

基于小波域自然影像统计特性的无参考遥感影像质量评价

张飞艳^① 谢伟^② 林立宇^{*③} 秦前清^③

^①(武汉大学电子信息学院 武汉 430079)

^②(武汉大学计算机学院 武汉 430079)

^③(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室 武汉 430079)

摘要: 遥感影像的获取往往受到模糊和噪声的共同影响,使得遥感影像的降质难以归到某一单一降质方式,从而给遥感影像的评价带来困难。在遥感影像小波域统计特性,即子带系数均值呈近似线性关系的基础上,通过对噪声、模糊对影像此线性关系的影响方式及破坏程度的定量分析,来判定影像的噪声和模糊强度,最后,利用二者的加权作为遥感影像的最终质量评价指标。实验表明,与峰值信噪比指标 PSNR 相比,该文指标与结构相似性指标 SSIM 具有更好的一致性,对噪声影像、模糊影像以及同时存在噪声和模糊的遥感影像能够进行有效的、准确的评价。

关键词: 无参考遥感影像质量评价; 影像统计特性; 小波变换; 噪声和模糊

中图分类号: TP751

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)11-2742-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00491

No-reference Remote Sensing Image Quality Assessment Based on Natural Scene Statistical in Wavelet Domain

Zhang Fei-yan^① Xie Wei^② Lin Li-yu^③ Qin Qian-qing^③

^①(Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

^②(Computer School, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

^③(State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying,

Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Remote sensing images are most likely affected by both blur and noise, which makes the quality of them are difficult to obtain for they can not come down to one certain distortion type. Based on the natural scene statistical feature of natural image, the means of wavelet subbands coefficient amplitudes decrease approximately linearly with scale index. This linear feature can be destroyed by both noise and blurriness in different ways, according to the quantitative analysis of the destroyed degree, both blur strength and noise strength of an image can be obtained. Finally, the weighted sum of them are considered as the eventual quality index of the remote sensing image. The experiment shows that, compare with the Peak Signal-Noise Rate (PSNR) index, the proposed index has better consistence with the Structure SIMilarity (SSIM) index, and can make an effective and correct evaluation of noise image, blur image or image with both noise and blur.

Key words: No-reference remote sensing image quality assessment; Image statistical model; Wavelet transformation; Noise and blur

1 引言

影像质量评价是影像处理领域的重要内容之一,评价方法可分为主观质量评价方法(Mean Opinion Score, MOS)和客观质量评价方法。主观评价是指通过多个观察者对测试影像的质量进行主观打分来进行加权平均的综合评价,也称为平均评定

得分法,其速度慢、成本高,在实际应用中受到很大限制。目前人们常用的客观质量评价方法主要指标包括均方误差(Mean Square Error, MSE)、峰值信噪比(Peak Signal Noise Ratio, PSNR)、结构相似性(Structure SIMilarity, SSIM)^[1]等。但是,影像质量的判定最终取决于其使用者^[2],因此客观评价必须与人眼视觉特性相结合。

