基于奇异值分解的遥感图像融合性能评价

朱卫纲 周荫清 徐华平 李春升

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 研究遥感图像融合性能的客观评价问题,分析当前遥感图像融合效果评估方法特点的基础上,提出一种新的遥感图像融合效果评估方法——基于奇异值分解(SVD, Singular Value Decomposition)的方法. 利用源图像与融合结果图像的奇异值差异,测量它们之间能量信息失真情况,从而进行融合算法的评估. 仿真实验从两方面入手,当融合源图像中含有 SAR (Synthetic Aperlure Radar)图像时,对比 Piella和 Xydeas评估方法较为有效;另一方面,对多类型传感器、不同方法的像素级融合结果进行评估,与主观评价结果对比具有较高的一致性. 这种客观评估方法能够较好地反映多类遥感图像融合的质量,是一种实现简单、高效、较为通用的遥感图像融合效果评估方法.

关 键 词: 遥感; 融合; 图像质量; 评估

中图分类号: TP 7

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)12-1448-04

Remote sensing image fusion assessment based on SVD

Zhu Weigang Zhou Yinqing Xu Huaping Li Chunsheng

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Existent measures of fused image quality were analyzed to research the objective evaluation problem of remote sensing image fusion. A new approach based on the singular value decomposition (SVD) was proposed for the remote sensing image fusion assessment. This method measured the divergence of the singular value features between the source images and fused image, and calculated energy distortion of fused image from source images. By that means, effect of fusion algorithm was measured. Experiments were conducted from two aspects to confirm the idea. When the source images including SAR image, this method is more effective than the Piella's evaluation methods and Xydeas's evaluation methods. In the other hand, the experiments of different kinds of sensors and pixel-level fusion algorithms show that the objective evaluation appears highly consistent with the subjective evaluation. It is an effective and universal assessment method with high coherence to the subjective factors.

Key words: remote sensing; fuses; image quality; evaluation

遥感图像融合在各发达国家、很多应用领域倍受重视且快速发展. 如何有效地获取、开发与应用空间遥感信息资源是国家信息化进程中的重要内容. 能够对不同的融合技术的性能进行客观、系统、全面地评价,成为遥感图像融合研究领域中亟待解决的问题. 融合质量的客观评价可用来指导融合,提高融合的效果,优化系统的配置,不可否认,将融合效果评价的信息加入到融合准则的确定和参数的选择过程中,可以更充分地利用信息源提供的信息,得到比开环融合过程更好的效果[1]. 开展遥感图像融合性能评估技术的研究有着十分重要的意义和实用价值.

近年来,关于图像融合算法的研究很多,各种算法有其各自的特点,相对应地提出了评估融合效果的方法. 现有的客观评价方法主要可以分为两大类:单因素指标评价方法和综合评价方法. 其

收稿日期: 2007-12-20

作者简介: 朱卫纲(1973-),女,陕西西安人,博士生, yi_yun_hou@sina.com.

中单因素评价指标主要有:方差、信息熵、交叉熵、互信息、偏差度、相关系数、均方根误差、信噪比、峰值信噪比、平均梯度、空间频率等.但这些单指标有的是对图像的同一性质进行的评价,过于雷同,说服力不强;有的单指标之间所得出的评价结果相互矛盾,不能得出一个正确、统一的结论;有的需要利用标准图像或参考图像进行评估,而在遥感图像融合中获取标准图像或参考图像是一难点;另外,在很多情况下,这些客观评估结果与主观评价存在较大差异.综合这些问题,人们力求寻找一种结合人类视觉特点、主观与客观因素相结合、不需参考图像、通用的综合评价方法.具有代表性的是 Piella依据图像质量指数[2]提出的基于结构性失真的融合图像质量客观评价方法[3],以及 Xydeas提出的源图像与融合结果图像边缘信息相似性的融合图像质量客观评价方法[4].在对可见光、多光谱、红外图像融合时,这两种评估方法都表现出较好的可用性,但当参与融合的源图像中有 SAR(Synthetic Aperlure Radar)图像时,由于斑点噪声的影响,评估结果则不尽人意.而 SAR具有主动、全天时、全天候、高分辨率成像的能力,是遥感领域重要的传感器之一.因此,在研究遥感图像融合效果评估时,必须考虑是否适用于 SAR图像,是否具有真正的通用性.针对上述问题,本文提出利用源图像和融合结果图像奇异值特征的相似性作为度量,测量它们之间能量信息失真情况,从而评价融合算法的好坏.

