

## 应用相位一致性评价多光谱遥感图像条带噪声

王琳, 张少辉, 李霄, 邵晓鹏

(西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 条带噪声是影响多光谱遥感图像质量的重要因素之一, 严重影响遥感数据的解译和信息提取。提出一种应用相位一致性进行多光谱遥感图像条带噪声质量评价的方法。该方法不受图像亮度或对比度变化的影响, 以频域中相位一致性探测图像特征点, 综合考虑图像中条带噪声的数量、长度、宽度和强度建立评价因子, 客观评价遥感图像中存在的条带噪声对图像质量的影响。实验证明该方法评价结果符合人眼视觉感官评价。

**关键词:** 多光谱遥感图像; 条带噪声; 相位一致性; 图像质量评价

**中图分类号:** TP751.1   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2015)10-3148-07

## Assessing stripe noise of multispectral remote sensing image based on phase congruency

Wang Lin, Zhang Shaohui, Li Xiao, Shao Xiaopeng

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Stripe noise is one of the important factors affecting the quality of multispectral remote sensing image, seriously influencing the interpretation of remote sensing data and information extraction. A multispectral remote sensing image quality assessment method aimed at stripe noise based on phase congruency was proposed. This method, which extracts phase congruency point in the frequency domain as the image feature, is not affected by image brightness or contrast, and can objectively evaluate the stripe noise existing in the multispectral remote sensing image by considering the number, length, width, and the intensity of the stripe noise in the image. The experiments show that the proposed algorithm correlates well with subjective quality evaluations.

**Key words:** multispectral remote sensing image; stripe noise; phase congruency; image quality assessment

收稿日期: 2015-02-05; 修订日期: 2015-03-12

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2014JM5210)

作者简介: 王琳(1978-), 女, 副教授, 硕士, 主要从事高光谱遥感图像处理、目标探测、红外光电系统设计领域方面的研究。

Email: lwang@mail.xidian.edu.cn

## 0 引言

多光谱遥感图像数据能够提供丰富的地物光谱信息,但随着探测器元数的增多,系统响应的非均匀性会引起遥感图像失真,表现为具有周期性、方向性且呈条带状分布的噪声,这种条带噪声的存在掩盖了图像中真正的辐射信息,使图像质量降低,严重影响遥感图像数据的完整性,降低了各种遥感数据定量分析技术的有效性。国内外不少专家学者<sup>[1-2]</sup>对遥感图像中条带噪声的成因及去除方法进行了研究,取得不少成果,但在对含条带噪声的遥感图像进行质量分析及评价方面,相关工作很少,没有统一的评价标准。

图像质量评价分为主观和客观两种方式。由于主观评价方法存在繁琐、费时费力、不能实时处理等缺陷,实际应用中主要依靠客观评价方法。根据对原始图像信息的需要程度,图像质量的客观评价方法可以分为全参考评价、部分参考评价和无参考评价三类。全参考和部分参考评价需要参考图像的全部或部分特征,由于遥感图像质量评价几乎无法得到失真图像所对应的参考图像,或者获得参考图像的成本昂贵,所以研究遥感图像质量评估的无参考方法更有应用优势和广泛的适用范围。目前,相对于有参考的评价方法,无参考评价方法还不成熟,其中大多数的研究是针对特定的失真类型进行评价的。Zhou Wang 等<sup>[3]</sup>通过计算某些特征频率的能量来估计图像中块效应信号,从而评价 JPEG 压缩图像的分块效应;Rony Ferzli 等<sup>[4]</sup>在研究最小可觉对比度差(JND)的基础上使用概率求和模型研究了不同图像间模糊程度的评判标准;Erez Cohen 等<sup>[5]</sup>通过计算修正的图像频谱中的最大噪声能量成分与整体图像能量得到图像噪声的评价指标。这些评价方法一定程度上反映了图像的质量差异,但并不适用于评价遥感图像中特有的条带噪声对图像质量造成的影响。

