

文章编号 1004-924X(2011)06-1235-09

高光谱遥感系统调制传递函数的在轨测试

赵慧洁*, 秦宝龙, 贾国瑞

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院
精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要: 为了实现高光谱遥感系统调制传递函数(MTF)的在轨测试, 以色散推扫型高光谱遥感系统为例分析了系统的像质退化因素并研究了 MTF 检测方法和流程。首先, 分析了色散型高光谱遥感系统 MTF 三维可分性原理。然后, 针对高光谱遥感图像信噪比一般较低的特点, 提出了一种抗噪声的 MTF 检测方法; 又根据该图像波段众多的特点, 提出了高光谱图像刀刃法 MTF 测试区域的选择标准。最后, 以 PHI 遥感图像为例对所提出的方法进行了检验。用本文提出的方法对 PHI 图像进行 MTF 提取, 利用提取出的 MTF 对原退化图像进行了恢复。结果显示, 各波段图像平均梯度提高了 67.1%, 细节信号能量提高了 65.2%, 结果证明了 MTF 检测方法的有效性。

关键词: 高光谱遥感; 调制传递函数检测; 抗噪声; 区域选择

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111906.1235

On-orbit detection for modulation transfer function of hyperspectral remote sensing system

ZHAO Hui-jie*, QIN Bao-long, JIA Guo-rui

(1. *Precision Opto-mechatronics Technology Key-laboratory of Education Ministry, School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100091, China*)
* *Corresponding author, E-mail: hjzhao@buaa.edu.cn*

Abstract: In order to realize the measurement for Modulation Transfer Function(MTF) of an on-orbit hyperspectral remote sensing system, factors of image quality degradation of the system were analyzed and the detection method for MTF was discussed by taking the dispersive hyperspectral remote sensing system for an example. Firstly, the three-dimensional separability of the MTF of the dispersive hyperspectral remote sensing system was illustrated. Then, an anti-noise MTF detecting technique was proposed concerning the characteristic of the low signal-to-noise ratio of the hyperspectral remote sensing system. A criterion of selecting MTF detection region was also proposed based on the large quantity of the bands in hyperspectral systems. Finally, the proposed methods were demonstrated by using the PHI remote sensing images and the PHI degraded images were restored with the detected MTF. Experimental results indicate that the average gradient has been improved by 67.1% and the

收稿日期: 2010-11-22; 修订日期: 2011-01-15.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2008AA121102, 2009AA12Z119); 长江学者和创新团队发展计划资助项目 (No. IRT0705)

detail-signal energy improved by 65.2%, which proves the effectiveness of the proposed method.

Key words: hyperspectral remote sensing; Modulation Transfer Function (MTF) detection; anti-noise; region selection

1 引言

高光谱分辨率遥感技术的发展是 20 世纪 80 年代初人类在对地观测方面所取得的重大技术突破之一,是当前遥感的前沿技术。高光谱遥感在获取地表空间信息的同时,也得到每个地物的连续光谱信息,能够用于定量地分析物质成分,在目标侦查、环境监测、伪装与反伪装、水色检测、资源调查、大气探测与环境评估等领域中发挥了重大的作用^[1-3]。

调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 是评价遥感系统成像品质的重要因素,在地面实验室阶段,采用专门仪器测量和计算其 MTF 是目前精度最高、可靠性最好的方法。但是,这种方法无法对在轨运行的遥感器的 MTF 进行计算。

对于在轨运行的遥感器,综合国内外研究情况来看,MTF 的测试方法可分为“样本对比法”和“地标测量法”两类。样本对比法,是用已知 MTF 的样本图像与卫星遥感图像进行比较和判读,从而确定遥感图像的 MTF 的方法。该方法要求将样本区域选择在地表纹理具有较高空间频率的地区,此外,样本区域的航空或航天数据源的采集时间与所测的卫星图像数据同步或准同步,而且需要采用航空多光谱对样本区进行数据采集。该技术方案虽然可行,但要求比较苛刻。地标测量法,是利用布设的地面靶标或选取的地面标志物在遥感图像上的成像信息来计算 MTF,该类方法主要有刀刃法、脉冲法、点源法等,但以上相关的工作大都是围绕普通全色遥感展开^[4-6]。

本文以目前应用较广的色散推扫式高光谱遥感系统为例,分析了像质退化的各个因素,得出了像质退化过程在数据立方体的三维方向是可分解的,因此高光谱遥感系统 MTF 可以在数据立方体的 3 个方向单独考虑的结论。针对高光谱遥感图像波段众多的特点,提出了 MTF 检测区域的选择标准,又根据其信噪比较低的特点,提出了以高斯函数拟合的方式代替三次样条插值的方式的