根据对参考影像的需求,当前客观影像质量评价算法可分为以下 3 种:完全参考影像质量评价,部分参考影像质量评价和无参考影像质量评价^[3]。其

2011-05-25 收到, 2011-08-04 改回

国家 863 计划项目(2008AA1212014), 国家自然科学基金(41001286)和湖北省重点自然科学基金(2009CDA141)资助课题

*通信作者: 林立宇 LinLi_yu@163.com

中,完全参考评价方法的发展已较为完善,用 PSNR, MSE 和 SSIM 评价图像质量都属于这一类,对完全参考影像的需求限制了此类方法的使用。部分参考评价方法是指通过提取能够很好地表征影像的灰度、对比度、结构等主要信息的特征来度量影像质量,随着小波变换技术的发展和各种数学算法在影像处理领域中的应用,此类算法逐渐成为了研究热点。无参考影像质量评价是指通过对大量影像的统计研究,建立起适合某种畸变方式的影像评价模型,来对影像进行质量评价,由于影像的多样性,此类评价方法通常需要建立非常复杂的影像模型,对不同的畸变方式不具有通用性。文献[4]提出了基于影像奇异值分解的质量评价方法可判定影像降质类型,需要原始影像的奇异值向量,属于部分参考评价方法。文献[5]提出了一种基于 DCT 变换的特征提取的无参考算法来评价影像质量,但是仅适用于单一降质方式,且算法复杂,时间效率极低。文献[6]提出了基于自然影像统计特性(Natural Scene Statistical, NSS)和 HVS 的自然影像评价方法,该算法实现简单,对单一降质方式的 JPEG2000 压缩、高斯噪声和高斯模糊能进行有效的评价,但是极大地依赖自然影像库来获取预测矩阵,不能用于实际遥感影像的评价。文献[7]提出了一种两步式自然影像质量评价方法,先对影像进行降质方式判定,再按照判定的降质方式所对应的算法进行质量评价,其本质仍然是针对单一的降质方式进行评价。文献[8]提出了一种可评价同时存在噪声和模糊的影像的算法,该算法主要基于影像的奇异值变化,极大地依赖于影像内容,只能用于对某幅影像去噪过程中,选取质量最好的影像,使得噪声和模糊达到平衡,不适用于多幅影像的质量评价。

与自然影像不同,遥感影像的获取会较多地受到模糊和噪声的共同影响,使得遥感影像的降质难以归到某一单一降质方式,从而给遥感影像的评价带来困难。常见的遥感影像大多同时存在模糊和噪声两种降质的影响,二者无论在空域还是变换域都互相影响,互相抑制,导致无法对其强度进行准确判别。因此,上述已存在的算法都不适用于无参考遥感影像的质量评价。在本文中,通过对遥感影像自然统计特性的分析,同时,深入了解噪声、模糊对影像特性的影响,找出了其对影像的不同影响,并利用其区别对噪声和模糊强度分别进行判定,从而得到遥感影像的最终质量评价指标。

2 基于自然影像统计特征的无参考遥感影像质量评价

2.1 遥感影像的小波域统计特性

影像空间相关性在空间域上表现为像素点间相关度随空间距离增大而减少,在能量谱上则表现为空间频率在对数坐标系上的线性函数^[9]。在小波变换域,尺度代表了空间频率的大小,相邻尺度的空间频率以 2 为倍数递增,各子带的平均能量,类似能量谱中某一空间频率的平均能量,在这里,同样以 2 为底取对数,将子带的平均能量表示为

$$M(l, d) = \text{mean}(\log_2(|C|)) \quad (1)$$

其中 l, d 分别代表小波尺度与子带方向, C 为小波子带系数。

上述子带能量的计算已经取对数,而影像相邻尺度子带间频率呈 2 倍关系,因此,根据自然影像的能量谱线性特性,各子带的平均能量与子带索引(空间频率取对数)间也成线性关系。这里用实际遥感影像加以验证,同时,为了描述影像关键内容的失真,体现影像不同区域在影像质量中的权重,集中选取影像纹理丰富的区域作为考察对象。选取方法是对影像做 4 层小波变换后,对各子带分别进行分析,提取其中绝对值大于子带绝对值均值的系数作为纹理区域。考虑到水平和垂直方向能量的接近程度,我们将水平子带和垂直子带的平均能量做平均,即在一个尺度内,小波系数可分为两部分,即水平垂直平均能量和对角平均能量。

选取 6 幅 worldview2 影像分别做 4 层小波变换,利用式(1)计算各子带均值,则影像小波域统计特性如图 1 所示。其中 I 为小波域均值排列顺序, Mean 为各子带均值。

由图 1 可知,遥感影像小波子带系数统计特性与自然影像类似,也呈近似线性分布。

2.2 噪声对影像小波域统计特性的影响

为了分析噪声对影像的影响,我们对原始影像中的一幅影像加入一系列噪声获取质量不同的一序列噪声影像,画出此序列影像的小波域统计特性图;然后,对多幅原始影像加入同一噪声,画出其小波域统计特性图。如图 2 所示。

由图 2 可知,在噪声存在情况下,影像的小波域统计特性在极大程度上受到噪声的影响,特别是第 1 层分解的对角子带均值,其值的大小可完全反应出影像受噪声的影响程度,且同一噪声对不同影像的影响相同,与影像内容无关。