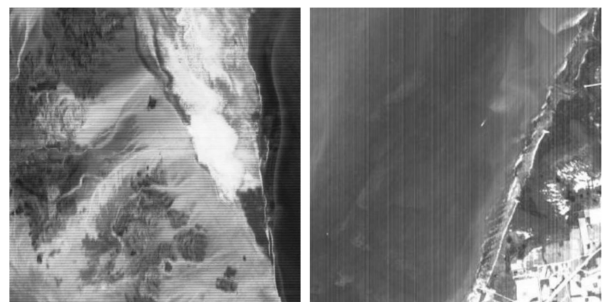
Morrone 等人<sup>[6]</sup>在马赫带研究过程中,发现信号的特征总是出现在傅里叶分解各分量相位一致性最大的地方,从而提出相位一致(Phase Congruency, PC)模型。考虑到图像质量的无参考评价主要基于图像的统计特性,而相位一致性可以在不受图像对比度变化的影响下获得可靠的图像视觉感知特征,因此

近几年逐渐被应用于图像质量评价方法中。Lin Zhang 等人<sup>[7]</sup>在 SSIM 算法基础上结合相位一致性和图像梯度大小(Gradient Magnitude, GM)提出了特征相似度 (Feature Similarity Index Measurement, FSIM) 来评价图像质量的好坏;渥太华大学的 Liu 等人<sup>[8]</sup>利用图像的相位信息研究了基于相位一致性的图像相似性评价方法;Rania Hassen 等<sup>[9]</sup>用局部相位一致性来评价图像的清晰度;张朝锋等<sup>[10]</sup>则利用广义回归神经网络(GRNN)学习图像相位一致特征进行图像质量的无参考评价。

文中结合条带噪声的特点及相位一致性模型对图像阶跃边缘、屋脊形、线边缘特征提取的优势,提出了一种应用相位一致性进行遥感图像条带噪声客观评价的无参考评价方法,评价遥感图像中的条带噪声污染程度。实验表明,文中方法与主观评判基本一致,可以客观地评价遥感图像中的条带噪声情况,也可为遥感图像去条带算法的优劣评估提供参考。

## 1 遥感图像中的条带噪声

条带噪声是星载、机载成像光谱仪图像中普遍存在的一种噪声,它是由于传感器中多个探测单元的响应差异,仪器的推扫和数据拼接方式,探测单元正反扫描响应差异,传感器温度变化等诸多因素影响而产生的沿推扫方向的一种成条纹状的噪声。条带噪声在多光谱或高光谱数据中表现为单波段图像中沿推扫方向的条纹状噪声,如图 1 所示。



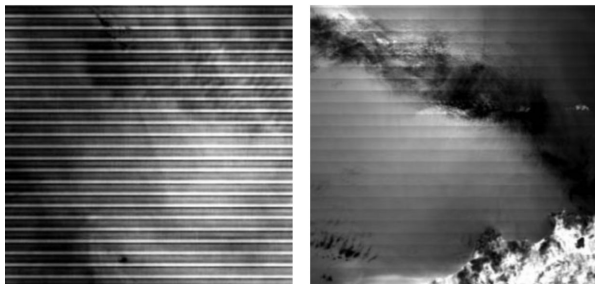
(a) 水平条带噪声 (b) 竖直线带噪声  
(a) Horizontal stripes (b) Vertical stripes