MTF 检测算法,并把算法应用在 PHI 高光谱遥感图像的 MTF 测试中,以 MTF 测试结果对图像进行了复原,获得了良好的效果,说明了 MTF 检测结果的有效性。

2 MTF 下降模型分析

2.1 色散型高光谱遥感系统简介

色散型高光谱遥感系统按扫描方式可分为推扫型和摆扫型,本文主要以推扫型为例来分析像质退化过程。

色散推扫型成像光谱仪采用一个面阵探测器,在平行于平台运动方向,通过光栅或棱镜分光,完成光谱维扫描,在飞行平台向前运动的过程中完成沿轨空间扫描。面阵探测器用于同时记录目标上排成一行的多个相邻像元的光谱,其一个方向的探测器数量应等于目标行方向上的像元数,另一个方向上的探测器数量与所要求的光谱波段数量一致。一行空间像元的所有光谱分布由面阵探测器同时输出^[7]。

2.2 色散推扫型高光谱遥感系统像质退化原理

高光谱图像具有图谱合一的特点,除了传统全色遥感图像的两个空间维之外,还具有一个高分辨率的光谱维,构成了一个三维数据立方体。对于一般遥感图像来说,其像质退化机理已经研究的比较透彻,一些 MTF 检测方法也被陆续提出,获得了较好的效果^[8-10]。但对于高光谱遥感系统,因为其成像方式复杂,不同原理的载荷像质退化机理不同,目前尚未有一个成熟的模型来对像质的退化过程进行准确的描述。下面将以推扫式光栅色散型高光谱遥感系统为例尝试分析像质退化模型。

推扫色散型高光谱遥感系统原始像面上图像质量退化主要受到光学系统,探测器采样,大气,运动等因素的影响^[11],它们对像质影响的叠加可表示为各部分退化函数的卷积:

$$h(x, y, z) = h_{\text{optic}}(x, y, z) * h_{\text{detec}}(x, y, z) * h_{\text{atmos}}(x, y, z) * h_{\text{motion}}(x, y, z), \quad (1)$$

下面将对每个过程的退化模型做逐一分析,

假定载荷运动方向与光栅刻线垂直,沿轨为 x 方向,垂轨为 y 方向,光谱生成方向为 z 方向。典型的光栅推扫式成像光谱仪原理结构如图 1 所示,可分为狭缝,光学成像系统,光栅,探测器 4 个部分^[2,12]。

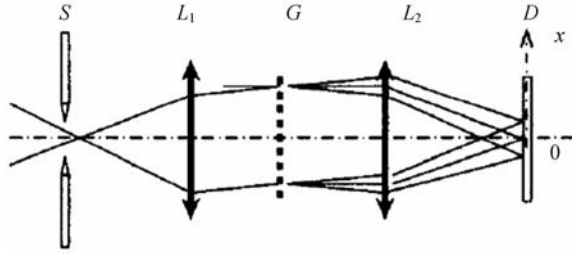


图 1 色散推扫型成像光谱仪原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of dispersive pushbroom hyperspectral imaging system

设狭缝宽度为 w ,成像透镜焦距为 f ,则狭缝衍射卷积因子为:

$$h_{sl,\lambda}(z) = \frac{w}{2\lambda} \sin^2 \left(\frac{wz}{\lambda \sqrt{z^2 + f^2}} \right), \quad (2)$$

狭缝采样卷积因子为:

$$h_{sl,\lambda}(x) = \frac{1}{w} \text{rect} \left(\frac{x}{w} \right). \quad (3)$$

设光栅常数为 d ,刻槽宽度为 w_d ,则光栅衍射卷积因子为:

$$h_{gr,\lambda}(z) = \sin^2 \left[\frac{w_d}{\lambda \sqrt{1 + (f/z)^2}} \right] \left[\frac{\sin(N\pi d / \lambda \sqrt{1 + (f/z)^2})}{N \sin(\pi d / \lambda \sqrt{1 + (f/z)^2})} \right]^2. \quad (4)$$

光学成像系统像差的综合效果多近似为高斯分布,可表示为:

$$\begin{aligned} h_{ab,\lambda}(y, z) &= \exp[-a(\lambda) \cdot (y^2 + z^2)] = \\ &= h_{ab,\lambda}(y) \cdot h_{ab,\lambda}(z) = \\ &= \exp[-a(\lambda) \cdot y^2] \cdot \exp[-a(\lambda) \cdot z^2]. \end{aligned} \quad (5)$$

