

基于局部信息熵及其分布特性的图像融合算法

张易凡, 何明一

(西北工业大学电子信息学院, 陕西省信息获取与处理重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 提出了一种新的基于 HIS 模型的图像融合算法, 根据源图像在有向梯度域中的局部信息熵及其分布情况确定融合准则。对实验结果的主观定性评价和客观定量分析说明, 新算法在有效保持空间信息的同时, 产生的光谱畸变较小, 对全色图像中的噪声有一定的免疫力, 从而克服了现有同类算法光谱失真严重和对源图像中噪声敏感的缺点。

关键词: 多光谱; 全色; 图像融合; 有向梯度塔形结构

Image Fusion Algorithm Based on Local Information Entropy and Its Distribution Property

ZHANG Yifan, HE Mingyi

(Shanxi Key Laboratory of Information Acquisition and Processing,
School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

【Abstract】 This paper proposes a new multispectral and panchromatic image fusion algorithm based on HIS model. The new algorithm determines fusion rule according to local information entropy and its distribution property in orientated gradient domain. The subjective qualitative evaluation and objective quantitative analysis of experiment results prove that this new algorithm can produce fusion image that preserves spatial characteristics effectively and introduces less spectral distortion. It is also less sensitive to the noise in source panchromatic image compared with some existing algorithms.

【Key words】 Multispectral; Panchromatic; Image fusion; Orientated gradient pyramid structure

多光谱(MS)图像与全色(Pan)图像的融合算法研究是一个研究热点, 常见的方法有HIS变换法, Brovey变换(BT)法和主成分分析(PCA)法等^[1,2]。其中, HIS图像融合模型是应用最为广泛的模型之一, 并且已作为一种标准的处理方法广泛地存在于许多商业软件包中。基于此模型的现有融合算法的主要缺点包括光谱失真严重和对源图像中的噪声敏感。对于主要为融合图像提供光谱信息的MS图像中的噪声, 可在融合前采用适当的滤波器进行去噪预处理。对于作为融合图像主要空间特征来源的Pan图像, 去噪预处理并不是理想的途径, 因为一般的去噪滤波器在降低噪声的同时也破坏了图像的部分空间高频特征。本文的研究内容正是针对如何在有效融合源图像的光谱及空间特征的同时提高融合算法的抗噪声性能这一问题而展开的。本文通过分析噪声信号和空间特征的信息量分布特点, 提出了一种新的多光谱与全色图像的融合算法, 将多光谱图像的I分量与全色图像在有向梯度域根据局部信息熵及其分布特性进行融合。实验结果说明, 这种新的融合算法不但能够有效地提取全色图像的空间信息, 还能较好地保持多光谱图像的光谱特性, 产生较少的光谱扭曲, 并且对全色图像中的噪声具有较强的抵抗力。

1 融合结构与方法

1.1 HIS 图像融合模型

HIS 图像融合模型如图 1 所示, 图中 HIS 表示 RGB-HIS 彩色空间变换, iHIS 表示其逆变换, T 表示某种域变换, iT 表示对应的逆变换。基于此模型的融合方法之间的差别主要在于具体采用的域变换(T)和融合准则(Fusion Rule)。文献[3]

采用标准高斯 - 拉普拉斯塔形结构对源图像进行多分辨率分析, 并选取对应分解层对应位置上的最大系数作为融合结果在该位置的取值, 这种基于像素(pixel-based)的选择策略会导致融合结果在变换域每个位置上的取值来自于单一源图像且与其邻域像素所包含信息无关, 从而引起信息丢失。文献[4]提出了一种小波域替代法的改进算法, 该算法能够较明显地降低融合结果的光谱扭曲度, 但由于融合结果的高频信息完全来自于 Pan 图像, 若 Pan 图像被噪声污染, 融合结果的质量也将有大幅度的下降, 即算法的抗噪声性能较差。文献[5]使用有向梯度塔形结构分解建立了基于人类视觉的融合算法, 应用于 MS 与 Pan 图像融合时, 虽能较为有效地保留源图像的空间特征, 但光谱扭曲度较大, 而且不能有效区分 Pan 图像中的高频空间特征与噪声。