图 1 条带噪声图像

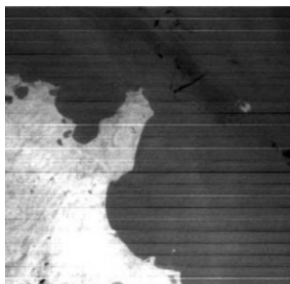
Fig.1 Images with stripe noise

根据遥感图像中条带噪声的成因常见的条带噪声有以下三种类型<sup>[2]</sup>: (1) 探测器间条带噪声,由于

探测器间的相对增益和补偿不具有较好的校准而产生条带噪声。这些周期性的条带是由完整的条带组成,究其原因是相邻探测器间的输入/输出传输函数有一定的差异。(2) 镜面条带(也叫镜像条带)噪声,是由于前后扫描器之间的恒定补偿造成的,会随着信号的强度级别变化而发生变化。通常是在扫描器经过高反射率的明亮目标时会出现,这样的明亮目标会导致传感器达到饱和状态。一个典型的镜像条带例子是含有太阳闪烁(粗糙海洋表面对太阳光的镜面反射)或者由高浓度白色气溶胶引起的强大气效应的均匀海洋图像。由于镜面条带噪声是与上述现象的辐射度有关,所以很少有完整的条带,而且它通常是与扫描角度相关的。(3) 随机条带噪声,是随机且只影响特定的光谱带。它们出现在一个扫描行内出现,呈现为具有随机长度的明暗条带。三种带噪声类型见图 2。



(a) 探测器间条带噪声 (a) Detector-to-detector stripes  
(b) 镜面条带噪声 (b) Mirror-side stripes



(c) 随机条带噪声 (c) Random stripes

图 2 条带噪声分类

Fig.2 Stripe noise classification

## 2 相位一致性

### 2.1 相位一致性和局部能量

Oppenheim 和 Lim 通过实验证明了图像中相位谱比幅度谱包含更重要的信息:将两幅图像分别进

行傅里叶变换,用一幅图像的相位信息和另一幅图像的幅度信息合成一幅新的图像并将其进行傅里叶反变换,结果发现,新合成的图像表达的信息主要由相位信息决定<sup>[11]</sup>。在此基础上,Morrone 和 Owens<sup>[6]</sup>提出相位一致性模型:将图像傅里叶分量相位一致的点作为特征点。Morrone 和 Burr<sup>[12]</sup>进一步详细说明了这个模型成功解释了一部分人类特征感知的心理学效应。

一维信号的相位一致函数 PC 定义为:

$$PC(x) = \max_{\bar{\phi}(x) \in [0, 2\pi]} \frac{\sum_n A_n \cos(\phi_n(x) - \bar{\phi}(x))}{\sum_n A_n} \quad (1)$$

式中: $A_n$  为尺度  $n$  上的  $n$  次谐波振幅; $\phi_n(x)$  表示  $x$  处第  $n$  个傅里叶分量的相位值; $\bar{\phi}(x)$  为使  $PC(x)$  在  $x$  处取最大值时其傅里叶各分量局部相角的加权平均。

由公式(1)可以看出,相位一致性是一个无量纲的量,因此不受图像亮度或对比度变化的影响,使用它无需对波形进行任何假设,只是在傅里叶变换域简单的按相位一致寻找特征点。

直接利用上式计算 PC 很复杂,因此 venkatesh 和 Owens<sup>[13]</sup>提出通过寻找局部能量函数的峰值得到最大相位一致性点。一个信号的局部能量是按照信号本身以及它的 Hilbert 变换定义的:

$$E(x) = \sqrt{F^2(x) + H^2(x)} \quad (2)$$

式中: $F(x)$  为信号去除直流分量后的函数; $H(x)$  为  $F$  的 Hilbert 变换; $F$  和  $H$  一般由信号分别与一对正交的滤波器进行卷积得到。venkatesh 和 Owens 指出局部能量与 PC 有如下关系:

$$E(x) = PC(x) \sum_n A_n \quad (3)$$

这样求最大相位一致转化为求局部能量峰值的问题。

### 2.2 相位一致性的计算

由于笔者的研究对象为图像,图像分析的结果要为人服务,因此应该使用与人类视觉系统认知一致的计算机制。已经证明<sup>[14]</sup>,人类的视觉系统具有非线性,而且这种非线性具有对数性质。Field<sup>[15]</sup>指出,Log-Gabor 函数滤波器在对数频率尺度的传递函数为高斯函数,可以对图像进行更有效的编码。Kovesi 在 1999 年提出一种利用 Log Gabor 小波作为带通滤波器计算相位一致性的方案<sup>[16]</sup>,可以保证在偶对称滤波器中保留零直流分量,并且允许构造任意大小