设探测器感光单元为矩形,宽度和高度分别为 a, b ,探测器卷积因子为:

$$\begin{aligned} h_{sp,\lambda}(y, z) &= \frac{1}{ab} \text{rect} \left(\frac{y}{a} \right) \text{rect} \left(\frac{z}{b} \right) = \\ &= h_{sp,\lambda}(y) \cdot h_{sp,\lambda}(z) = \\ &= \frac{1}{a} \text{rect} \left(\frac{y}{a} \right) \cdot \frac{1}{b} \text{rect} \left(\frac{z}{b} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

如果忽略大气湍流则大气 MTF 主要是气溶胶 MTF:

$$MTF_a = \exp[-A_a R - S_a R(\nu/\nu_c)^2], \quad (7)$$

其中 A_a 和 S_a 分别是大气的吸收和散射系数, R 为观测距离, ν_c 是气溶胶截止频率。

设在曝光时间内运动距离为 L ,运动方向为 x ,则运动造成的线扩散函数为:

$$h_{mv}(x) = \frac{1}{L} \text{rect} \left(\frac{x}{L} \right), \quad (8)$$

从以上对像质退化因素的分析可以看出,在推扫方向上的退化可以看作是狭缝和运动因素的叠加引起的线扩散函数造成的,即式(3),(7),(8)的影响叠加。而在原始像面上空间维的退化可以看作是式(5),(6),(7)影响的叠加,光谱维的退化可以看做是式(2),(4),(5),(6)影响的叠加。

即推扫式色散型高光谱遥感系统的 MTF 退化模型可以表示为:

$$MTF = MTF(x) \cdot MTF(y) \cdot MTF(z), \quad (9)$$

其中 $MTF(x) = FFT[h_{sl,\lambda}(x) * h_{mv}(x)] \cdot MTF_a$

$$MTF(y) = FFT[h_{ab,\lambda}(y) * h_{sp,\lambda}(y)] \cdot MTF_a$$

$$MTF(z) = FFT[h_{sl,\lambda}(z) * h_{gr,\lambda}(z) * h_{ab,\lambda}(z) * h_{sp,\lambda}(z)]$$

这就说明光栅推扫高光谱成像系统 MTF 在两个空间维和光谱维是可分的,也即 3 个方向的 MTF 是互不相关的,从而可以在各个方向对 MTF 分别进行检测。对于高光谱遥感图像来说,光谱维 MTF 目前很难从图像上直接检测,一般都以光谱响应函数的形式作为仪器参数给出^[13],本文仅仅讨论从遥感图像获取空间维 MTF 的方法。

3 高光谱遥感图像 MTF 检测方法

3.1 刀刃法获取遥感图像 MTF

刀刃法是采用具有一定反差的两块相邻的均匀亮暗地物的边界,通过测定成像系统对这一边界的扩展状况来确定各种空间频率上的响应,从而得到该成像系统的 MTF 曲线。该方法将刀刃

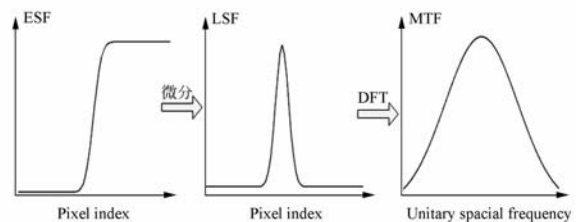


图 2 刀刃法检测 MTF 原理图

Fig. 2 Principle of knife-edge MTF detecting method

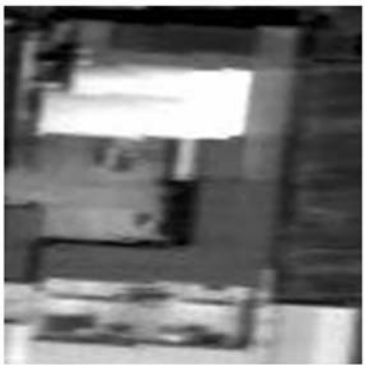
边缘假设为理想图像上的阶跃边缘,其输出即为边缘扩展函数(ESF),对其差分可导出线扩展函数(LSF),傅里叶变换可求出该方向上的 MTF 曲线^[2],其基本流程如图 2 所示。

3.2 刀刃法 MTF 检测区域选择标准

对于全色遥感图像来说,选择 MTF 计算刀刃区域主要要求有相邻的均匀块状地物,亮度存在一定反差,边界为一定长度的直线等。由于高光谱遥感图像波段众多,而同一地物在不同波段的反射率可能差别很大,经常造成在某些波段处亮度存在明显反差的区域在另一些波段处亮度基本相同。如图 3(a)所示为一块 PHI 高光谱数据 407 nm 处辐亮度图像,图 3(b)为 503 nm 辐亮度图像,可以看出图 3(b)白色四边形区域左侧的刀刃在 503 nm 处完全消失。