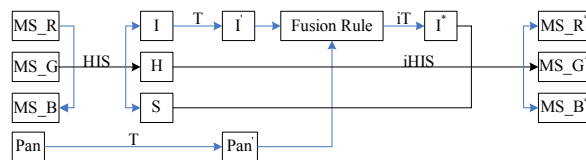


图 1 HIS 图像融合模型

1.2 域变换

在计算机视觉中, 直接从图像像素入手进行分析是很困

基金项目: 国防基础“973”计划基金资助项目; 航空科学基金资助项目(01F53028)

作者简介: 张易凡(1979 -), 女, 博士生, 主研方向: 多源遥感图像融合; 何明一, 教授、博导

收稿日期: 2005-11-24 **E-mail:** zhangyifan@mail.china.com

难的,多分辨分析应运而生,并已在图像处理领域得到了广泛的应用。具有代表性的多分辨结构有小波分解结构、拉普拉斯塔形结构、对比度塔形结构、FSD 拉普拉斯塔形结构以及本文所采用的有向梯度塔形结构等。

有向梯度塔形结构以人类视觉特点为出发点,不但能够完成其它多分辨分析方法将图像特征分解至不同尺度的功能,还能够将各尺度的高频信息细分至 4 个方向,更有利于进行图像高频特征融合^[5]。设分解级数为J,则MS图像I分量, Pan图像以及融合结果F的有向梯度塔形结构分解结果可分别表示为

$$\begin{aligned} D_{MS_I} &= \{A^{MS_I}, D_{kl}^{MS_I} \mid k=1, \dots, J; l=1, 2, 3, 4\}, \\ D_{Pan} &= \{A^{Pan}, D_{kl}^{Pan} \mid k=1, \dots, J; l=1, 2, 3, 4\}, \\ D_F &= \{A^F, D_{kl}^F \mid k=1, \dots, J; l=1, 2, 3, 4\}. \end{aligned}$$

1.3 融合准则

1.3.1 低频信息融合

对于反映低频信息(光谱特征)的 A 分量,一般有选择和加权两种融合方式。由于光谱特征主要分布在 MS 图像中,因此本文采用选择方式,即 $A^F = A^{MS}$ 。

1.3.2 高频信息融合

现有的融合算法多是从图像信息量或能量的角度进行比较以确定融合准则。Pan 图像的空间高频特征较 MS 图像突出,通常反映为信息量或能量相对较大,往往被选中作为融合图像的高频信息源。然而当 Pan 图像被噪声污染时,由于噪声的信息量或能量也较大,也会被误当作高频特征保留,致使融合结果信噪比大幅度降低。本文算法根据局部信息熵的大小及其分布特性确定融合准则,即除考虑信息量外,还加入了对信息量分布情况的分析,这样就能在一定程度上将噪声和有用高频特征进行区分,从而提高融合结果的信噪比。定义位置 (i, j) 的局部信息熵为在其某个邻域 ω 内按照 Shannon 信息论计算所得的信息熵(如式(1))。局部信息熵能够从一定程度上反映出图像在该位置所含信息量的大小。定义大小为 $M \times N$ 的滑动窗口, M 和 N 一般为奇数(如 $3 \times 3, 3 \times 5$),计算滑动窗口内各像素局部信息熵的区域方差(如式(3))作为窗口中心位置的局部信息熵分布特征值,它能够反映出该位置邻域内的信息分布情况,分布特征值越小,说明该位置邻域内的信息分布越趋于均衡,各像素点之间的信息量差异越小(即图像特征越不明显),反之说明该位置邻域内的信息分布越离散,各像素点之间的信息量差异越大(即图像特征越明显)。

$$entropy(i, j) = -\sum_{\omega, x} p_x \ln p_x \quad (1)$$

$$\overline{entropy}(i, j) = \frac{1}{MN} \sum_{m=-[M/2]}^{[M/2]} \sum_{n=-[N/2]}^{[N/2]} entropy(i+m, j+n) \quad (2)$$

$$ent \text{ var}(i, j) = \frac{1}{MN-1} \sum_{m=-[M/2]}^{[M/2]} \sum_{n=-[N/2]}^{[N/2]} (entropy(i+m, j+n) - \overline{entropy}(i, j))^2 \quad (3)$$

