

文章编号: 1007-4619(2005)04-0475-05

# DMC 卫星图像 MTF 分析及其复原方法研究

李盛阳, 朱重光

(中国科学院 遥感应用研究所, 国家遥感应用工程技术研究中心, 北京 100101)

**摘 要:** 复原退化模糊图像是遥感图像处理的研究重点。对成像系统的调制传递函数 (MTF) 进行了研究, 分析了调制传递函数的基本理论。讨论了一种近似测定成像系统调制传递函数的方法, 通过有限采样, 曲线拟合, 傅立叶变换, 规格化的一系列处理得到图像获取、传输过程中的点扩展函数 (PSF)。提取完整光滑的调制传递函数曲线, 在频域中对图像进行去卷积复原, 分析和评价了复原结果。将该方法应用于 DMC 卫星图像, 图像质量得到明显提高, 收到较好的复原效果。

**关键词:** 调制传递函数; 点扩展函数; DMC 卫星; 图像复原

**中图分类号:** TP79 **文献标识码:** A

## 1 引 言

遥感图像的光学信息获取与传输要经过地物、大气、光学系统、CCD 等一系列环节, 各个环节都可能对图像产生退化作用, 引起图像质量的下降。对退化的模糊图像进行复原是遥感图像处理中的一项重要内容。有些方法需要对传感器平台、大气等参数进行模拟, 但通常这些参数难以获得, 而且模拟参数的准确与否极大的影响到处理的效果。Chen 等<sup>[1]</sup>从模糊图像中求出受大气扰动和尘埃雾气颗粒影响的传递函数进行复原, 但这种方法需要假设大气传递函数, 作为 Wiener 滤波器的 Gauss 传递函数及退化图像具有相同的一维曲线零截点。通过在频率域中进行滤波是经典且有效的复原方法之一。Ruiz 等<sup>[2]</sup>利用 SPOT 图像导出 PSF (Point Spread Function) 进行滤波处理, 效果较好, 但在图像信噪比较低、平滑度较差的情况下, 复原结果不理想。Liu 等<sup>[3]</sup>利用估计的 PSF 结合 Wiener 滤波对 CBERS-1 图像进行复原, 取得了较好的效果, 但无法对噪声功率谱进行准确的估计, 影响到复原的效果。对于如何选择滤波器, 是影响图像恢复质量的关键问题, 滤波器的选择如果不能与图像相关, 滤波器与图像不相适应就难以达到复原的效果。

本文讨论了一种近似测定图像调制传递函数 MTF (Modulation Transfer Function) 的方法。通过选取图像中均匀地物之间灰度变化明显的边缘, 对有限采样点进行平滑滤波、曲线拟合和对线扩展函数 LSF (Line Spread Function) 的傅里叶变换获得点扩展函数 PSF, 提取平滑的 MTF 曲线, 进而选取最优的 MTF 曲线。考虑到采用有约束复原方法时噪声统计、估计的复杂性和欠普适性, 本方法通过频率域的去卷积进行复原处理。该方法从综合了图像获取、传输过程中传感器、大气扰动等情况引起的模糊图像中提取 PSF, 且不需要知道传感器、大气状况等参数。将该方法用于 DMC (Disaster Monitoring Constellation) 小卫星 32m 分辨率的多光谱图像, 图像质量得到明显提高, 收到了较好的复原效果。

## 2 调制传递函数

### 2.1 MTF 的基本理论

MTF 是把光学成像系统看成空间频率滤波器, 作为与振幅相关的空间频率响应而定义的。空间频率用正弦波的频率定义。它所反映的是成像系统在对目标物成像过程中信号的扩散与衰减程度。因此, 在不考虑噪声或噪声干扰较小的情况下, 退化图像的频谱等于原始图像的频谱与 MTF 的乘积。理论上,