带宽的滤波器。

2.2.1 Log-Gabor 小波

Log-Gabor 小波传递函数的形式如下:

$$g(w)=\exp\left(\frac{-(\log(w/w_0))^2}{2(\log(k/w_0))^2}\right) \quad (4)$$

式中:  $w_0$  为滤波器的中心频率,滤波器的形状由  $k$  和  $w_0$  共同决定。为保证获得恒定形状的滤波器,对于不同的  $w_0$ ,项  $k/w_0$  必须保持不变。

设  $I$  表示信号,  $M_n^e$  和  $M_n^o$  分别表示尺度为  $n$  时 Log-Gabor 小波的偶对称小波和奇对称小波, 则每对正交滤波器的响应可表示为一个响应向量:

$$[e_n(x), o_n(x)]=[I(x)*M_n^e, I(x)*M_n^o] \quad (5)$$

给定滤波器尺度下响应的幅值和相位为:

$$A_n(x)=\sqrt{e_n(x)^2+o_n(x)^2}$$

$$\phi_n(x)=\arctan2(o_n(x), e_n(x)) \quad (6)$$

在信号的每一点  $x$  处, 都会得到一组响应向量, 每个向量都与每个尺度的滤波器相对应。

根据小波的性质, 在复平面上, 信号经小波滤波器的输出, 实分量是偶对称小波滤波器的输出, 虚分量是奇对称小波滤波器的输出, 因此  $F(x)$  和  $H(x)$  可以近似表示为:

$$F(x) \cong \sum_n e_n(x), H(x) \cong \sum_n o_n(x) \quad (7)$$

并且:

$$\sum_n A_n(x)=\sum_n \sqrt{e_n(x)^2+o_n(x)^2} \quad (8)$$

这些响应向量构成了信号中特征点定位表示的基础, 可以与傅里叶变换系数一样应用于相位一致性的计算<sup>[17]</sup>。

2.2.2 修正的相位一致性计算模型

考虑到噪声的影响、图像频谱过窄时相位一致性定位困难, 以及相位差的余弦函数对相位一致性计算的不灵敏, 最终由 Peter Kovesi 修正后的二维相位一致性计算模型为:

$$PC(x, o)=\frac{\sum_o \sum_n W_n(x) |A_n(x) \Delta \phi_n(x) - T_o|}{\sum_o \sum_n A_n(x) + \varepsilon} \quad (9)$$

式中:  $o$  表示方向;  $W$  为频率扩展加权量(更多频率下的一致性更显著);  $| \cdot |$  为一个数学运算, 当所求值为正时最终结果取自身, 否则为 0;  $\varepsilon$  为一个数值很小的大于零的常数, 以避免分母为 0;  $T_o$  为噪声补偿因子, 由经验估计;  $\Delta \phi_n(x)$  为更灵敏的相位偏差量, 定义为:

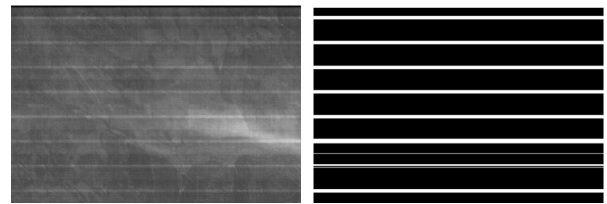
$$\Delta \phi_n(x)=\cos(\phi_n(x)-\bar{\phi}(x))-|\cos(\phi_n(x)-\bar{\phi}(x))| \quad (10)$$

式中:  $\phi(x)$  表示尺度为  $n$  时的相位角;  $\bar{\phi}(x)$  表示全局平均相位角。修正的详细过程见参考文献[18], 程度代码可从网站 <http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/Research/MatlabFns/index.html> 下载。

3 相位一致性评价条带噪声

遥感图像中条带噪声的产生机理与表现形式决定了它的特征: 条带噪声具有一定的宽度、明暗变化及一定的周期性, 这也使得条带噪声与常见的普通噪声有很大不同。为准确提取条带噪声的特征并对其污染图像质量的程度进行评估, 文中提出了一种应用相位一致性(PC)的条带噪声评价方法。