(a) 407 nm 波长图像
(a) Image at 407 nm



(b) 503nm 波长图像
(b) Image at 503 nm

图 3 相同地物不同波段反差比较

Fig. 3 Comparison of contrast between different bands

同一块地物在不同波长处亮度差别可能变化很大,这就给区域的选择带来了很大不便。所

以在选择刀刃区域的时候一定要考虑光谱信息,而且要求刀刃两侧反差在各个波段均不能太小。为了考查反差的大小对计算 MTF 的影响,设计了如下的仿真实验。

若线扩散函数 $LSF_0(x)$ 为高斯型,参考一般遥感载荷设计要求,取采样频率处 MTF 为 0.1,即将 $LSF_0(x)$ 离散化后, $DFT[LSF_0(x)]$ 最小值为 0.1 的情况下,可以反算出式(10)中对应的 σ 约为 0.78。取一张灰度为 0~255 的图片,上绘制一个锋利刀刃,然后在 xy 两个方向使用上面的线扩散函数进行退化处理,模拟 MTF 的下降过程。这种情况下已知图像真实的 MTF 为 $DFT[LSF_0(x)]$ (如图 4 中实线所示), 设用小二乘法拟合出的线扩散函数为 $LSF_c(x)$, 则 $DFT[LSF_c(x)]$ 即为检测出的 MTF。

设边缘两侧灰度值分别为 L_a 和 L_b , $L_a > L_b$ 。定义边缘调制度为:

$$M = \frac{L_a - L_b}{L_a + L_b}, \quad (11)$$

通过不断改变边缘调制度(固定 L_a , 改变 L_b)来重复 MTF 的检测过程,发现在调制度下降到 0.1 以下的时候,MTF 检测的结果误差开始明显变大,如图 5 所示,细实线为实际的 MTF,粗实线为调制度为 1 时的结果(在图 4 中已经与细实线几乎重合),虚线为调制度下降到 0.08 时的结果,点划线为调制度下降到 0.03 时的结果,最低点测得的 MTF 值已经是实际值的两倍左右。

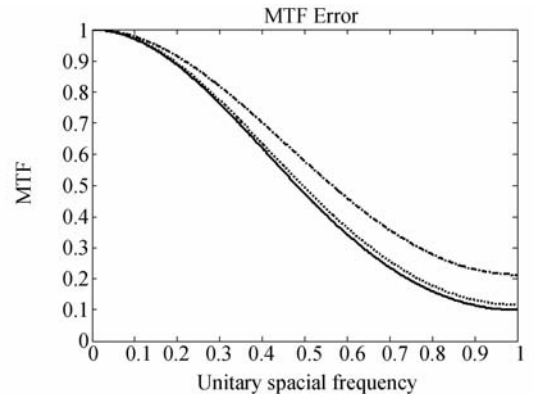


图 4 刀刃调制度对 MTF 计算影响

Fig. 4 Effect of knife-edge modulation on MTF calculation

考虑到噪声的影响,设图像信噪比为 SNR,则必须保证边缘调制度最差的情况也满足条件,根据前面的实验结果,可以取调制度阈值为 0.1,

即需要:

$$M_{SNR} = \frac{L_a - L_b - \frac{L_a}{SNR}}{L_a + L_b + \frac{L_a}{SNR}} > 0.1, \quad (12)$$

式(12)即可作为高光谱图像 MTF 计算区域选择的依据。在常见的自然地物中,水体和人工堤坝或桥梁区域的光谱一般比较符合高光谱 MTF 检测的要求,当然也可以寻找其它特殊反射率特性满足上述 MTF 检测要求的相邻地物,或利用人工铺设的已知反射率的靶标来满足要求。

3.3 高光谱遥感图像 MTF 检测方法

高光谱遥感系统由于采用了分光装置,落在每个探测器上的光能量比较低,从而数据信噪比往往不高,前面提到的刀刃法等方法,可选择的区域面积一般都不大,可供利用的采样点不多。这就造成了傅里叶变换后频谱分辨率远远不够,全色遥感图像的 MTF 检测中一般采用三次样条插值的方法,然后对插值后的线扩散函数进行加密采样^[14]。但是由于高光谱数据信噪比较低的缘故,在插值的过程中容易受噪声影响出现较大偏差甚至严重的偏离。针对高光谱遥感图像信噪比较低这一问题,考虑高斯函数和大多数线扩散函数的形状基本一致,本文引入高斯函数拟合线扩散函数的方法。以原点为对称轴的高斯函数原型为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}. \quad (10)$$

