

〈图像处理与仿真〉

基于线扩散函数矩阵的成像光谱仪图像矫正方法

崔毅^{1,2}, 危峻¹, 黄小仙¹

(1. 中科院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 大视场推扫式成像光谱仪的驻留时间长, 覆盖范围大, 能比较好地满足海洋遥感的要求。但沿轨和穿轨方向上调制传递函数的差异导致了成像中的“拖影”现像。通过实验获取了系统的线扩散函数; 利用插值法构建矩阵来描述系统穿轨方向上的成像特性; 使用遥感图像“拖影”区域的梯度平方和作为判别依据对矩阵的系数进行调整; 最后使用矩阵对遥感图像进行了矫正。从矫正后的图像来看, “拖影”现像已基本被扣除, 证实了该方法的有效性。

关键词: 线扩散函数; 成像光谱仪; 图像矫正

中图分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)02-0115-05

Image Restoration of Imaging Spectrometer Based on Line Spread Function Matrix

CUI Yi^{1,2}, WEI Jun¹, HUANG Xiao-xian¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Large field imaging spectrometer adopting push-broom has long dwell time and can better meet the requirements of ocean remote sensing. But the difference between the modulation transfer function along and cross the track resulted in smear in the image. This paper obtained line spread function of the system by experiment, constructed a matrix by interpolation to describe the imaging characteristics of the system in the cross-track direction, using smear area in the image as basis to adjust the coefficient of the matrix, and finally got the images corrected by this matrix. After correction, the problem of smear has mostly been deducted, confirming this method to be effective.

Key words: Line Spread Function (LSF), imaging spectrometer, image restoration

0 引言

海洋遥感以海洋和海岸带为主要监测目标, 在控制地球环境、开发海洋资源等方面有着重要的意义。目前, 我国的海洋遥感技术已取得较大的进步, 但较国外尚有一定差距。与传统的陆地遥感相比, 海洋遥感具有信号强度弱、覆盖范围要求高的特点, 对成像仪器的性能有较高要求。

用于海洋遥感的成像光谱仪, 在对海洋目标成像的同时能够获取其光谱信息, 从而可以定量地描述和分析海洋的物理和化学特性。由于来自海洋的辐射本身已经很弱, 其分光后的光谱信号更加微弱,

本文的成像光谱仪采用推扫式成像。与扫描式结构相比, 推扫式成像可以大大增加目标的驻留时间, 提高系统的信噪比, 但代价是视场范围受到光学系统和探测器的诸多限制。本文的成像光谱仪使用分光组件和面阵探测器成像, 从而实现了较高的光谱分辨率和光谱可编程功能。另外为了满足覆盖能力的需求, 使用了长狭缝和大尺寸像元探测器, 在保证系统信噪比的同时, 实现了较大的视场范围。

由于推扫式成像结构的特性, 以及分光组件的二次成像, 系统在沿轨和穿轨方向上的成像模型具有较大差异。若用线扩散函数 (LSF) 来描述系统的成像过程, 则沿轨和穿轨方向的 LSF 是不同的。

收稿日期: 2013-08-12; 修订日期: 2013-02-07。

作者简介: 崔毅, 男, 博士生。主要从事 CCD 成像技术方面的研究。E-mail: endnext@126.com。

基金项目: 中科院知识创新工程, 编号: Y1X09029N0X

这种不同可能来源于光学狭缝和分光组件的杂散光，或是探测器的电学因素。在追求大视场的同时，这种差异也会变得更为显著。如果这种差异足够大，会较为明显地体现在遥感图像中。本文仪器的某次成像结果如图1所示（水平方向为沿轨方向。矩形框区域经过色阶拉伸处理，水平条纹由探测器非均匀性导致，竖直条纹为“拖影”）。可以看到，当景物亮度在沿轨方向上有剧烈变化时，其附近的大面积均匀目标上也存在较为明显的DN值变化，就好像景物在穿轨方向上产生了“拖影”。该“拖影”能延伸较长的距离，在距源目标较远的视场位置处仍未完全消退。用MTF来描述这一现像，即较低空间频率处的MTF并不是理想的1，或者说其冲击响应（即LSF）在距脉冲较远的视场位置处仍有响应。