1　图像的奇异值分解及其特性

定理 1　(奇异值分解 SVD(Singular Value Decomposition))若矩阵 $A \in R^{m\times n}$,则存在正交矩阵

$$U = [u_1, u_2, \cdots, u_m] \in R^{m\times m} \qquad U^{\mathrm{T}}U = I$$

$$V = [v_1, v_2, \cdots, v_n] \in R^{n\times n} \qquad V^{\mathrm{T}}V = I$$

使得　$V^{\mathrm{T}}AV = \mathrm{diag}[\sigma_1, \sigma_2, \cdots, \sigma_p] = W$

$$p = \min(m, n)$$

即

$$A = UWV^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

该式称为 A的奇异值分解.矩阵的度量特征与其奇异值密切相关.其中,$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \cdots \geq \sigma_p > 0$,$\sigma_i$ $(i = 1, 2, \cdots, p)$为 A的奇异值,是 AA^{H}或 $A^{\mathrm{H}}A$ 的特征值 λ_i的平方根,即 $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$.

在对图像进行处理时,输入图像、中间处理图像及输出图像常常以矩阵的形式表示,因此多数情况下,都可以对图像进行奇异值分解.奇异值特征是一种性质良好的代数特征,反映了图像的内在属性,是一种本质特征[5].

又已知,一个矩阵 A的能量 E可以用它的 Frobenius范数表示.即 $E = \|A\|_{\mathrm{F}}$,则有

$$E = \|A\|_{\mathrm{F}} = \|UWV^{\mathrm{T}}\|_{\mathrm{F}} = \|U\|_{\mathrm{F}}\|W\|_{\mathrm{F}}$$

$$\|V^{\mathrm{T}}\|_{\mathrm{F}} = \|W\|_{\mathrm{F}} = \sum_{i=1}^{p}\sigma_i^2 \tag{2}$$

从式(2)可以看出,图像的能量可以完全由图像奇异值的 Frobenius范数来表示,换言之,图像的奇异值代表了图像的能量特征,可以作为衡量图像质量的标准[5],这为提出的图像融合质量评估算法提供了理论依据.

另一方面,矩阵的奇异值具有稳定性、比例不变性和旋转不变性的性质,意味着当图像有微小扰动、对图像进行标准化处理以及旋转变换时,图像奇异值能保持不变,能有效地反映图像的特征,保证了奇异值特征衡量图像融合效果的鲁棒性.

2　遥感图像融合效果评估新方法

文献[6]用奇异值分解的方法获得图像质量图,提出了一种局部和全局评价图像质量的方法.借用这种思想,提出了一种新的遥感图像融合客观评价方法.

已知原始图像 A和图像 B及其融合后图像 F,将各图像按照一定规则进行分块(图像分解为 $k \times k$的小块).再利用矩阵的奇异值分解算法分别计算出各原始图像块及融合图像块的奇异值 σ_A,σ_B和 σ_F.定义各原始图像块与融合图像块奇异值之间的距离.

$$\left.\begin{aligned} D_{AFi} &= \mathrm{sqrt}\left[\sum_{i=1}^{k}(\sigma_{Ai} - \sigma_{Fi})^2\right] \\ D_{BFi} &= \mathrm{sqrt}\left[\sum_{i=1}^{k}(\sigma_{Bi} - \sigma_{Fi})^2\right] \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

其中,σ_{Ai},σ_{Bi}为各原始图像块的奇异值;σ_{Fi}为融合图像块的奇异值;k为每个图像块的尺寸,若整幅图像大小为 $M \times N$,则该幅图像被分割为 $\left[\frac{M}{k}\right] \times \left[\frac{N}{k}\right]$ 小块,其中 $[x]$为不大于 x的整数.根据上节的分析,矩阵的奇异值是图像能量的度量,式(3)实际上反映了各原始图像与融合图像之间能量特征的差异.最后利用下式描述图像奇异值距离间的全局误差,得到由图像 A, B融合成 F的融合效果评价指标 M_{SVD}.

$$M_{\mathrm{SVD}} = \frac{\sum_{i}^{\left[\frac{M}{k}\right]\times\left[\frac{N}{k}\right]} |D_{ABFi} - D_{\mathrm{mid}}|}{\left[\frac{M}{k}\right] \times \left[\frac{N}{k}\right]} \tag{4}$$

其中

$$D_{ABFi} = D_{AFi} + D_{BFi} \quad (5)$$

D_{mid}表示整个奇异值距离 D_{ABFi}的中值.

M_{SVD}描述了融合图像相对于源图像整体能量信息的失真状况. 该值越小,越接近 0,说明失真越小,融合质量越好;反之亦然.

3 实验结果分析

为了验证本文提出的融合效果评估方法的有效性,用 3组实验来说明:第一组实验说明对于源图像中包含 SAR图像情况下, Piella和 Xydeas提出的融合图像质量客观评价方法的不稳健性,及本文方法在该情况下的有效性;第 2组实验通过对 12组融合结果进行评估,说明本文方法的通用性及与主观评价较好地吻合性;最后一组实验简单讨论方法中分块大小 k对评价准确性的影响.