本文提出的检测高光谱图像 MTF 的主要步骤为:

- (1)选择适当的数据区域,该区域应该存在有一些明显的刃边地物;
- (2)在图中截取水平(竖直)方向的刃边区域;
- (3)对选择区域进行中值滤波预处理;
- (4)计算图像每个波段的信噪比;
- (5)计算各个波段的刃边调制度;
- (6)如果其刃边调制度在各波段的值均大于 0.1,则对刃边垂直方向每一列(行)做差分运算得到一系列线扩展函数,否则返回步骤 2 重新选择刃边区域;
- (7)对所得到的线扩散函数进行高斯函数拟合得到一系列标准差 σ_i ;
- (8)所有求得的标准差取中位数作为传感器线扩散函数中 σ 的取值;

(9)由已知的线扩散函数做适当采样,经过离散傅里叶变换(DFT)求出高光谱遥感系统各个波段的在图像竖直(水平)方向上的 MTF 曲线;

(10)将竖直方向 MTF 列向量和水平方向 MTF 行向量相乘作为系统的 MTF 矩阵。

主要流程如图 5 所示:

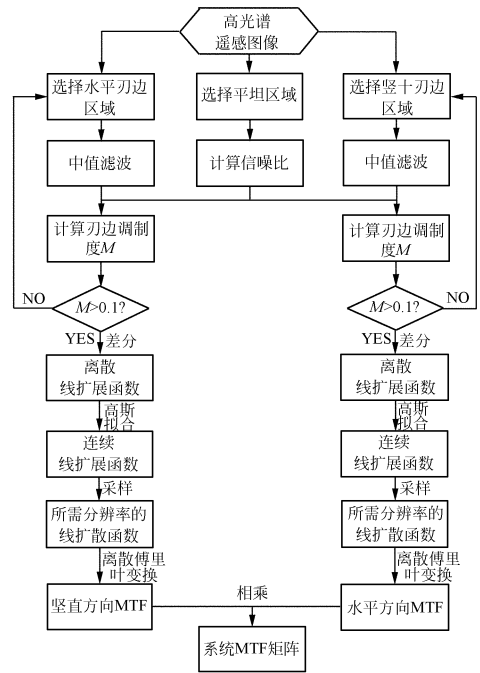


图 5 MTF 检测流程图

Fig. 5 Flowchart of MTF measurement

4 实验结果及分析

4.1 PHI 数据 MTF 检测

依据前面讲到的刀刃区域选择方法,以 PHI 辐亮度遥感图像为例,选择的沿轨和垂轨 MTF 检测区域在图 6 中用方框标出。

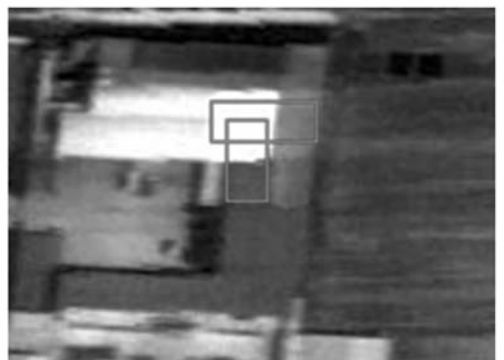


图 6 刃边区域的选择

Fig. 6 Selection of knife-edge region

依据前面制定的刀刃边缘区域的选择标准(如式 12 所示)对所选区域进行了计算,由如图 7 所示结果可以看出,在存在噪声影响下的刃边调制度也完全满足在全波段大于 0.1 的要求,大部分波段都超过了 0.2,方框区域适用于 MTF 的计算。