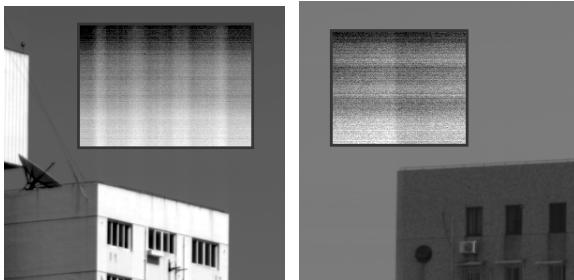


图1 成像中的“拖影”现像

Fig.1 Smear in the image

经过一系列初步实验，证实了该“拖影”现像主要来源于光学系统的杂散光，与电学系统关系不大。狭缝处及分光组件的杂散光使得系统在穿轨方向上的杂散光远大于沿轨方向，进而导致了成像中的“拖影”。

1 使用扩散函数进行图像矫正

任何二维成像系统的成像过程均可通过点扩散函数（PSF）描述，推扫式成像仪器在穿轨方向上的成像过程则可用线扩散函数（LSF）描述，调制传递函数（MTF）则是它们在频域的表现。以此为基础构建模型，可以对成像过程中的不利因素予以矫正，提高成像质量。

利用PSF或LSF实现图像复原的研究已有很多，如何获取系统的扩散函数以及建立何种模型来描述系统往往是研究的主要内容。顾行发等人通过在地面铺设模拟靶标来检测在轨卫星的MTF，根据实测45°方向的MTF插值建立二维MTF矩阵并完成对图像的恢复^[1]。李小英等人则利用同一平台上的高分辨率CCD相机的图像为基准来计算较低分辨率的WFI相机在沿轨、穿轨和45°方向的LSF，并进一步利用维纳滤波进行图像复原^[2]。杨利红等

人则直接使用在轨成像中具有刀口特征的地物图像获取PSF，对其进行高斯拟合并使用自适应维纳滤波进行图像恢复^[3]。以上方法主要针对卫星在轨成像时的大气衰减，对于由杂散光导致的问题则无能为力。张军强等人对成像光谱仪的杂散光进行了研究，通过实验测试构建出杂散光影响因子矩阵来描述整机光谱维上的杂散光特性，并以此对杂散光进行了矫正^[4]。Yuqin Zong等人将探测器在光谱维上LSF区分为带内响应和杂散光两部分，将整个谱段划分为80个连续的光谱段，对每段的杂散光响应进行测量，构建杂散光分布矩阵并对光谱维数据进行矫正^[5]。Elena Torrecilla等人则使用单色仪发出的窄谱段单色光进行测试并差值得到杂散光分布矩阵^[6]。在只关心杂散光的前提下，上述描述杂散光分布的矩阵在本质上和LSF的意义是相同的。但上述研究主要针对成像光谱仪光谱维方向的杂散光，其分布特点、数据处理算法与评价标准都与本文有很大差异。

2 成像模型及矫正方法

成像系统的调制传递函数即为其冲击响应的傅里叶变换。设目标信号为 o ，系统的冲击响应（即LSF）为 h ，则成像信号为两者的卷积：

$$i = o \otimes h \quad (1)$$

对于推扫式成像系统，一次成像产生一行图像数据，因此如果知道了系统的冲击响应，那么对穿轨方向上的MTF矫正为一维退卷积运算，通常通过频域的除法来实现退卷积：

$$o = i \text{DFT} \left(\frac{\text{DFT}(i)}{\text{DFT}(h)} \right) \quad (2)$$

如果根据系统冲击响应，构造出如下矩阵：

$$H = \begin{bmatrix} h_1(1) & h_1(2) & h_1(3) & \cdots & h_1(n) \\ h_2(1) & h_2(2) & h_2(3) & \cdots & h_2(n) \\ h_3(1) & h_3(2) & h_3(3) & \cdots & h_3(n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_n(1) & h_n(2) & h_n(3) & \cdots & h_n(n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： n 为空间维像元总数， h_x 为其中第 x 个像元位置的LSF。那么成像过程可由式(4)表示：