2.3 高斯模糊对影像的小波域统计特性的影响

为了分析高斯模糊对影像的影响,我们对原始

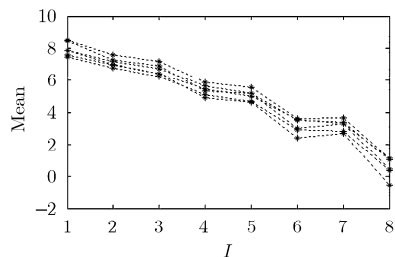
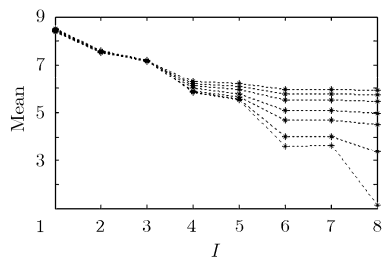
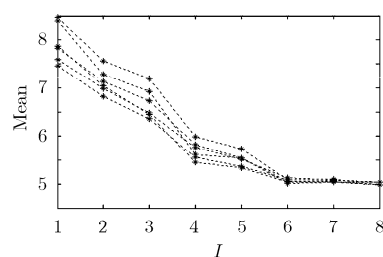


图1 遥感影像小波域统计特性



(a) 单幅影像噪声序列



(b) 多幅影像同一噪声

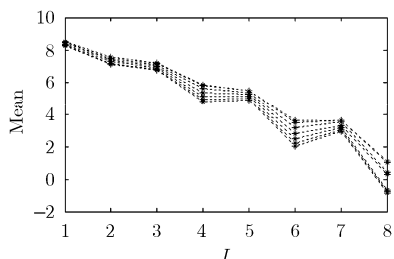
图2 噪声对影像小波域统计特性的影响

影像中的一幅影像加入不同程度的高斯模糊来获取质量不同的一序列模糊影像，画出此序列影像的小波域统计特性图；然后，对多幅原始影像进行相同程度的模糊，画出其小波域统计特性图。如图3所示。

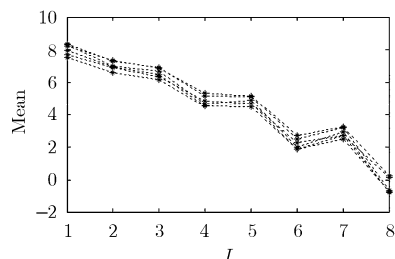
由图3可知，模糊对影像的影响表现在同层分解内的子带上为：对角方向子带的能量减小，即水平垂直分量与对角分量差距增大，在小波域统计特性上表现为影像统计特性不再呈线性、各段斜率变化剧烈，但同程度的模糊对不同影像影响基本一致，与影像内容无关。

2.4 同时存在噪声和模糊时对影像小波域统计特性的影响

为了分析同时存在噪声和模糊时对影像的影响，我们对原始影像中的一幅影像进行高斯模糊后再加入不同强度的噪声获取一序列降质影像，画出此序列影像的小波域统计特性图；然后，对这幅影像进行不同程度的模糊后加入同一噪声，画出其小波域统计特性图；最后，对多幅原始影像进行相同程度的模糊，再加入同一强度的噪声，画出其小波域统计特性图。如图4所示。

