

文章编号: 1007-4619 (2004)03-0234-05

# CBERS-1 PSF 估计与图像复原

刘正军, 王长耀, 骆成凤

(中国科学院 遥感应用研究所, 遥感信息科学重点实验室, 北京 100101)

**摘 要:** 分析了遥感图像获取过程中导致图像退化模糊的原因。讨论了一种借助图像中的特定线状目标信息(如桥梁、堤坝等), 采用经验拟合的方式提取图像获取、传输过程中的点扩散函数, 并利用该点扩散函数结合频域维纳滤波器求解去图像模糊的空域反卷积算子。将该方法应用于中巴资源卫星一号(CBERS-1)图像, 图像质量得到明显的提高, 收到了较好的复原效果。

**关键词:** 点扩散函数; 图像复原; 中巴资源卫星一号

**中图分类号:** TP751.1 **文献标识码:** A

## 1 引 言

遥感图像的光学信息获取与传输过程要经过目标、大气、光学系统、CCD 等一系列环节。各个环节均可能对图像产生退化作用, 引起图像质量的下降。图像质量下降引起模糊常常用信息获取与传输过程中各环节的点扩散函数来描述。对于航空遥感, 其图像的模糊主要是由于传感器光学器件的点扩散函数造成的, 大气的影响相对较小; 而航天遥感图像而言, 其图像的模糊则不仅取决于传感器光学器件的点扩散函数, 还取决于大气状况引起的点扩散函数的影响<sup>[1, 2]</sup>。这就是我们常常看到的, 同一颗传感器, 在有的地区获得的遥感图像质量很好, 在有的地区获得的图像质量较差; 即使是在同一地区, 图像质量也是时好时坏。

对退化的模糊图像进行复原是遥感图像处理中的一个热点和难点。过去的方法常常采用一些通用的图像处理技术如有约束复原方法<sup>[3]</sup>, 需要得到一些传感器平台、光学参数。通常这些参数是很难全部得到满足的。另一个难点是, 这种方法理论上是可以包括大气状况的参数的, 但实际上由于不同成像条件下大气状况的变化对图像造成的模糊差异明显, 很难将它作为参数加入复原模型中。也很难通过测量等其他途径得到数据。此外, 有的研究人员

通过采用蒙特卡洛方法模拟传感器成像条件下的大气点扩散函数, 并利用维纳滤波器进行复原<sup>[4]</sup>, 可惜这种方法在模拟大气点扩散函数时需要预先给定某些大气参数(如气溶胶浓度等); 此外, 精确模拟所花计算量也比较大。Forster 等<sup>[5]</sup>、Ruiz 等<sup>[6]</sup>讨论了利用 SPOT 图像中线状目标信息及逆滤波器方法对图像进行复原, 收到了比较好的效果。处理过程中, 由于采用逆滤波器, 因此要求图像要具有比较高的信噪比。

本文讨论了一种借助分析图像中的特定线状目标信息(如桥梁、堤坝等), 采用经验拟合的方式提取图像获取、传输过程中的点扩散函数, 并利用该点扩散函数结合频域维纳滤波器求解去图像模糊的空域反卷积算子。与过去使用的许多方法不同的是, 该方法可以从综合了图像获取、传输过程中传感器、大气状况引起的模糊图像中经验地提取其复合的点扩散函数, 且不需要知道传感器参数、大气状况的参数。将该方法应用于中巴资源卫星一号(CBERS-1)第三通道实际图像, 图像质量得到明显的提高, 收到了比较好的复原效果。该方法也可用在其他几个可见光/近红外通道的处理中。

## 2 算法与理论

### 2.1 PSF 估算与反卷积算子求解

已有的研究表明, 一般地, 在不考虑噪声的情况

收稿日期: 2002-08-15; 修订日期: 2002-12-04

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01)和国家科技攻关计划2001DFBA005 课题“利用遥感与GIS建立中国西部干旱区水土资源管理系统”及国家高技术研究发展计划(863计划)2003 AA131020 和2003 AA131170 课题资助。