$$i_x = \sum_{y=1}^n o_y \cdot h_y(x) \quad (4)$$

式中： i_x 为系统实际成像， o_y 为理想的目标图像。该式可表示为矩阵的乘法运算：

$$I = O \cdot H \quad (5)$$

图像的矫正过程则可通过矩阵除法实现：

$$O = I \cdot H^{-1} \quad (6)$$

以上两种描述在数学上是等价的，但是使用矩

阵来描述系统允许不同的像元位置上有不同的冲击响应,从而不要求系统在整个视场范围内具有空间不变性,只对线性有要求。这在处理由杂散光引起的问题时更为适用。

3 推扫式光谱成像仪的图像矫正

3.1 LSF 的获取

测量系统 LSF 较常用方法为刀口法,但此方法通常假定系统的 LSF 在远离中心脉冲的位置完全衰减为 0,且系统在测量范围内的 LSF 较为一致。而本文关心的是系统 LSF 两侧未衰减为 0 的部分,所以刀口法并不适用。若使用小于单像元视场的光源直接测量 LSF,则 LSF 两侧信号值过低而被系统噪声和非均匀性淹没。为了提高信号幅度,本文最终选择使用较宽的光源测量系统的矩形脉冲响应,并由此推算出 LSF。

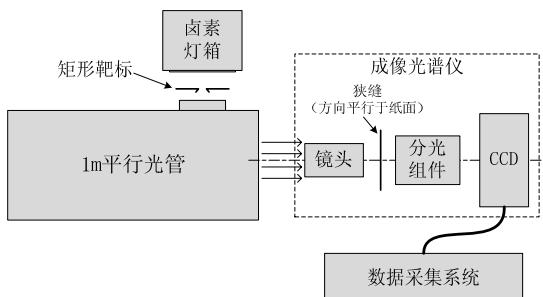


图 2 LSF 测量系统图示

Fig. 2 LSF measurement system

测试系统如图 2 所示。在 1 m 平行光管的焦点处放置矩形靶标,其宽度大概能照亮探测器上 35 个像元。光源使用频谱较为均匀的卤素灯箱。调整成像仪的角度,从每个通道的第 50 像元开始,到 950 像元为止,每次间隔 50 个像元,分别对视场上的不同位置进行成像实验。在经过累加取平均、扣除按电平、矫正 smear 现象等预处理后,最终共可得到均匀分散在整个视场上的 19 个不同位置处的矩形脉冲响应。实验表明,不同位置、不同通道之间的响应都比较类似。以接近视场中心处(第 500 像元)为例,其 640~660 nm 波段的成像数据如图 3 所示。

由于光源靶标具有一定的宽度,得到的图像是一个矩形脉冲函数。由于光源不是绝对均匀的,脉冲顶部不平;脉冲两侧附近各有一个肩部突起,这是由平行光管靶标支架的反光造成的。观察脉冲两侧的响应,可以看到信号幅度很低,但并未完全衰减,而且呈现出具有周期性的分布。这可能是由分光组件内某处具有周期性纹理的杂散光源导致的,具体原因有待进一步研究。