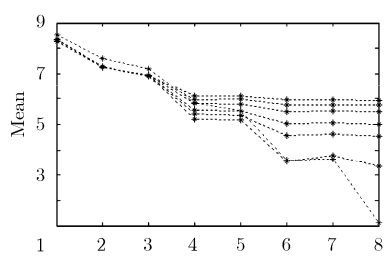


(a) 同一影像模糊序列

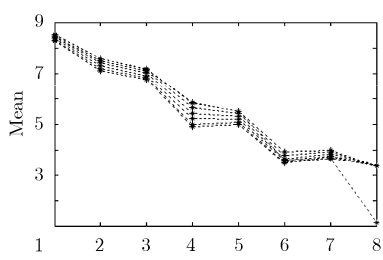


(b) 多幅影像同一模糊

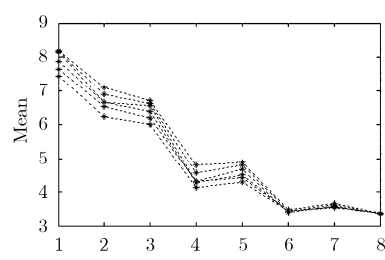
图3 高斯模糊对影像小波域统计特性的影响



(a) 同一模糊，噪声序列



(b) 序列模糊，同一噪声



(c) 多幅影像同一模糊同一噪声

图4 噪声模糊同时存在时对影像小波域统计特性的影响

由图4可知，同时存在噪声和模糊时，二者对影像小波域统计特性的影响区别如下：模糊的影响主要存在于高层分解子带，其对低层分解子带的影响受到噪声的抑制；噪声的影响主要存在于最低层分解子带，且基本可起决定性作用，不受模糊影响。

3 算法实现

通过算法原理分析可知，遥感影像的空间相关性使其能量谱呈现有规律的线性分布。而失真往往会改变能量谱的分布特性，通过原始影像与失真

影像的能量谱对比可发现：能量谱的改变程度与失真程度成正比，可以较好地反应影像质量的变化。因此，基于小波域 NSS 的遥感影像质量评价算法具体实现步骤如下：

步骤 1 以小波第 1 层分解后对角子带系数均值来表征影像的噪声强度，记为

$$NS = \text{mean}(\log_2(|C_{1,d}|)) \quad (2)$$

其中 $C_{1,d}$ 代表第 1 层小波分解对角子带的纹理区域系数。

步骤 2 利用较高 3 层分解子带在统计特性图中的斜率变化程度来表征模糊强度。

(1)求取各子带均值下降速率

$$K(i) = \text{DWTS}(i) - \text{DWTS}(i + 1) \quad (3)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, 5$ 。DWTS(i) 为影像第 i 个子带均值， $K(i)$ 为子带间变化速率。

(2)求取子带间均值下降速率的变化

$$Kc(i) = |K(i) - K(i + 1)| \quad (4)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, 4$ 。

(3)对每个变化赋予一个权重，变化越剧烈权重越大，记为 W

$$W = Kc(i) / \sum_{i=1}^4 Kc(i) \quad (5)$$

(4)原始影像小波域统计特性呈近似线性关系，其斜率变化可看为 0，则模糊强度记为

$$BS = W \cdot Kc \quad (6)$$

步骤 3 为了用一个指标同时评价噪声和模糊共同存在的情况，必须使噪声和模糊在严重程度相同时，评价值也相同，因而，我们在对一幅遥感影像分别进行序列加噪、序列模糊，利用原始影像得

到两个影像序列的结构相似性 SSIM 的值，取出最接近的 SSIM 值所对应的影像，利用本文算法求出其值，实验发现：将模糊影像评价指标扩大 1.6 倍，与同等质量的噪声影像具有相同的测度。因此，将此经验值设定为 $T = 1.6$ 。

步骤 4 基于 NSS 的小波域遥感影像质量评价算法 (wavelet_Natural_Sence_Statistics, WNSS) 可总结为

$$\text{WNSS} = T \cdot \text{BS} + \text{NS} \quad (7)$$

即

$$\text{WNSS} = T \cdot W \cdot Kc + \text{mean}(\log_2(|C_{1,d}|)) \quad (8)$$

步骤 5 探测 WNSS 的极限值，将多幅影像进行极大模糊至影像基本不可用，求取其 WNSS 值；将多幅影像加上极大噪声至影像基本不可用；求出其 WNSS 值；对多幅影像进行极大模糊后，加上极大噪声，求出其 WNSS 值。实验表明，3 种情况下，影像不可用时，WNSS 值都接近但小于 8，因此，本文算法中，影像评价测度范围可定义为 0~8，其中，0 为最优影像，8 为最差影像。

则最终归一化影像评价指标为

$$\text{WNSS} = (T \cdot W \cdot Kc + \text{mean}(\log_2(|C_{1,d}|))) / 8 \quad (9)$$