作者简介: 刘正军(1974—), 男, 湖南湘潭人。2000年毕业于南京大学, 获理学硕士学位, 现为中国科学院遥感应用研究所在读博士研究生。主要研究方向为土地覆盖信息提取、遥感分类与特征提取算法研究。已发表多篇学术论文。

下,可以将卫星获得的影像看成是真实影像和系统对单位脉冲响应的卷积,即

$$f(x, y) = h(x, y) * g(x, y) \quad (1)$$

其中,  $f(x, y)$  表示传感器在位置  $(x, y)$  处获得的影像,  $g(x, y)$  表示地表真实状况,  $h(x, y)$  是传感器 CCD 成像系统对单位脉冲的响应。这里的系统,包括了最终成像过程中涉及的大气、光学镜头、以及 CCD 成像等对图像引起的退化过程。

此外,成像过程中,传感器常常会产生一些噪声叠加到信号中。因此,如果考虑噪声因素,则此时式(1)变为:

$$f(x, y) = h(x, y) * g(x, y) + \sigma \quad (2)$$

其中,  $\sigma$  为噪声因子。对于传感器来说,这种噪声通常为呈一种高斯分布的随机噪声,其强度特性可以用传感器信噪比(Signal/Noise Ratio, SNR)来表征。如果卫星获取的图像信噪比较高,譬如大于500:1时,此时在处理中可以采用式(1),反之则必须采用式(2)。

现在,我们根据式(1)考虑一种极端的特殊情形。假设  $g(x, y)$  所代表的地表真实状况上,存在一均质暗背景(如可见光波段中的水体)上约传感器像元大小的亮点(像素),设该像素位于位置  $(m, n)$ 。用数学式表达为:

$$\delta(x, y) = \begin{cases} 1 & x = m, y = n \\ 0 & x \neq m, y \neq n \end{cases} \quad (3)$$

根据式(1)可知,此时,即可用该点在传感器图像  $f(x, y)$  上以位置  $(m, n)$  为中心的邻域范围内的取值来近似表示系统对单位脉冲的响应,通常可以用函数来表征这个脉冲响应分布,我们称之为点扩展函数(Point Spread Function, PSF)。

遗憾的是,在卫星影像上此情况并不常见,或者是因为缺乏单独的高反射像元,或者是因为背景不够暗。此时,我们采用另一种方法。假设点扩展函数是线性可分解的,则它可以用正交的线扩展函数(Linear Spread Function, LSF)叉积来近似表示,即有:

$$h(x, y) = h(x) \times h(y) \quad (4)$$

式中,  $h(x)$  和  $h(y)$  是线扩展函数。对于一般的推扫式或推帚式成像技术,若相移引起的距离向(Cross track)和方位向(Along track)不对称性很小,则该假定是合理的。因此,只要求得 LSF, 就可以根据式(4)反推得到 PSF 的。

在实践中, LSF 能从卫星影像中记录的结构中获得,例如阶状结构。譬如在某些地区,常常在影像上常常能发现水塘,这种情况下,水与大坝的接触线

就是一个很好的阶状几何结构。McGill<sup>[7]</sup>、Carnahan<sup>[8]</sup>等提出利用这种结构对其剖面求导数可以获得 LSF。其结论似乎是从经验得到的,可惜没有给出其数学上的证明。这里对此结论给出其数学推导。

设 LSF 函数是  $y$  轴对称的且可用  $h(x)$  表示,图像上阶状结构剖面可用函数  $f(x)$  表示,地表阶状结构剖面可用阶跃函数  $g(x)$  表示,其中:

$$g(x) = \begin{cases} 0 & \forall x < 0 \\ 1 & \forall x \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

则,根据式(1)有,

$$f(x) = g(x) * h(x) \quad (6)$$

展开卷积式,亦即

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) h(x-t) dt \quad (7)$$

将式(5)代入式(7)并整理得

$$f(x) = \int_0^{+\infty} h(x-t) dt \quad (8)$$

令  $\tau = x - t$ , 即  $t = x - \tau$ , 代入式(8), 有

$$f(x) = \int_x^{-\infty} h(\tau) d(x-\tau) = \int_{-\infty}^x h(\tau) d\tau \quad (9)$$