在 Pan 图像无噪声情况下,局部信息熵大的像素含有的空间特征较为丰富,在融合过程中应予以保留。当 Pan 图像被同样属于空间上高频信息的噪声污染时,单靠局部信息熵已不能有效区分图像空间特征和噪声。然而,由于噪声信号是杂乱无章的,因此其局部信息熵分布趋于均匀,即局部信息熵的区域方差较小;而空间特征的分布往往是有规律的,因此其局部信息熵分布是较为离散的,即局部信息熵的区域

方差较大。如果在比较局部信息熵的同时,也将其区域方差进行比较,则可以排除因噪声引起的局部信息熵增大,从而将噪声与空间特征加以区分。根据上述思路,本文采用如下所描述的融合准则:

$$\begin{cases} D_{kl}^F(i, j) = D_{kl}^{Pan}(i, j), & entropy_{Pan}(i, j) \geq entropy_{MS}(i, j) \\ & \text{and } ent \text{ var}_{Pan}(i, j) \geq ent \text{ var}_{MS}(i, j) \\ D_{kl}^F(i, j) = D_{kl}^{MS}(i, j), & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

最后对有向梯度塔形结构 D_F 进行重构,得到融合结果 F 。

2 实验结果与分析

作者在 ENVI/IDL 平台上将本文算法同现有的一些同类经典算法^[3-5]进行了比较。实验中,选取 ω 为 3×3 的正方形区域,滑动窗口大小为 3×3 。

2.1 模拟实验

2.1.1 无噪实验

本文在模拟实验中,对原彩色图像(图 2(a))进行空间下采样以降低其空间分辨率作为 MS 图像(图 2(b)),将原彩色图像对应的灰度图像作为 Pan 图像(图 2(c)),其理想融合结果应为原彩色图像。图 2(e)~图 2(h)分别是各融合算法的融合结果(分解层数 $J=3$),主观观察可得如下结论:(1)各方法都能够有效的从 Pan 图像中提取空间信息,以提高融合结果的空间分辨率;(2)文献[3]和文献[5]方法的融合结果与原彩色图像在色彩上的差异(即产生的光谱畸变)较大,文献[4]和本文方法的融合结果与之差异较小。



图 2 几种经典算法的融合结果比较($J=3$)

为了能够对融合结果进行客观的评价,本文采用光谱扭曲度、高频相关系数^[6]以及通用彩色图像质量度量^[7]作为融合结果质量评价参数。光谱扭曲度定义为融合图像与 MS 图像之间对应位置的平均差异:

$$D_k = \frac{1}{KL} \sum_{i,j} |I_F^k(i, j) - I_{MS}^k(i, j)| \quad (5)$$

其中, I_F 表示融合图像, I_{MS} 表示 MS 图像, 大小均为 $K \times L$, k 可分别取 R、G、B 通道。光谱扭曲度能够客观地反映融合图像相对于 MS 图像的光谱信息丢失情况,其值越小说明融合图像越多保留了 MS 图像中的光谱信息,产生的光谱畸变越小。

高频相关系数定义为融合结果高频分量与 Pan 图像高频分量之间的相关系数:

$$C_k = \text{Corr}(H(I_F^k), H(I_{Pan}^k)), \text{Corr}(A, B) = \frac{E\{[A - E(A)][B - E(B)]\}}{\sqrt{D(A)}\sqrt{D(B)}} \quad (6)$$