WNSS 取值范围为 0~1，其值越小，影像质量越好。

4 实验结果

本文算法原理分析过程中采用了 6 幅分别包含森林、荒地、农田、建筑群等典型遥感地物特征的 worldview2 影像进行实验，对影像进行加噪、模糊等一系列处理，实验影像如图 5 所示。对实验影像

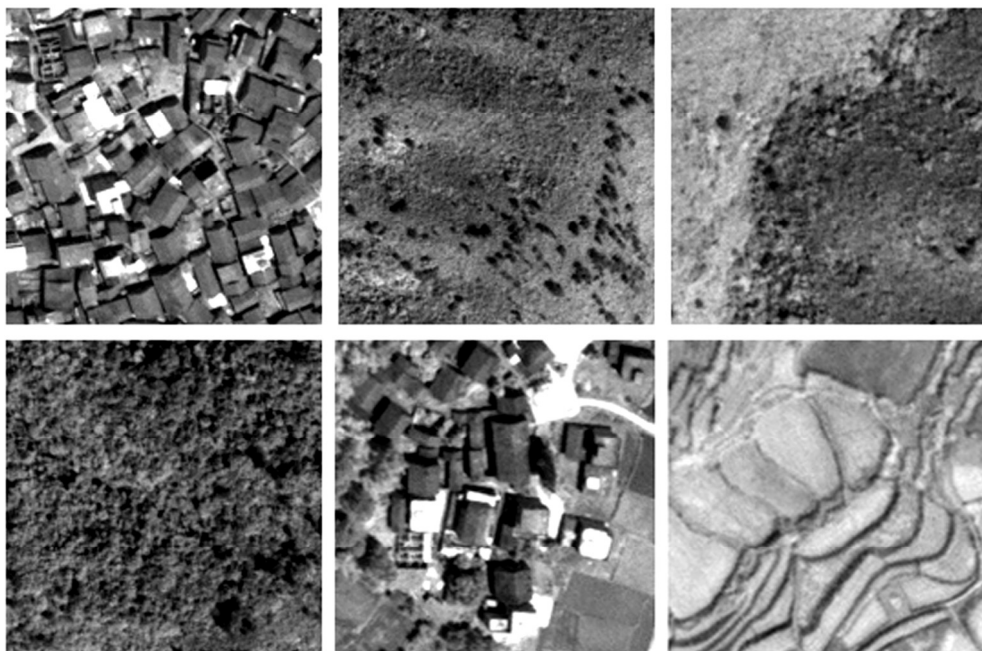


图 5 worldview2 中 6 幅遥感影像

进行有目的的加噪、模糊处理，进行质量评价，求出其 WNSS 值，最后，根据文献[10]中提出的非线性映射公式，利用 Matlab7.5 中的数据拟合工具箱^[11]进行曲线拟合。具体步骤如下所示。

步骤 1 获取降质遥感影像，具体实现如下：

(1)选取前 3 幅影像分别加入高斯噪声，噪声强度为 0.001~0.02，获得一系列噪声影像。

(2)对 3 幅影像分别进行高斯模糊，模糊窗口为 [15,15]，强度为 0.5~3，获得一系列模糊影像。

(3)对 3 幅影像分别进行同一高斯模糊后，加入强度为 0.001~0.02 的高斯噪声，获得一系列同时存在噪声和模糊的影像。

(4)对 3 幅影像分别进行高斯模糊，模糊窗口为 [15, 15]，强度为 0.5~3，再加入强度为 0.001 的高斯噪声，获得一系列同时存在噪声和模糊的影像。

(5)将 3 幅影像通过上述步骤获取的所有影像分别记为 G_1, G_2, G_3 。

步骤 2 为了验证本文评价指标的有效性 with 准确性，我们选取 SSIM 为参考指标，SSIM 由于其对影像结构的考虑，有别于像素级评价算法 PSNR，更符合影像真实质量及人眼视觉特性，在完全参考影像评价领域，已基本取代 PSNR，得到了普遍认可。因此，在缺乏主观评价的情况下，选取其作为本文算法的参考指标，具有较高的可信度。求取 G_1, G_2, G_3 的 PSNR 值，WNSS 值和 SSIM 值，将 PSNR 值与 WNSS 值分别与 SSIM 值进行拟合，如图 6 所示。