实验表明, 相位一致性不但能够准确检测图像中诸如阶跃、边缘、屋脊和马赫带等特征, 对遥感图像中的条带噪声也有很好的响应, 见图 3。



(a) 原图 (b) PC 二值化图  
(a) Original image (b) Binary image using PC

图 3 多光谱遥感图像 band22 原图和 PC 二值化图  
Fig.3 Original image and PC binary image of band22

由于水平条带噪声和竖直条带噪声只相差 90° 的旋转角度, 所以, 文中讨论的情况都是水平条带噪声。对于竖直条带噪声的情况, 只需要在计算遥感图像的 PC 值时, 选择 0° 方向即可。

对于含水平条带噪声的遥感图像, 图像在 90° 方向即垂直方向的 PC 值(记为  $PC_{90}$ )能最大程度的凸显条带噪声的边缘信息。因此使用  $PC_{90}$  来进行图像的特征提取。由条带噪声的性质可知, 遥感图像中的条带噪声具有一定的密度、长度、宽度和强度, 可以表征条带噪声对图像质量的影响程度。从图 3 可见, 应用文中方法, 在使用 PC 进行图像特征检测的同时, 也对条带的位置和宽度进行了定位, 即图像的 PC 图中已包含了条带的数量、长度和宽度信息, 条带强度(记为  $S_o$ )则可使用条带噪声处图像的对比度来表征。

综上所述，文中最终建立的条带噪声评估模型为：

$$NI_S = \frac{\sum_{picked} S_c \times PC_{90}}{M \times N} \quad (11)$$

式中： $S_c$  为条带噪声的强度，即该处像素与图像背景的对比度， $S_c$  越强则条带噪声强度越大； $PC_{90}$  为  $90^\circ$  方向图像的相位一致性； $M$  和  $N$  分别表示图像的行/列数。 $NI_S$  越大，表示图像受条带噪声污染越严重。

具体算法如下：

1. 计算图像在  $90^\circ$  方向的  $PC$  值，得到  $PC_{90}$ ；
2. 选取合适阈值，对  $PC_{90}$  进行二值化；
3. 做每一行  $PC$  值的水平投影，得到列向量  $n_s$ ；
4. 根据  $n_s$  合理选取行，确定条带位置及宽度；
5. 计算图像条带噪声处各个像素点的强度，得到噪声强度矩阵  $S_c$ ；
6. 根据公式(11)计算条带噪声指数。

### 4 实验结果与分析

为检验文中所提评价算法的有效性，选取某研究所提供的 16 幅不同谱段(band1–band16)的多光谱对地遥感图像进行实验。因篇幅所限，选取其中四幅展示如图 4 所示。这 16 幅图像均存在不同程度的条带噪声污染。

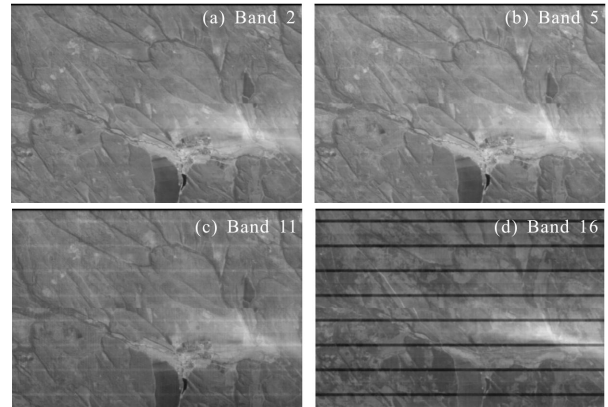


图 4 各谱段含条带噪声对地遥感图像

Fig.4 Different spectrums remote sensing images

实验方案设计如下：首先根据图像质量主观评价的均值意见评分法(MOS)，组织 10 名人员(5 名图像处理专业人员和 5 名非专业人员，均具有正常视力分辨能力) 针对条带噪声对图像的污染程度进行图像质量评估。所有评价者使用同品牌型号的显示器，并设定相同的显示参数，依次根据自己的视觉感受进行评分，由此得到相应的主观评价结果，即 MOS 值；同时利用信息熵、平均梯度、图像清晰度等经典无参考评价指标评价图像，以及使用文中所提出的基于  $PC$  的评价算法进行图像中条带噪声污染指标的评价。实验所得原始评价数据如表 1 所示。