两边对  $x$  求导数, 即有

$$h(x) = \frac{df(x)}{dx} \quad (10)$$

在实际应用中,阶状结构对于式(5)常常难以精确地满足,此时可以用有限定义域内满足该式来近似代替。

得到了 PSF 函数后,就可以进行反卷积函数的求解,从而最终利用求得的反卷积函数对原图像进行复原处理。在空间域中和频率域中分别有几种方法可以用于导出基于 PSF 变换的反卷积函数矩阵<sup>[5-8]</sup>。过去的研究表明,前者方法简单,但因反 PSF 卷积函数常是一个脉冲矩阵,得到一个合适的矩阵要难一些。后者虽然相对复杂,但常常能获得稳定的解。

这里我们采用的是一个混合过程,通过空间域样本进行 PSF 估算,然后在频率域利用维纳滤波器得到一个反卷积矩阵,将该矩阵反傅里叶变换回空间域,获得反差卷积函数的矩阵表示,从中找到一个更为简单、直观的滤波器。

设反卷积函数为  $c(x, y)$ , 则  $c(x, y)$  可以补偿 PSF 函数  $h(x, y)$  引起的模糊的作用效果。即该反卷积函数和 PSF 之间的卷积可以生成一幅除中心位置外的其他位置的 DN 值均为 0 的图像。用数学式表达即为:

$$c(x, y) * h(x, y) = \delta(x, y) \quad (11)$$

利用 FFT 变换到频率域中有:

$$C(u, v) \circ H(u, v) = 1 \tag{12}$$

即:

$$C(u, v) = \frac{1}{H(u, v)} \tag{13}$$

若考虑噪声因素的影响,此时采用维纳滤波器<sup>3</sup>可以降低噪声对于图像复原的影响。此时,式(13)变为:

$$C(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + P_n(u, v)/P_f(u, v)} \tag{14}$$

式中,  $H^*(u, v)$  为  $H(u, v)$  的共轭复数;  $P_f$  和  $P_n$  分别为信号和噪声的功率谱, 数字图像条件下,  $P_f/P_n$  通常可取传感器信噪比 SNR。

式(14)中的  $H(u, v)$  意味着如果只考虑大气模糊,  $H(u, v)$  就是大气传输函数, 否则, 它表征了一系列因大气和传感器等光学作用综合影响的结果。

通过反傅里叶变换, 从式(14)推出反差卷积矩阵:

$$c(x, y) = \text{IFFT} \left[ \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + P_n(u, v)/P_f(u, v)} \right] \tag{15}$$

式中,  $\text{IFFT}[\dots]$  代表反傅里叶变换。

### 2.2 从退化图像到真实图像的恢复

给定真实图像  $g(x, y)$ , 非零 PSF 函数  $h(x, y)$ , 后者作用于前者得退化图像  $f(x, y)$ 。将式(1)两端乘以  $c(x, y)$ , 有:

$$c(x, y) * f(x, y) = c(x, y) * h(x, y) * g(x, y) \tag{16}$$

即有:

$$c(x, y) * f(x, y) = \delta(x, y) * g(x, y) = g(x, y) \tag{17}$$

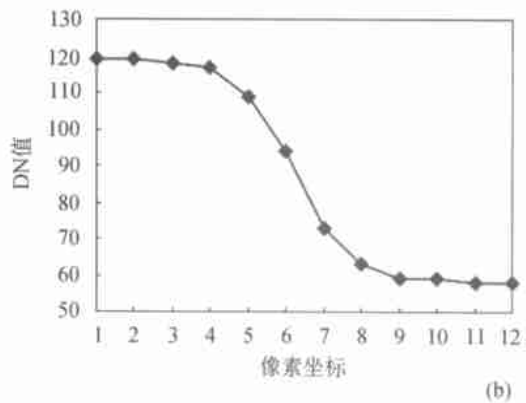
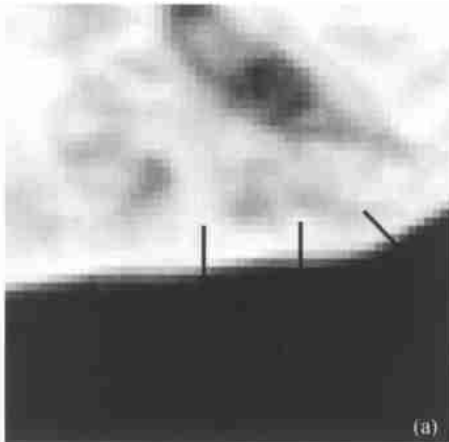