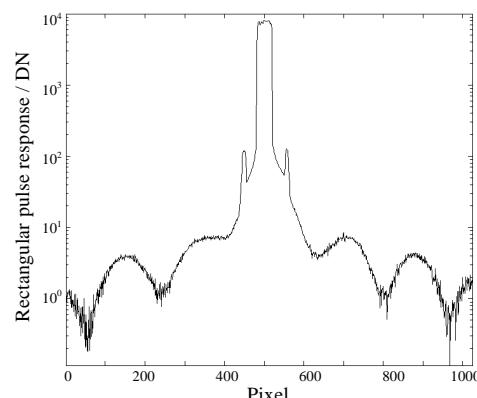


图 3 640~660 nm 波段视场中心位置的矩形脉冲响应

Fig.3 Rectangular pulse response at center of the field of 640~660 nm channel

直接将上述实验测得的数据作为系统的 LSF 是不妥的,因为输入光源并不是冲击函数,而是具有一定宽度的矩形脉冲。理论上应该将实验数据与矩形脉冲函数做退卷积运算得到 LSF。但由于矩形脉冲在频域上有零值点,实际输入光源亦非标准的矩形脉冲,在不知道(也不可能知道)绝对的原始输入的情况下进行退卷积运算,极易导致结果中存在大幅度的“震荡”而淹没掉真实的冲击响应。在此,考虑到实验用的光源宽度远小于系统视场,我们主要关心距光源较远视场处的数据,且这些位置上的矩形脉冲响应并无剧烈的高频抖动,本文使用以下步骤得到系统的 LSF:

- 1) 对实验测得的矩形脉冲响应进行归一化,将脉冲幅度归一化到 1;
- 2) 将脉冲“削顶”,几乎去除整个矩形脉冲,只留下“周期性”响应的部分;
- 3) 对数据进行宽度为 11 的均值平滑处理,以减小系统噪声与探测器非均匀性的影响;
- 4) 假设源矩形脉冲的宽度为 35,将数据幅度除以 35 来近似退卷积操作。由于该值并不准确,此处引入一个待定系数 a ,乘入数据;
- 4) 将矩形脉冲中心像元处的值设为 1。

经过以上步骤,由图 3 所示的矩形脉冲响应算得的 LSF 如图 4 所示。在曲线的中央位置,系统的 LSF 被假设为一个理想的冲击函数,这意味着该矫正方法几乎不会影响系统的高频 MTF 特性。本文所关心的由杂散光引起的响应在曲线中得以保留和体现。可以看到,在距脉冲较远的视场位置处,响应的幅度已经只有 0.002% 的级别,即使整个视场所有 1000 个像元位置的冲击响应都在此叠加,幅度也不会超过 2% (若认为这些信号全部由杂散光导致,则系统的杂散光系数小于 2%)。但由于系统在沿轨

方向上不具有这种响应,如此幅度的信号已经足够在图像上产生明显的“拖影”现像。

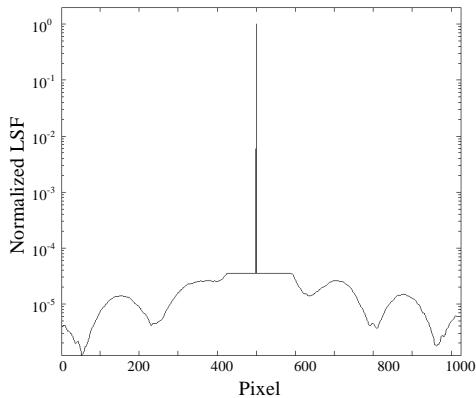


图4 640~660 nm 波段视场中心位置的 LSF

Fig.4 LSF at centre of the field of 640-660 nm channel

3.2 系统描述矩阵的构建

对实验测得的19组数据进行处理,我们能得到19组LSF数据。可以根据其脉冲所在的像元位置,将它们分别填入矩阵 \mathbf{H} 相应的行中。对于其他未进行实测的视场位置,则要由已测得数据插值得到。本文使用最简易的线性插值法,得到完整的矩阵,如图5所示(调整了幅度轴的显示范围以更好地显示矩阵细节)。根据式(6),求出矩阵的逆,用它去乘待处理图像,即可实现对图像的矫正。