3.1 实验 1

本组实验中的源图像分别为来自 IKONOS拍摄的全色图像及 SAR获得的同地区图像 (见图 1a、图 1b). 图 1c~图 1f分别为基于局部方差加权的融合结果图像、基于局部平均加权的融合结果图像、基于图像分割的融合图像和基于图像显著性水平加权的融合图像. 主观分析融合结果可以看出,从整体视觉效果及保留源图像信息、去除 SAR斑点噪声影响角度考虑,图 1e基本上互补了两幅源图像中的所有有用信息,融合图像失真较少,效果最好;其次分别为图 1c、图 1d和图 1f. 注意图像中央位置 (画白圈处,其局部放大图如 2图所示),图 1e保留原始图像的信息最为完整. 图 1d和图 1f差别很小,但仔细观察可以发现,图像左边 1/3部分信息完整性方面图 1d比图 1f效果好. 用本文方法、Xydeas方法和 Piella方法计算,其结果见表 1.

表 1 图 1的融合结果几种客观评价方法

融合方法	M_{SVD}	Q_Xyedeas	Q_Piella	
			Q	Q_W
局部方差加权融合	1.4577	0.5527	0.0057	0.1158
局部平均加权融合	1.5404	0.5912	0.0059	0.1183
基于图像分割融合	0.9539	0.3374	0.0038	0.0918
图像显著性水平加权融合	1.5408	0.5670	0.0066	0.1202

在运用 Xydeas方法评估时,需采用 sobel算子获得边缘点的强度和方向,由于源图像中 SAR图像受斑点噪声的影响,导致用该方法评估时,得到错误结论;同样情况,在运用 Piella方法时,由方差和均值计算的平均亮度失真和对比度失真,同样也受到 SAR图像斑点噪声的影响,评估结论错误;而运用本文提出的方法得到的评价结果很好地反映了主观评价. 另外,在融合之后的后续处理中,在基于图像分割的融合图像上进行边缘检测和分类效果也是最佳.



a IKONOS源图像 b SAR源图像 c 基于局部方差加权



d 基于局部平均加权 e 基于图像分割 f 基于显著性水平加权

图 1 实验 1

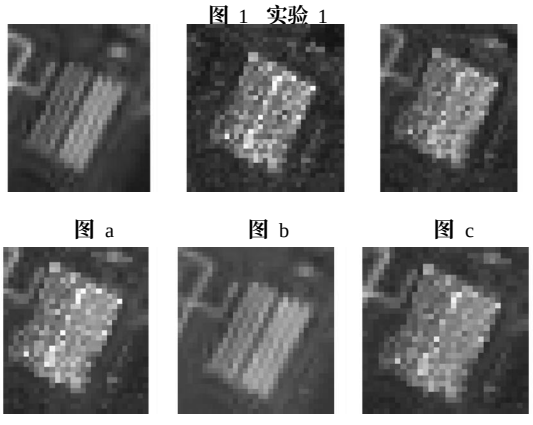


图 a 图 b 图 c

图 d 图 e 图 f

图 2 实验 1图中对应位置局部放大

3.2 实验 2

为了验证本文方法的有效性和通用性,对 8组融合图像 (图 3所示,图像下载自 http://www.isbe.man.ac.uk)进行评价. 融合图像分别为可见光/红外图像融合、多光谱/多光谱图像融合、可见光/可见光图像融合等进行. 融合方法分别是小波变换融合算法和梯度融合算法. 用本文方法对融合结果进行评估,同时请 9位图像工作者对融合结果进行主观评价. 主观评价和客观评价结果列于表 2.

从表 2中可看出,无论对于可见光图像、多光谱图像、还是可见光/红外图像融合,本文提出的评估方法都与主观评价保持了较高的一致性.