图 2 样本选取与阶状结构提取

(a) 原始样本图像; (b) 阶状结构剖面

Fig. 2 Sampled step structure and generated profile

由于  $c(x, y)$  是中心对称的, 亦即:

$$g(x, y) = f(x, y) * c(x, y) \tag{18}$$

由式(18)可见, 只要  $c(x, y)$  已知, 我们就可将其作为反卷积过滤器来对真实图像进行恢复。

综合 2.1 节 PSF 估计和反卷积算子的求解和 2.2 节所述的图像复原方法, 整个处理流程可以用图 1 来表示。

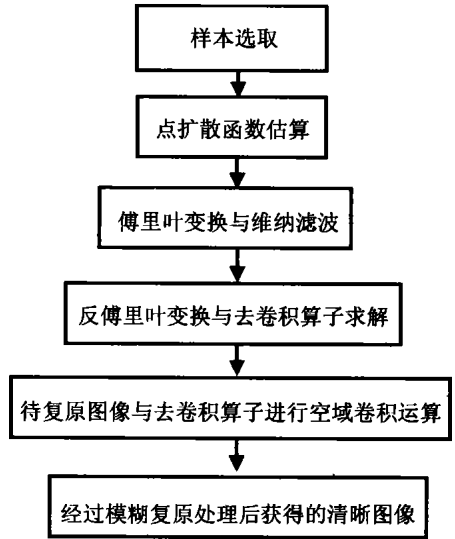


图 1 CBERS-1 图像 PSF 估计与复原流程图

Fig. 1 Frame chart of CBERS-1 PSF estimation and image restoration

### 3 试验结果

以 CBERS-1 号图像红光通道 B3 (0.63—0.69 $\mu$ m) 为例。选择 2000 年 9 月获取的新疆石河子地区的一景图像, 从中选择一具有阶状结构的湖泊以提取 PSF 的样本 (图 2(a)), 其中的黑线为样本选取位置。图 2 (b) 为多样本平均处理后的阶状结构的剖面图。

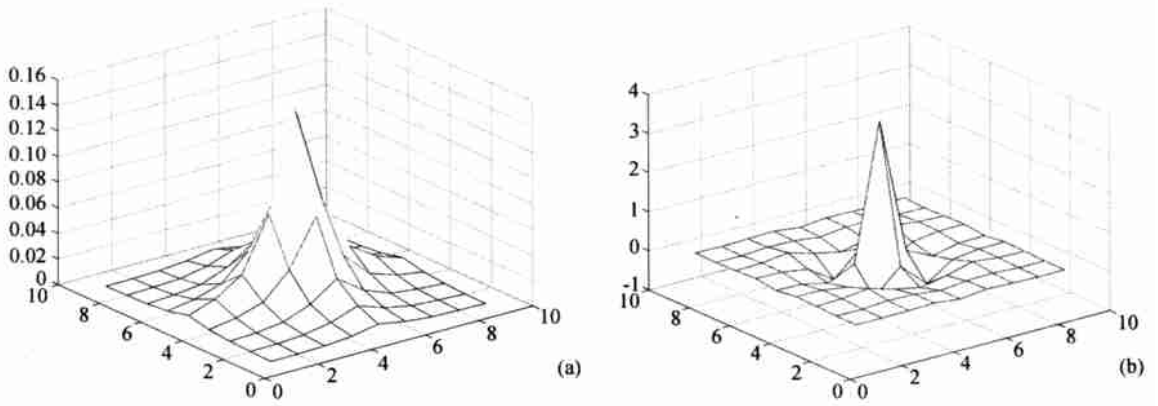


图 3 PSF 函数与反卷积函数的三维结构示意图

(a) PSF 函数(大小:  $9 \times 9$ ); (b) 反卷积函数(大小:  $9 \times 9$ )

