视觉特性和影像结构,同时弥补 SSIM 方法依赖于融合方法的不足,因而与主观评价结果一致.本文基于特征的思路可为后续设计更好的评价方法提供参考.

### 参考文献

- [1] MALPICA J A. Hue adjustment to IHS pan-sharpened IKONOS imagery for vegetation enhancement [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, **4**(1): 27-31.
- [2] CHAVEZ P S, SIDES SC, ANDERSON J A. Comparison of three difference methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1991, **57**(3): 295V303.
- [3] NA Yan, SHI Lin, YANG Wan-hai. Remote sensing image fusion with wavelet packet transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 736-738.  
那彦,史林,杨万海.小波包变换与遥感图像融合[J].光子学报,2004,**33**(6):736-738.
- [4] CHEN Shao-hui, ZHANG Ren-hua, Su Hong-bo, et al. Scaling-up transformation of multisensor images with multiple resolutions[J]. *Sensors*, 2009, **9**: 1370-1381.
- [5] LIU Kun, GUO Lei, CHEN Jing-song. Image fusion algorithm based on contourlet domain hidden markov tree models[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(8): 1383-1387.  
刘坤,郭雷,陈敬松.基于 Contourlet 域隐马尔可夫树模型的图像融合算法[J].光子学报,2010,**39**(8):1383-1387.
- [6] SHI Liang-wu, LIN Li-yu, WANG Si-chun, et al. Image fusion based on data assimilation and differential evolution algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(9): 1688-1692.  
石良武,林立宇,王四春,等.基于数据同化和差分进化算法的图像融合[J].光子学报,2010,**39**(9):1688-1692.
- [7] WANG Z, BOVIK A C. A universal image quality index[J]. *IEEE Signal Processing Letter*, 2002, **9**(3): 81-84.
- [8] WALD L. Quality of high resolution synthesized images: Is there a simple criterion? [C]. in *Proc. Int. Conf. Fusion Earth Data, SEE/URISCA*, 2000:99-105.

- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] JORGE N, XAVIER O, OCTAVI F, *et al.* Multiresolution-based imaged imaged fusion with additive wavelet decomposition [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, **37**(3):1204-1211.

## Feature-based Remote Sensing Image Fusion Quality Metrics Using Structure Similarity

LIU Jun<sup>a</sup>, SHAO Zhenfeng<sup>b</sup>

(a. School of remote sensing of information and engineering; b. State key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** By analyzing the existing assessment of image fusion quality, according to the characteristic of human visual system, a novel remote sensing image fusion quality assessment was proposed, which was based on the feature and structure similarity. Firstly, the spatial feature and spectral feature were extracted from the fused image and the original panchromatic (PAN) and multispectrum (MS) images, then the structure similarity of the spatial feature and spectral feature were involved to calculate the assessment index, so as to achieve the evaluation of image quality. The experimental results and objective evaluations indicate that, the evaluation of the proposed assessment is consistent with the subjective evaluation, which shows that the proposed method is an objective and effective assessment for the remote sensing image fusion quality metrics.

**Key words:** Structure similarity; Feature-based Structure Similarity Index; Remote sensing image fusion; Quality metrics;