通过 3 个定量指标来评价拟合效果，即线性相关性 CC，决定系数 R-square，均方根误差 RMSE，如表 1 所示。

由图 6 和表 1 可知，本文提出的遥感影像质量评价指标 WNSS 与完全参考时获取的评价指标 SSIM 具有很好的一致性，且优于 PSNR 指标。因此，在不存在参考影像时，WNSS 完全可以取代

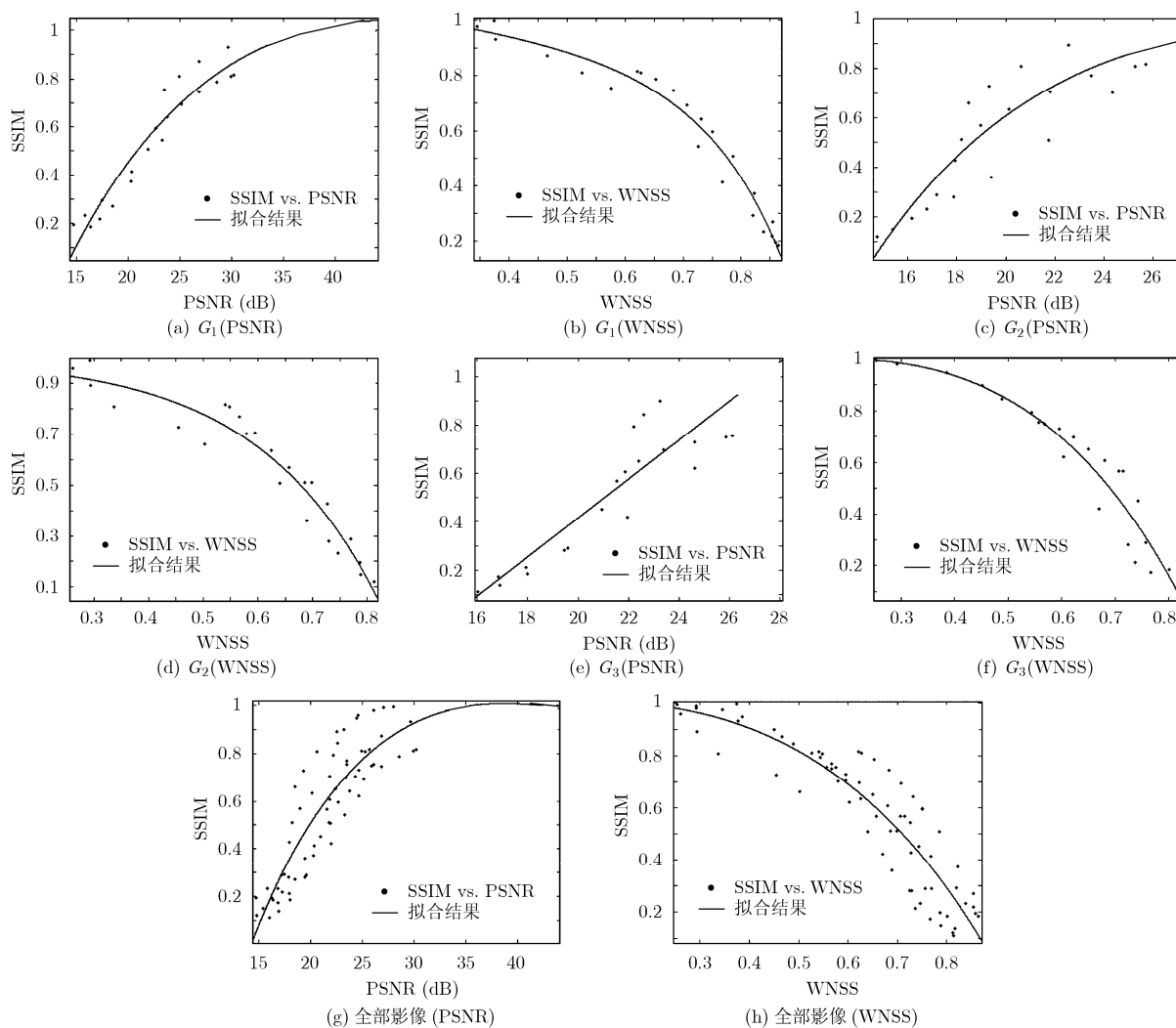


图 6 本文指标 WNSS 及 PSNR 与 SSIM 的拟合效果图

表 1 PSNR, WNSS 与 SSIM 拟合结果

	G_1		G_2		G_3		全部影像	
	PSNR	WNSS	PSNR	WNSS	PSNR	WNSS	PSNR	WNSS
CC	0.9020	0.9169	0.8810	0.9117	0.9146	0.9137	0.8125	0.8795
R-square	0.9348	0.9675	0.8231	0.9346	0.8365	0.9304	0.7925	0.8311
RMSE	0.0730	0.0515	0.1188	0.0722	0.1182	0.0809	0.1249	0.1127

SSIM, PSNR 对遥感影像进行准确、有效的质量评价。

5 结论

在遥感影像评价领域, 由于遥感影像的降质大多是由噪声和模糊共同引起的, 使得遥感影像的降质难以归到某一单一降质方式, 从而给遥感影像的评价带来困难。本文通过对遥感影像小波域子带均值间的近似线性关系进行分析, 同时, 深入了解噪声、模糊对影像此线性关系的不同影响, 对噪声和模糊强度分别进行判定, 最后, 提出了一种基于小波域 NSS 的无参考遥感影像的质量评价指标。实验表明, 本文算法对噪声影像、模糊影像以及同时存在噪声和模糊的遥感影像都能作出准确有效的评价。

参考文献

- [1] Engeldrum P G. Image quality modeling: where are we? [C]. IS&T's 1999 PICS Conference, Savannah, Georgia, 1999: 251-255.
- [2] 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.
- [3] Wang Zhou and Simoncelli E P. Reduced-reference image quality assessment using a wavelet-domain natural image statistic model[C]. In Proc. of SPIE Human Vision and Electronic Imaging, 2005, Vol.5666, 149-159.
- [4] Aznavah A M, Azadeh M, Azar F T, *et al.* Image quality measurement besides distortion type classifying[J]. *Optical Review*, 2009, 16(1): 30-34.
- [5] Saad M A, Bovik A C, and Charrier C. A DCT statistics-based blind image quality index[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, 17(6): 583-586.