其中, I_{Pan} 表示 Pan 图像, $H(\bullet)$ 表示采用高通滤波器提取图像

的高频分量。高频相关系数能够客观地反映融合图像的空间特征保留情况,其值越大说明融合图像越多地保留了Pan图像中的空间特征,融合结果的空间信息质量越高。

通用彩色图像质量度量(UCIQM)是一种新的衡量彩色图像差异的度量标准,它将彩色图像变换至去相关彩色空间($1\alpha\beta$ 彩色空间),并在此空间进行质量度量计算。实验表明,它较现今常用的衡量准则(如:均方根误差,峰值信噪比等)能够更有效地评价彩色图像质量,特别适用于图像压缩、彩色图像增强以及彩色图像融合等算法的质量评价^[7]。

由图3所示的评价参数统计图可以得出如下结论:(1)随着分解层数的增加,各种方法融合结果的光谱扭曲度均呈上升趋势;(2)分解层数较小时,文献[4]方法融合结果的高频相关系数增加较快,然后随着分解层数的增加趋于平衡,其它几种方法融合结果的高频相关系数变化不大;(3)较其它两种方法而言,文献[3]、文献[5]方法融合结果的各项指标随分解层数变化较小,说明这两种方法受分解层数的影响较小;(4)本文方法融合结果产生的光谱扭曲度较小,说明本文方法在保留MS图像光谱信息方面较优,文献[4]方法融合结果的高频相关系数较大,说明该方法在保留Pan图像空间信息方面较优;(5)本文方法融合结果的UCIQM较其它几种方法大,说明本文方法的融合结果最接近理想结果。

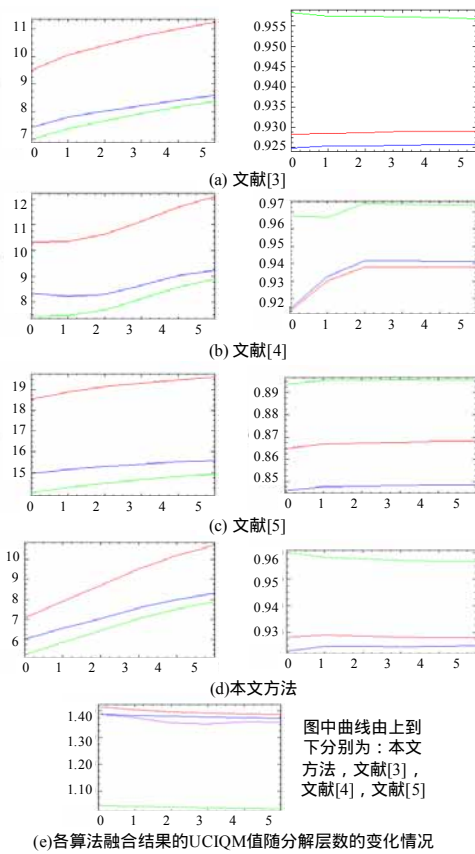


图3 评价参数统计

2.1.2 抗噪性实验

为了检验算法的抗噪声性能,通过在全色图像的某些区域加入高斯白噪声来创建被噪声污染的测试全色图像(图2(d)),上述算法的融合结果如图2(i)~图2(l)所示,并与无噪声时的融合结果进行信噪比分析。

从表1结果可知,本文算法的融合结果具有较高的整体信噪比和区域信噪比,因此受全色图像中噪声的影响较其它

算法小。而且,对于噪声较大的区域1(左侧含噪区)和噪声较小的区域2(右侧含噪区)的信噪比差异较其它算法小,说明该算法受噪声大小的影响较小。

表1 算法抗噪性分析

| 信噪比 (dB) | 文献[3] | | | 文献[4] | | | 文献[5] | | | 本文方法 | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | R | G | B | R | G | B | R | G | B | R | G | B |
| 整体 | 28.92 | 30.68 | 32.53 | 25.68 | 27.54 | 29.40 | 20.50 | 22.29 | 24.29 | 32.87 | 34.86 | 36.54 |
| 区域1 | 16.92 | 17.87 | 17.97 | 13.47 | 14.44 | 14.51 | 8.56 | 9.39 | 9.34 | 21.27 | 22.49 | 22.75 |
| 区域2 | 22.73 | 22.98 | 22.66 | 19.61 | 19.99 | 19.46 | 14.64 | 14.94 | 14.71 | 26.98 | 27.39 | 26.68 |