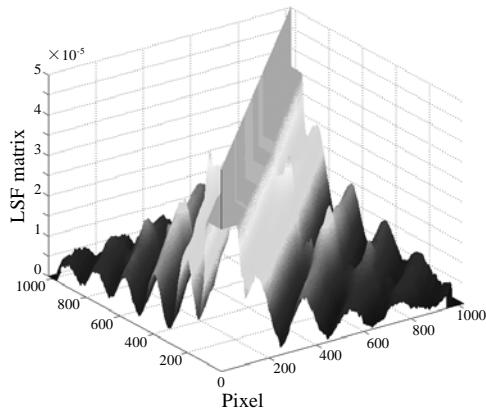


图5 系统的 LSF 矩阵

Fig.5 LSF matrix of the system

3.3 纠正效果的判定依据及最佳系数的确定

由于不知道实验中测试光源的真实参数,3.1节的步骤4中引入了系数 a ,可以将它理解为对图像矫正的“强度”。若 a 的取值为0,矩阵 \mathbf{H} 为单位矩阵,算法不会对图像产生任何影响。根据3.1节的计算过程可以知道, a 的最佳取值应该接近1。

本文根据实际成像的矫正效果来确定系数 a 的最佳取值。在某次成像数据中,选取出存在“拖影”现像的区域。这些区域本来拍摄了较为均匀的目标,

即其成像沿轨方向上的梯度值应该比较低,而“拖影”则为这些区域引入了阶跃成分,即梯度上的峰值。因此我们可以求出这些区域沿轨方向的梯度曲线,以各点梯度平方的均值作为图像矫正效果的判别依据。该值越小,表明“拖影”去除得越干净。

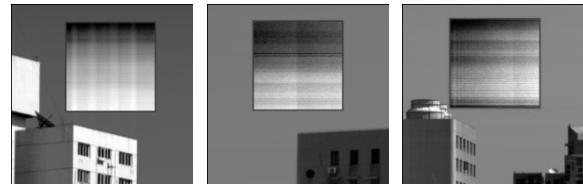
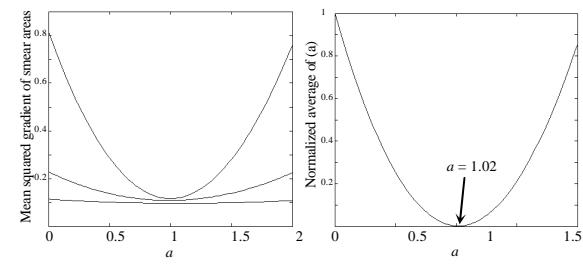


图6 矩形框指示了用作判别区域,图中的这些区域经过了色阶拉伸处理,以凸显“拖影”现像

Fig.6 Smear areas used as basis to adjustment
the coefficient of the matrix

在某次外景成像的数据中,本文选取了如图6所示的3个区域作为判别区。图7(a)显示了每个区域中系数 a 与判别值的关系曲线,可以看到由于“拖影”源的面积和对比度不同,以及均匀背景所具有的微小分布,3条曲线的变化幅度和谷值均有较大差异,但每条曲线的谷值都在1附近。本文将这3条曲线的谷值和最大值归一化后再取平均,得到最终的评价函数曲线,如图7(b)所示。取曲线的最低点 $a=1.02$ 作为系数 a 的最佳值,系统的传递矩阵便得以确定。



(a)3个判别区域的判别值曲线

(b)将(a)中3条曲线归一化取平均后的曲线

(a)Mean squared gradient functions of the three smear areas

(b)Normalized average of the three functions

图7 用于确定最佳矫正系数 a 的判别值曲线

Fig.7 Mean squared gradient function used to determine the best coefficient a

4 图像矫正结果

由于实际成像中杂散光等因素导致的图像失真大小并不可知,故很难以绝对量值的形式来评价矫正的效果。图像沿轨方向的梯度均方值能够作为矫正效果的相对评价标准,而实际上这已在3.3节中