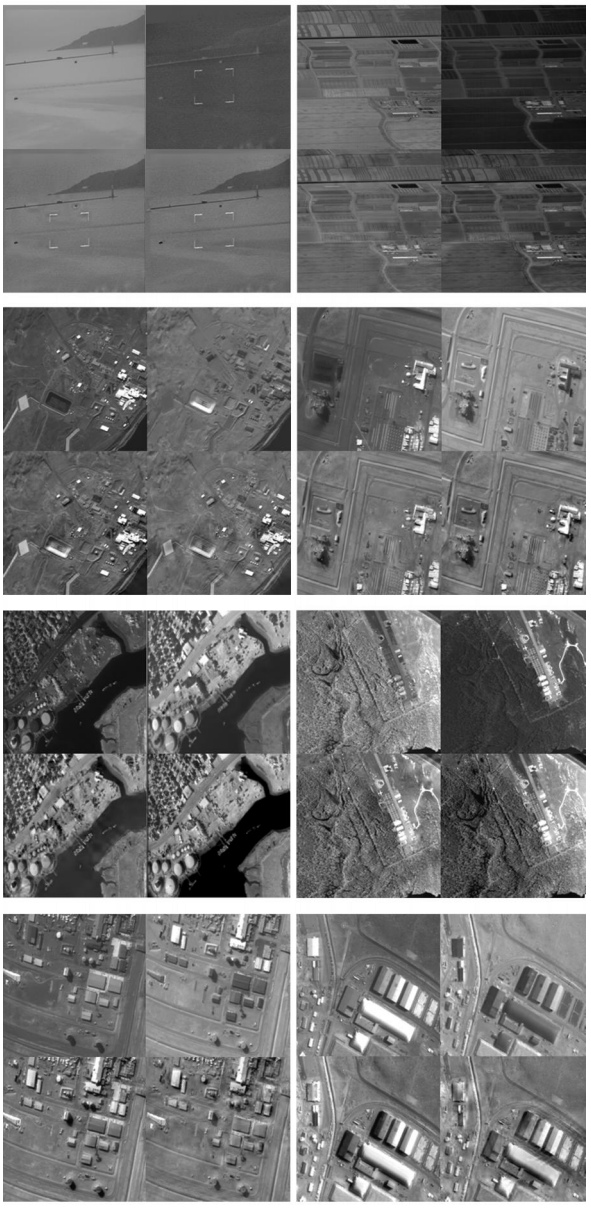


图 3　实验 2中的 8组图像

表 2　一组融合图像的客观和主观评价对比

图像组	主观评价结果		客观评价结果	
	认为融合图像 1好的人数	认为融合图像 2好的人数	融合图像 1的 M_{SVD}	融合图像 2的 M_{SVD}
1	0	9	0.0669	0.0648
2	8	1	0.1172	0.1433
3	6	3	0.1017	0.1043
4	1	8	0.1251	0.1222
5	3	6	0.2288	0.2052
6	5	4	0.1492	0.1423
7	7	2	0.1232	0.1285
8	8	1	0.1703	0.1713

3.3　实验 3

文中主要考虑算法中分块尺寸 k对客观评价结果的影响.用图 1中的几幅融合图像进行分析.让分块尺寸为 [4, 8, 16, 32],分别计算每幅融合图像的评估指标 M_{SVD},其结果如表 3所示.

表 3　不同分块尺寸下客观评价结果

融合方法	4像素	8像素	16像素	32像素
局部方差加权融合	0.7883	1.4577	2.7493	5.4912
局部平均加权融合	0.8147	1.5404	2.9173	5.3764
基于图像分割融合	0.5340	0.9539	1.7275	3.1752
基于图像显著性水平加权融合	0.8332	1.5408	2.9158	5.6499

由表 3可以看出,当 $N<16$时,对图 1的融合结果评价都符合主观排序;当 $N\geq16$时,出现不一致现象,分析原因,可能是当 $N\geq16$时,已经超出了图像的平稳区域尺寸.

4　结 束 语

本文分析了当前遥感图像融合效果评估现状,提出了一种新的遥感图像融合性能客观评估方法——奇异值分解法.对源图像和融合结果图像进行奇异值分解,测量它们之间能量信息失真情况,从而评估融合算法的优良.实验结果表明,该方法不仅可用于评估可见光、多光谱、红外融合图像,且能够对 SAR图像参与融合的问题进行评估,同时更直观简单,且其与人的主观评价结果吻合性较好.

致谢　衷心感谢王鹏波博士后提供了文章中的部分融合图像和宝贵的建议.

参考文献 (References)

[1] 夏明革,何友,唐小明,等.多传感器图像融合综述[J].电光与控制,2002, 9(4):1-7
Xia Mingge, He You, Tang Xiaoming, et al. A survey on multi-sensor image fusion[J]. Electronics Optics & Control, 2002, 9(4):1-7

[2] Wang Z, Bovik A. A universal image quality index [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(3):81-84

[3] Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion [C]//H knutsson. IEEE International Conference on Image Processing Barcelona, Spain: IEEE, 2003: 173-176

[4] Xydeas C S, Petrovid V. Objective image fusion performance measure[J]. Electronics Letters, 2000, 36(4):308-309

[5] 甘俊英,张有为.一种基于奇异值特征的神经网络人脸识别新途径[J].电子学报, 2004, 32(1):170-173
Gan Junying, Zhang Youwei. A new approach for face recognition based on singular value feature s and neural networks[J]. ACTA Electronica Sinica, 2004, 32(1):170-173

[6] Shnayderman A, Gusev A, Eskicioglu A M. A SVD based grayscale image quality measure for local and global assessment [J]. IEEE Transactions on Image Process, 2005, 14(2):422-429

(责任编辑:娄　嘉)