Fig 3 3-dimensional profile of PSF function and deconvolution function

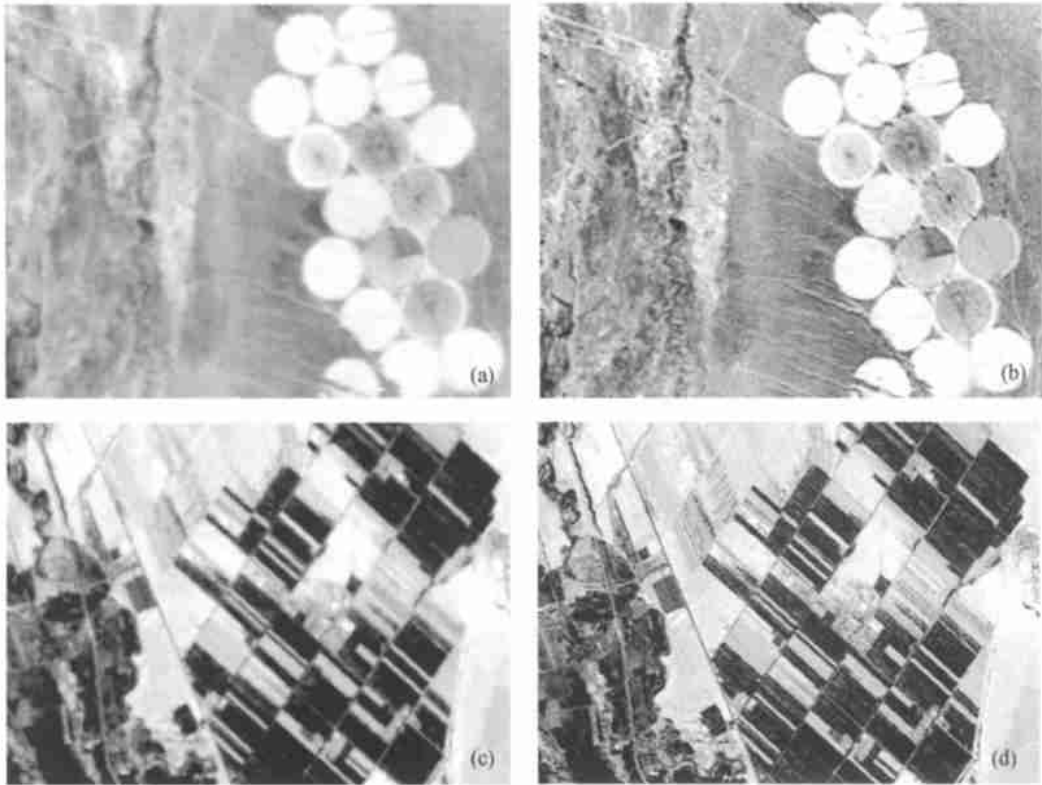


图 4 CBERS-1 图像复原处理结果

(a) 原始图像; (b) 复原处理后的图像; (c) 原始图像; (d) 复原处理后的图像

Fig 4 Result of CBERS-1 subimage restoration

图 3(a)是利用图 2(b)阶状结构剖面求导获得 LSF 函数并内插出来的 PSF 函数的三维结构示意图,图 3(b)是利用图 3(a)的 PSF 函数并结合维纳滤波器求得的反卷积函数的三维结构示意图。此处,我们注意到在  $9 \times 9$  矩阵大小的条件下,PSF 已经可以很好地表达这种大气和传感器等综合影响下引起的图像模糊作用了。

图 4(a), (c)是从待复原处理的 CBERS-1 第三通道(B3)的原始图像的截取的两个不同部分的图像;图 4(b), (d)分别是利用求得的  $9 \times 9$  大小反卷积核对图 4(a), (c)中的原始图像进行复原处理后的图像。与原始图像相比,我们可以看出,图像的质量有明显的提高,纹理结构、道路、地物边缘更为清晰可见。

## 4 结论与讨论

航天遥感图像在获取过程中常常由于传感器光学器件、大气状况等的点扩散函数的影响造成遥感图像的模糊。对退化的模糊图像进行复原是遥感图像处理中的一个热点和难点。过去的方法常常采用一些通用的图像处理技术如有约束复原方法,需要得到一些传感器参数、大气状况的参数。通常这些参数是很难全部得到满足的。