2.2 真实多光谱与全色图像实验

实验数据采用英国伦敦附近某地区的空间分辨率为2.8m的SPOT全色图像和空间分辨率为10m的TM多光谱图像(图4(a)、图4(b)),图4(c)为加入噪声的Pan图像。图4(d)~图4(g)和图4(h)、图4(k)分别为无噪声和有噪声状态各方法的融合结果,表2和表3列出了相关参数值。主观观察和参数分析均能说明本文方法在降低光谱扭曲度和提高融合图像信噪比方面的优势。

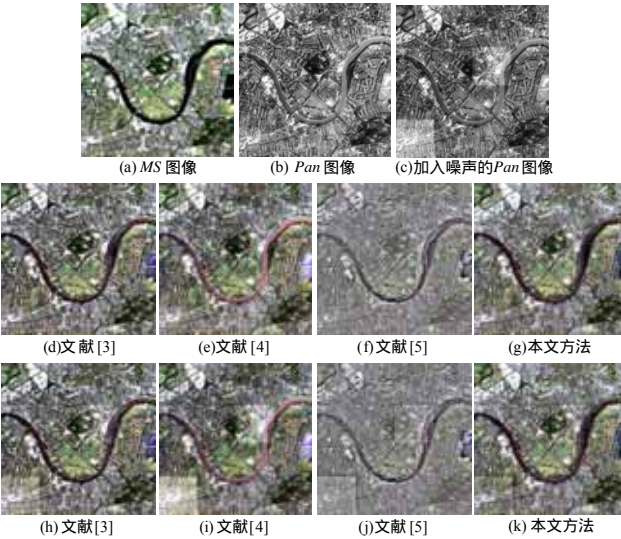


图4 几种经典算法融合结果比较

表2 无噪实验融合结果质量评价

| | 光谱扭曲度 | | | 高频相关系数 | | |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | D _R | D _G | D _B | C _R | C _G | C _B |
| 文献[3] | 25.614 5 | 26.448 1 | 25.096 3 | 0.973 222 | 0.974 119 | 0.970 669 |
| 文献[4] | 33.554 9 | 34.317 4 | 33.060 9 | 0.990 272 | 0.994 932 | 0.986 225 |
| 文献[5] | 79.117 5 | 81.535 3 | 77.404 6 | 0.934 080 | 0.935 612 | 0.933 878 |
| 本文方法 | 21.064 8 | 21.868 0 | 20.525 7 | 0.980 761 | 0.981 392 | 0.977 662 |

表3 算法抗噪性分析

| 信噪比 (dB) | 文献[3] | | | 文献[4] | | | 文献[5] | | | 本文方法 | | |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | R | G | B | R | G | B | R | G | B | R | G | B |
| 整体 | 20.31 | 20.42 | 20.53 | 17.01 | 17.05 | 17.20 | 13.34 | 13.47 | 13.47 | 22.90 | 23.04 | 23.15 |
| 区域1 | 10.45 | 10.45 | 10.64 | 7.16 | 7.14 | 7.34 | 3.35 | 3.35 | 3.41 | 12.90 | 12.91 | 13.08 |
| 区域2 | 12.75 | 12.88 | 12.97 | 9.75 | 9.76 | 9.86 | 5.61 | 5.80 | 5.69 | 15.30 | 15.50 | 15.60 |

3 总结

针对基于HIS图像融合模型的现有多光谱与全色图像融合算法中存在的问题,本文以基于人类视觉特点的有向梯度塔形结构为基础,根据源图像在有向梯度域的局部信息熵及其分布特点确定融合准则,从而建立了一种新的融合算法。通过模拟数据和真实遥感数据的实验以及对融合结果的主观视觉评价和客观定量分析,表明本文方法与现有同类典型方法相比,能够在充分保留全色图像丰富空间特征的同时,引起更少的光谱畸变,并且能够有效地区分全色图像中的高频空间特征和噪声,得到高信噪比的融合结果。

(下转第30页)