- [6] 楼斌, 沈海斌, 赵武锋, 等. 基于自然影像统计的无参考影像质量评价[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44(2): 248-252.
Lou Bin, Shen Hai-bin, Zhao Wu-feng, *et al.* No-reference image quality assessment based on statistical model of natural image[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2010, 44(2): 248-252.
- [7] Anush Krishna Moorthy and Alan Conrad Bovik. A two-step framework for constructing blind image quality indices[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, 17(5): 513-516.
- [8] Zhu Xiang and Milanfar Peyman. Automatic parameter selection for denoising algorithms using a no-reference measure of image content[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(12): 3116-3132.
- [9] Ruderman D L. The origins of scaling in natural images[J]. *Vision Research*, 1997, 37(23): 3385-3398.
- [10] Rohaly A M, Libert J, Corriveau P, *et al.* Final report from the video quality experts group on the validation of objective models of video quality assessment. http://www.its.bldrdoc.gov/vqeg/projects/frtv_phaseII/downloads/VQEGII_Final_Report.pdf, 2000.
- [11] 苏金明, 张莲花, 刘波. MATLAB 工具箱应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 498-509.
Su Jin-ming, Zhang Lian-hua, and Liu Bo. Application of MATLAB toolbox[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2004: 498-509.

张飞艳: 女, 1984年生, 博士生, 研究方向为遥感图像处理、图像质量评价。
谢伟: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为超分辨率图像处理、超分辨率重建图像质量评价。
林立宇: 男, 1976年生, 讲师, 研究方向为图像压缩、图像超分辨率重建、图像传输。
秦前清: 男, 1961年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为信息论、小波分析、数据处理应用基础及应用技术。