本文讨论了在不需要知道传感器参数、大气状况参数的条件下如何通过对图像进行分析并提取传感器、大气状况引起的点扩散函数,并利用该点扩散函数结合频域维纳滤波器求解去图像模糊的反卷积算子,以及如何利用反卷积算子对图像进行复原处理。将该方法应用于中巴资源卫星一号(CBERS-1)第三通道实际图像,收到了较好的效果。

此外,我们也注意到,由于该方法相对于特定图像求解点扩散函数的,因此它代表的是相似的大气条件下的综合点扩散函数,因此计算出来的反卷积算子也只能针对相似的大气条件才能获得最佳效果。这样,当对大量的图像进行复原处理时,就需要针对不同大气条件下获取的图像分别求点扩散函数和构造对应的空域反卷积算子。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Schowengerdt R A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing (Second Edition)[ M ]. San Diego: Academic Press, 1997.
- [ 2 ] Niu Z, Zhu C G, Wang C Y. Analysis of Atmospheric Cross Radiation in a Slant Viewing Angle[ J ]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(2): 88—93. [ 牛铮, 朱重光, 王长耀. 斜视角度下大气交叉辐射影响分析[ J ]. 遥感学报, 1997, 1(2): 88—93.]
- [ 3 ] Zhao R C, Zhao Z M, Cui G S. Guide to Digital Image Processing [ M ]. Xi'an: Northwestem Polytechnic Univ. Press, 1996. [ 赵荣椿, 赵忠明, 崔更生. 数字图像处理导论[ M ]. 西安: 西北工业大学出版社, 1996.]
- [ 4 ] Hu B X, Li X W, Zhu C G *et al.* Deriving the Anisotropic Atmospheric Point Spread Function of Off-nadir Remote Sensing[ J ]. *China Journal of Image and Graphics*, 1996, 1(1): 19—29. [ 胡宝新, 李小文, 朱重光等. 大倾角光学遥感中大气点扩散函数的近似模型[ J ]. 中国图像图形学报, 1996, 1(1): 19—29.]
- [ 5 ] Forster B C, Best P. Estimation of SPOT P-mode Point Spread Function and Derivation of a Deconvolution Filter[ J ]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1994, 49(6): 32—42.
- [ 6 ] Ruiz C P, Lopez F J A. Restoring SPOT Images Using PSF-derived Deconvolution Filters[ J ]. *Int. J. Remote Sensing*, 2002, 23(12): 2379—2391.
- [ 7 ] McGillem C D, Anuta P E, Malalaret, E, *et al.* Estimation of a Remote Sensing System Point Spread Function from Measured Imagery [ A ]. Proc. Symp. Machine Processing of Remotely Sensed Data [ C ]. Purdue University, Lafayette, Ind., 1983.
- [ 8 ] Camahan W H, Zhou G. Fourier Transform Techniques for the Evaluation of the Thematic Mapper Line Spread function[ J ]. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 1986, 52(5): 639—648.

## Estimation of CBERS-1 Point Spread Function and Image Restoration

LIU Zheng-jun, WANG Chang-yao, LUO Cheng-feng

(Laboratory of Remote Sensing Information Science, Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The integrating effect of the Point Spread Function (PSF) of a satellite remote sensing system significantly blurred the acquired image and reduced the spatial resolution of the data. This paper firstly analyzed the main factors which result in the image blur. We then discussed the derivative of Linear Spread Function (LSF) by the use of linear step structures that are recorded in the image. The PSF of an image can be approximated by interpolating two linearly separable orthogonal LSFs. Deconvolution filters are derived specifically for each image from its PSF using a Wiener filter in the frequency domain and applying an invert Fourier transform to convert into space domain. The use of Wiener filter could guarantee the achievement of the cleared image while reducing the noise influence. Finally, the deconvolution filters were applied in the 3rd channel of a full scene CBERS-1 image so that it can restore the original signal. A significant improvement of the image quality was achieved.

**Key words:** point spread function(PSF); image restoration; CBERS-1