表 1 评价结果原始数据

Tab.1 Comparison of evaluation results

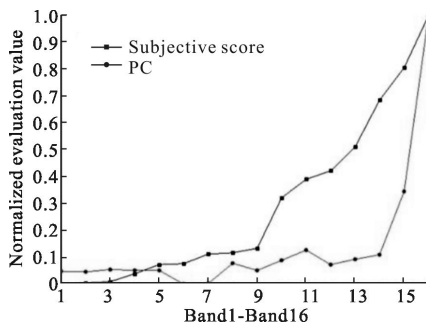
Image evaluation criterion	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9	Band 10	Band 11	Band 12	Band 13	Band 14	Band 15	Band 16
Subjective score	0.1453	0.1488	0.1532	0.1777	0.2061	0.2091	0.2388	0.2430	0.2568	0.4141	0.4718	0.4981	0.5723	0.7185	0.8194	0.9818
PC	0.0099	0.0098	0.0102	0.0100	0.0100	0.0073	0.0074	0.0114	0.0100	0.0120	0.0141	0.0112	0.0122	0.0131	0.0257	0.0606
Information entropy	6.3578	6.3619	6.3814	6.4600	6.5566	6.5222	6.5302	6.3646	6.3260	6.3888	6.4680	6.3709	6.2772	6.2056	6.1412	6.4977
Average gradient	4.2026	4.1283	4.1227	4.3208	4.4145	3.6469	3.7249	3.8605	3.2117	3.3997	4.1876	3.6516	3.4650	3.6774	3.3206	4.0886
Image sharpness	5.5625	5.4636	5.4613	5.7561	5.9280	4.6508	4.8129	5.1352	4.1885	4.5505	5.8868	5.0420	4.9746	5.4782	4.7820	5.5843

对以上实验数据进行归一化处理后绘制的曲线图如图 5 所示。由图 5(b) 显然可见，针对含条带噪声的多光谱遥感图像，基于信息熵、平均梯度和图像清晰度的三种无参考客观图像质量评价算法评价结果均与主观评价结果严重不符。分析其原因，基于信息

熵的评价方法认为图像信息量越丰富，灰度分布越均匀，层次越多，熵值越大，图像质量越好；基于平均梯度和图像清晰度的评价方法则认为图像邻域像素灰度值的差异越大，对比度越高，边缘越清晰，越能反映图像的微小细节和纹理变化，图像质量越好。这

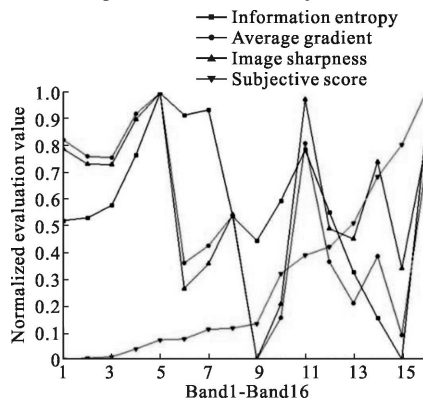
些评价标准在图像存在严重条带噪声的情况下不再适用,因为条带噪声所造成的边缘效应会严重干扰上述评价算法对图像信息量和细节的正确评价,甚至背离实际结果。

由图 5(b)可见,文中所提出的基于 PC 的评价方法评价结果基本与主观评价结果一致,可以客观反映条带噪声对图像的污染情况。但图中也有个别数据与主观评价有微小出入,原因在于文中算法只评价图像中条带噪声的影响程度,并不考虑其他影响图像质量的因素。但主观评价者则会综合考虑图像的条带、噪声和清晰度等多个因素给出综合质量评价。因此,要全面评价含条带噪声的多光谱遥感图像质量,应分析影响图像质量的多个因素,建立综合指标进行评价。