被用作确定矩阵系数的依据。

本文对不同时间地点的外景成像数据进行矫正, 其部分结果如图8所示。可以看到多数位置的“拖影”现像已被扣除干净, 证实本文方法的矫正效果比较理想。

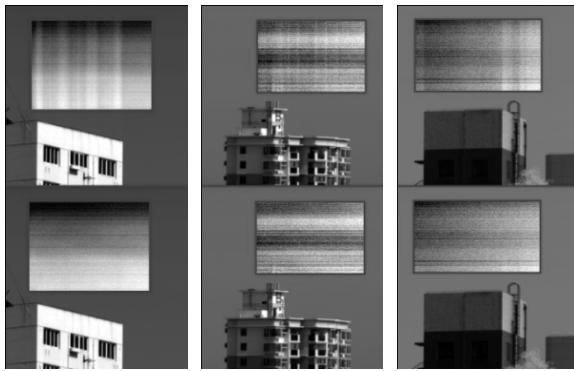


图8 图像矫正效果, 每幅图上半部分为矫正前的图像, 下半部分为矫正后的图像

Fig.8 Image restoration result

5 结论

本文以调制传递函数理论为基础, 用线扩散函数构建矩阵来描述本文所研究的中分辨率推扫式光谱成像仪, 并以此为基础对成像仪的图像进行了矫正, 基本消除了由杂散光引入的“拖影”现像。矩阵能够充分地描述系统各位置像元的冲击响应, 不要求系统具有很好的空间不变性, 因此具有较广的适用范围。且矩阵取值和判别依据均来自系统实测数据, 易达到较为理想的矫正效果。该方法在以下几个方面仍需要进一步的改进和研究:

1) 本文获取矩阵的方法非常依赖实验数据, 实验环境、实验参数以及系统的噪声和非均匀性等因素都会对矩阵结果产生一定的影响, 使得该方法对实验条件和图像预处理的要求较高;

2) 和单个 LSF 相比, 传递矩阵会占用较大的存储空间, 且矩阵的乘法运算比一维退卷积运算的复杂度高, 这一点在图像尺寸较大时会尤为明显, 使在一些速度较低的嵌入式系统中实现图像实时处理的难度提高;

3) 根据本成像光谱仪的实际情况, 本文并没有考虑分光组件光谱维上传递函数的影响。实际上这一影响虽然比空间维方向的小, 但并非完全没有, 当某一通道的信号非常微弱时, 其图像的“拖影”会有相当一部分能量来源于其它信号较强的通道, 从而导致该通道的“拖影”不能被完全矫正。可以参考文献[5-6]的方法, 使用单色仪作为测试光源, 构建出三维的描述矩阵, 虽然实验复杂度和数据量都会成倍增加, 但仍是值得研究的方向。

参考文献:

- [1] 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 编: 信息科学, 2005, 35(S1): 26-40.
- [2] 李小英, 顾行发, 余涛, 等. CBERS-02B 卫星 WFI 成像在轨 MTF 估算与图像 MTF 补偿[J]. 遥感学报, 2009, 13(3): 377-384.
- [3] 杨利红, 赵变红, 张星祥, 等. 点扩散函数高斯拟合估计与遥感图像恢复[J]. 中国光学, 2012, 5(2): 181-188.
- [4] 张军强, 吴清文, 颜昌翔. 星载成像光谱仪杂散光测量与修正[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3): 552-560.
- [5] Zong Y, Brown S W, Johnson B C, et al. Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(6): 1111-1119.
- [6] Torrecilla E, Pons S, Vilaseca M, et al. Stray-light correction of in-water array spectroradiometers. Effects on underwater optical measurements[C]. *Oceans* 2008, 2008: 1-5.