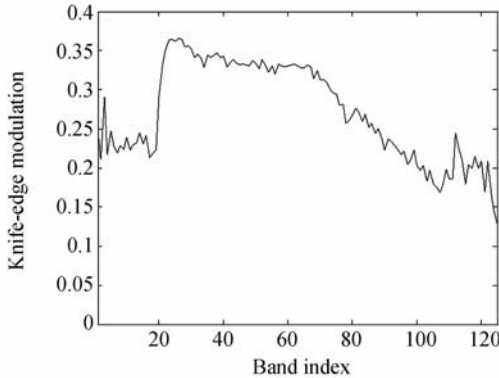


图 7 所选刃边区域在各波段的调制度

Fig. 7 Modulation of knife-edge region at all bands

由本文提出的方法拟合出的沿轨和垂轨方向的线扩散函数(LSF)如图 8 和图 9 所示(以第 50 波段为例)。

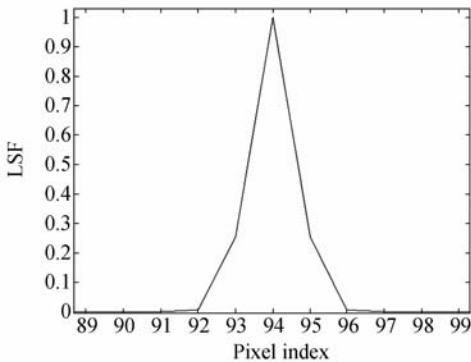


图 8 第 50 波段沿轨 LSF

Fig. 8 LSF along-track at band 50

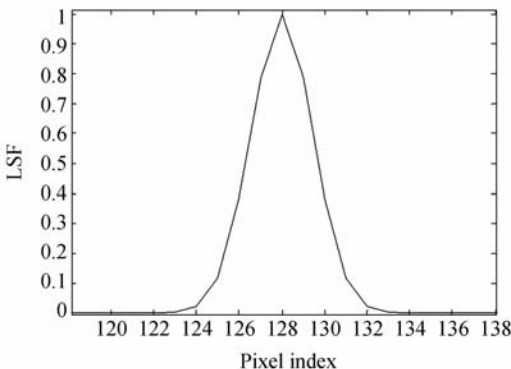


图 9 第 50 波段垂轨 LSF

Fig. 9 LSF across-track at band 50

对 LSF 进行傅里叶变换并取模值,得到沿轨和垂轨方向的 MTF 曲线如图 10 和图 11 所示。

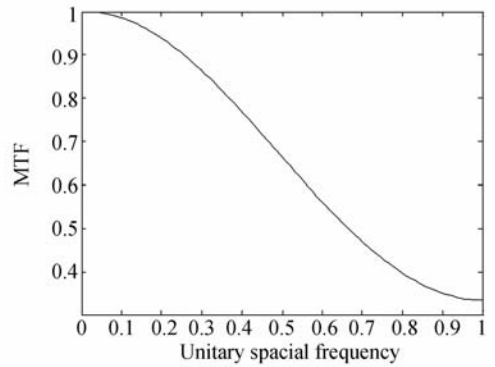


图 10 第 50 波段沿轨 MTF

Fig. 10 MTF along-track at band 50

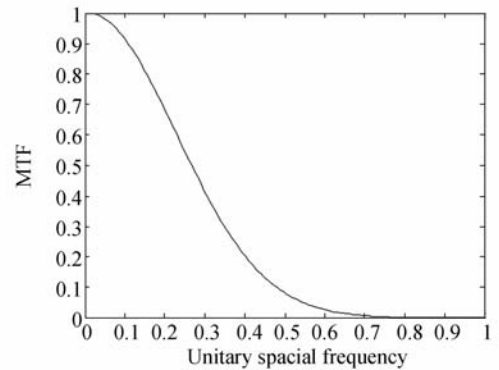


图 11 第 50 波段垂轨 MTF

Fig. 11 MTF across-track at band 50

4.2 MTF 用于图像复原

截取一幅大小为 240×180 的 PHI 图像(如图 12 所示),对在沿轨垂轨两个方向分别用得到的 MTF 进行维纳滤波复原后的结果如图 13 所示。对比两幅图中房屋结构及边缘锐利程度和右侧耕地的横向纹理等地物特征可以看出图像清晰度有明显改善。

为了对图像复原效果做定量评价,选取了平均梯度,细节信号能量,方差,波段相关系数等几个比较通用的图像质量评价统计量用于评价复原效果^[15-16]。

平均梯度反映了遥感图像的锐利程度,设图像长宽分别为 m, n ,其定义为:

$$g = \frac{1}{(m-1)(n-1)} \sum_1^{(m-1)(n-1)} \sqrt{\left[\frac{\partial I(x,y)}{\partial x}\right]^2 + \left[\frac{\partial I(x,y)}{\partial y}\right]^2} \quad (13)$$



图 12 原图第 50 波段

Fig. 12 Original image of band 50



图 13 恢复图第 50 波段

Fig. 13 Restored image of band 50

其中 m, n 表示图像的长宽, $I(x, y)$ 为图像 I 上点 (x, y) 处的灰度值。

细节信号能量反映了图像中细节信号的丰富程度,其定义为:

$$E = \frac{1}{m \times n} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \sigma_f^2(x, y), \quad (14)$$