(a) 文中算法与主观评价对比图

(a) Comparison of PC and subjective score



(b) 其他算法与主观评价对比图

(b) Comparison of evaluation results of other algorithms

图 5 评价结果对比图

Fig.5 Comparison of evaluation results

## 5 结 论

文中引入相位一致性作为图像特征的不变量,从频域相位的角度对多光谱遥感图像的条带噪

声特征提取进行了探索,并用相位一致性方法针对含条带噪声的实际多光谱图像进行了图像质量客观评价实验。结果表明,与其他经典无参考评价方法相比,相位一致性算法能够准确提取图像中的条带噪声特征,并且不受图像亮度和对比度变化的影响,对图像中条带噪声污染情况进行客观评价,评价结果与人眼主观评价基本相符。下一步工作,还需考虑建立常规噪声、图像清晰度等因素的评价指标,及所有评价指标的综合评价模型,全面评价含条带噪声的多光谱遥感图像质量。

## 参 考 文 献:

- [1] Gao Xiaohui, Xu Guanghui, Yu Tao, et al. The generating mechanism of strips and destriping algorithm of HJ-1A hyperspectral image [C]//Proceedings of the SPIE, 2013, 8910: 89101U7.
- [2] Marouan Bouali, Sad Ladiad. Toward optimal destriping of MODIS data using a unidirectional variational model [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(8): 2924-2935.
- [3] Wang Z, Bovik A C, Evans B L. Blind measurement of blocking artifacts in images [C]//IEEE International Conference on Image Processing, 2003, 3: 981-984.
- [4] Rony Ferzli, Lina J Karam. A no-reference objective image sharpness metric based on the notion of just noticeable blur (JNB) [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(4): 717-728.
- [5] Erez Cohen, Yitzhak Yitzhaky. No-reference assessment of blur and noise impacts on image quality [J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2010, 4(3): 289-302.
- [6] Morrone M C, Owens R A. Feature detection from local energy [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1987, 6(5): 303-313.
- [7] Lin Zhang, Lei Zhang, Xuanqin Mou, et al. FSIM: a feature similarity index for image quality assessment [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(8): 2378-86.
- [8] Liu Zheng, Laganière Robert. Phase congruence measurement for image similarity assessment [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2007, 28(1): 166-172.
- [9] Hassen R, Zhou Wang, Salama M. No-reference image sharpness assessment based on local phase coherence measurement [C]//Processing of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2010: 2434-2437.

- [10] Zhang Chaofeng, Tang Guofeng, Wu Xiaojun, et al. No-reference image quality assessment with learning phase congruency feature [J]. *Journal of Electronics Information Technology*, 2013, 35(2): 484-488. (in Chinese)  
张朝锋, 唐国凤, 吴小俊, 等. 学习相位一致特征的无参考图像质量评价 [J]. 电子与信息学报, 2013, 35 (2): 484-488.
- [11] Oppenheim A V, Lim J S. The importance of phase in signals[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1981, 69(s): 529-541.
- [12] Morrone M C, Burr D C. Feature detection in human vision: a phase-dependent energy model [J]. *Proceedings of the Royal Society*, 1988, 234: 221-245.
- [13] Venkatesh S, Owens R. Anenergy feature detection scheme [C]//International Conference on Image Processing, 1989 (S): 553-557.
- [14] Rafael C Gonzales, Richard E Woods. Digital Image Processing[M]. 3rd ed, Pearson Education, 2008: 39-41.
- [15] Field D J. Relations between the statistics of natural images and the response properties of cortical cells [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1987, 4(12): 2379-2394.
- [16] Peter Kovesi. Image features from phase congruency. *videre: a journal of computer vision research* [J]. *MIT Press*, 1999, 1-3.
- [17] Kovesi P D. A dimensionless measure of edge significance from phase congruency calculated via wavelets[C]//The First New Zealand Conference on Image and Vision Computing, 1993: 87-94.