其中 m, n 表示图像的长和宽, $\sigma_f^2(x, y)$ 是以 (x, y) 为中心的小方形区域内的方差。

方差函数一般作为一个成像对焦清晰的评价标准,其定义为:

$$V = \sum_x \sum_y [I(x, y) - I_{\text{avg}}]^2, \quad (15)$$

其中 $I(x, y)$ 为图像 I 上点 (x, y) 处的灰度值, I_{avg} 为平均灰度。

波段间相关系数反映了相邻波段图像的相似程度,相关系数越大,则相似程度越高。其定义为:

$$r = \frac{\sum_i (x_i - x_{\text{avg}})(y_i - y_{\text{avg}})}{\sqrt{\sum_i (x_i - x_{\text{avg}})^2} \cdot \sqrt{\sum_i (y_i - y_{\text{avg}})^2}}. \quad (16)$$

其中 x_i 和 y_i 分别表示图像 x 和图像 y 中每个像元的灰度值, x_{avg} 和 y_{avg} 分别表示图像 x 和图像 y 的均值。

对原图和恢复图的质量评价结果表明,各波段平均梯度提高了 67.1%, 细节信号能量平均提高 65.2%, 方差平均提高 12.3%, 其中第 50 波段复原前后的具体指标结果如表 1 所示。可以看出,复原后的高光谱图像质量有了明显提高,图像平均梯度和细节信号能量均提高了 60% 以上。波段相关系数的适当下降,说明恢复后数据波段间的冗余信息有所减少,图像信息含量更加丰富。图像复原结果表明本文对 MTF 的检测是准确和有效的。

表 1 图像恢复前后质量对比(第 50 波段)

Fig. 1 Quality contrast between original image and restored image(at band 50)

	原图	恢复图	提高/%
平均梯度	0.606 925	0.976 905	61.0
细节信号能量	1.042 79	1.684 87	61.6
方差	5.134 01	5.830 42	13.6
波段相关系数	0.999 431	0.998 368	-0.11

5 结 论

本文从色散型高光谱遥感系统的像质退化机理出发,对其成像过程中的像质影响因素进行了分析,证明了色散型高光谱遥感系统 MTF 的可分性。在此基础上,针对高光谱遥感数据信噪比较低的特点,提出了一种能有效抗噪声的 MTF 检测方法。结合高光谱数据光谱分辨率高的特点,提出了一个 MTF 检测刀刃区域的选择标准,并以 PHI 遥感图像为例进行了刀刃法 MTF 提取的实验验证,用提取出的 MTF 对原图像进行了恢复。结果显示,各波段图像平均梯度提高了 67.1%, 细节信号能量提高了 65.2%, 结果证明了 MTF 检测的有效性。

致谢:感谢中国科学院上海技术物理研究所为本文研究提供了相关的 PHI 遥感数据。

参考文献:

- [1] 杨国鹏,余旭初,冯伍法,等. 高光谱遥感技术的发展与应用现状[J]. 测绘通报,2008,10:1-4.
YANG G P, YU X C, FENG W F, *et al.*. The development and application of hyperspectral RS technology [J]. *Bullein of Surveying and Mapping*, 2008,10:1-4. (in Chinese)
- [2] 郑玉权,王慧,王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计[J]. 光学精密工程,2009,17(11):2609-2637.
ZHENG Y Q, WANG H, WANG Y F. Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11):2609-2637. (in Chinese)
- [3] 李幼平,禹秉熙,韩昌元,等. 成像光谱仪工程权衡优化设计的光学结构[J]. 光学精密工程,2006,14(6):974-979.
LI Y P, YU B X HAN Ch Y, *et al.*. Tradeoff optimization designs of optical configuration on imaging spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):974-979. (in Chinese)
- [4] SCHOWENGERDT R A, ARCHWAMETY C, WRIGHTLEY R C. Landsat thematic mapper image-derived MTF [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1985,51(9):1395-1406.
- [5] CHOI T. IKONOS satellite on orbit Modulation Transfer Function (MTF) measurement using edge and pulse method [D]. Brookings; South Dakota State University, 2002.
- [6] XU Q Y, ROBERT A. Schowengerdt, urban targets for image quality analysis of high resolution satellite imaging systems[J]. *SPIE*, 2003,5108:31-38.
- [7] 童庆禧,张兵,郑兰芬. 高光谱遥感[M]. 北京:高等教育出版社,2006:49-52.
TONG Q X, ZHANG B, ZHENG L F. *Hyperspectral Remote Sensing* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:49-52. (in Chinese)
- [8] KOHM K. Modulation transfer function measurement method and results for the orbview-3 high resolution imaging satellite. [J]. *Proceedings of ISPRS 2004, Istanbul, Turkey, July 12-23, 2004*.
- [9] 顾行发,李小英,闵祥军,等. CBERS-02 卫星 CCD 相机 MTF 在轨测量及图像 MTF 补偿[J]. 中国科学 E 辑,2005,35(1):26-40.
GU X F, LI X Y, MIN X J, *et al.*. On-orbit MTF estimation and compensation for CCD image of CBERS-02 Satellite [J]. *Science in China Series E*, 2005,35(1):26-40. (in Chinese)
- [10] NUGENT P W, SHAW J A, KEHOE M. Measuring the modulation transfer function of imaging spectrometers at infinite focus with roof-line images [J]. *SPIE*, 2007,6661:66610M-1-66610M-8.
- [11] SCHOTT J R. *Remote Sensing - The Image Chain Approach* [M]. Oxford: Oxford University Express,2007.
- [12] 林中,范世福. 光谱仪器学[M]. 北京:机械工业出版社,1989.
LIN ZH, FAN SH F. *Spectral Instruments* [M]. Beijing: China Machine Press, 1989. (in Chinese)
- [13] ALEJANDRA U, MIGUEL V. Restoration of hyperspectral imagery[J]. *SPIE*,2006,6233:62340A-1 -62340A-10.
- [14] 蔡新明. 基于卫星遥感图像的 MTF 计算和分析 [D]. 南京理工大学,2007.
CAI X M. *MTF estimation and analysis based on remote sensing images of satellite* [D]. Nanjing: Nanjing University of Techology, 2007. (in Chinese)
- [15] 孙蕾,罗建书,谷德峰. 基于谱间预测和码流预分配的高光谱图像压缩算法[J]. 光学精密工程,2008,16(4):752-757.
SUN L, LUO J SH, GU D F, *et al.*. Hyperspectral image compressing algorithm based on prediction between bands and rate pre-allocation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4):752-757. (in Chinese)
- [16] 陈强,戴奇燕,夏德深. 基于 MTF 理论的遥感图像复原[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(9):1209-1305.
CHEN Q, DAI Q Y, XIA D SH. Restoration of remote sensing images based on MTF theory [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2006, 11(9): 1209-1305. (in Chinese)

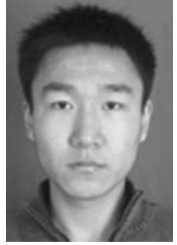
作者简介:



赵慧洁(1966—),女,辽宁沈阳人,博士,教授,博士生导师,1988年、1991年和1994年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事高光谱传感器与数据处理、光电检测、机器视觉等方面的研究。E-mail: hjzhao@buaa.edu.cn



贾国瑞(1984—),男,山西文水人,博士,讲师,2005年、2011年在北京航空航天大学分别获得学士和博士学位,主要从事高光谱遥感成像建模与仿真、高光谱数据预处理等方面的研究。E-mail: jgr@asee.buaa.edu.cn



秦宝龙(1985—),男,河南安阳人,2008年于天津大学与南开大学获得学士学位,2011年于北京航空航天大学获得硕士学位,主要从事高光谱遥感系统像质评价,图像恢复等方面的研究。E-mail: qbl9600@126.com

● 下期预告

基于 RIXR 结构的 LED 准直系统的设计

赵会富^{1,2},刘 华¹,卢振武¹,荆 雷^{1,2},刘 英¹,张红鑫¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光电技术研发中心,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院,北京 100049)

为了收集大角度范围内的光线以获得具有较小发散角的准直光束,设计并优化了高效、结构紧凑的折射/全反射/反射/折射式(RIXR) LED 准直系统。LED 准直系统采用 RIXR 式的混合结构,首先,根据非成像光学理论中的边缘光线原理以及 Simultaneous Multiple Surfaces(SMS)方法计算系统初始结构的面型。然后,利用 Zemax 光学设计软件对初始结构进行优化设计,最终得到最佳结构的 LED 准直系统。优化设计得到 RIXR 型准直系统的半口径为 20 mm、纵横比为 0.25、集光角为 200°。LED 准直系统经反向光线追迹得到边缘视场($\pm 3.178^\circ$)点列图的均方根半径 $< 2.1 \mu\text{m}$,故边缘视场达到了很好的聚焦效果。充分考虑材料的吸收损失和界面的反射损失后,光能利用率高达 83.48%。利用 SMS 方法设计得到了 RIXR 型的 LED 准直系统的初始结构,并由 Zemax 光学设计软件做进一步优化处理,使光能利用率和目标面照度的均匀性均有所提高。另外,基于 RIXR 结构的 LED 准直系统具有光能利用率高、结构紧凑、体积小、便于应用等特点。