收稿日期: 2005-03-03; 修订日期: 2005-04-20

基金项目: (95) 国家重点科技攻关重大专项, 高性能对地观测微小卫星技术与应用研究

作者简介: 李盛阳 (1976—), 男, 山东泰安人, 现为中国科学院遥感应用研究所在读博士研究生。主要研究方向为遥感图像复原、改善图像分辨率方法研究。

如果已知退化图像频谱所对应的 MTF 的精确值,就可以对该图像进行完全的复原。但在实际应用中,遥感成像系统的 MTF 由成像过程中各介质(如传感器、平台抖动、大气扰动、影像处理等)的 MTF 相乘得到<sup>[4]</sup>,而这样的 MTF 是很难求出的。所以,在处理过程中,只能以待复原的图像为基础以近似解算的方法求解出 MTF,从而进行图像复原处理。

遥感图像的获取受到数百公里大气的往返衰减,星载光学系统、传感器、电子线路等的衰减,这样的衰减可用系统 MTF 表达,它是光学系统、传感器、大气等 MTF 的乘积。一般情况下,MTF 是小于 1 的正数,随着空间频率的提高,信号的强度衰减越严重,若空间频率超过截止频率,MTF 可能为负数,并出现震荡现象。

$$MTF_{系统} = MTF_{大气} \times MTF_{光学} \times MTF_{传感器} \times MTF_{电路} \quad (1)$$

由式(1)看出,系统 MTF 不仅小于 1,且小于单个的 MTF,这使得所获得图像的纹理与几何特征具有显著的衰退现象,表现为细节模糊,特征边缘不清晰等。假定成像系统是线性空间不变(Linear Space-Invariant)线性系统,则图像退化的一般模型表示为<sup>[5]</sup>:

$$g(x, y) = H[f(x, y)] + n(x, y) \\ = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\alpha, \beta) H[\delta(x - \alpha, y - \beta)] d\alpha d\beta + n(x, y) \quad (2)$$

$f(x, y)$ 为原始图像,  $g(x, y)$ 为经过大气衰减、星载光学系统、传感器、电子线路后退化的图像,  $n(x, y)$ 为随机噪声,  $H(*)$ 为综合所有退化因素的函数,即 PSF,该函数只能从退化图像中近似求得。对(2)进行傅里叶变换,则得到:

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) + N(u, v) \quad (3)$$

式中,  $H(u, v)$ 即是 MTF,则

$$F(u, v) = G(u, v) / H(u, v) - N(u, v) / H(u, v) \quad (4)$$

从上面的推导可以得出, PSF 经傅里叶变换后得到 MTF,利用 MTF 作为卷积核,在频率域中对图像进行去卷积处理,可对图像进行复原处理。

### 2.2 MTF 曲线提取

选用图像中灰度变化明显的地物边缘,通过测定成像系统对这一边界的扩展情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。

(1) 进行有限采样,提取特征数据,以取得满足要求的数据。选取图像中具有反差的两块相邻

的均匀灰度变化的地物边界,沿着垂直于边界的方向在边界两侧各采样若干像元,并沿着边界方向依次采样  $n$  行,取各采样行的平均值作为每行的最终结果。将最终获取的一组数据按照单调递升的顺序进行排列。为了保持扫描数据的有效性和完整性,规定一定长度的采样宽度。

(2) 对边界数据进行平滑滤波处理。由于图像中噪声的复杂多样性,原始采样的数据受到噪声的干扰,会影响 MTF 的测定精度,所以进行平滑滤波处理,抑制噪声的影响。由于采样间隔是等距离的,采用基于最小二乘的三次多项式进行平滑处理,对原始值进行误差修正。

(3) 插值边界数据,拟合边缘扩展函数 ESF (Edge Spread Function)。用三次样条函数对平滑处理后的数据进行拟合,内插足够的数,以表示一条完整光滑的 MTF 曲线。

(4) 对 ESF 进行微分得到 LSF。对插值后的数据各点求一阶导数,得到离散的 LSF,公式表示为:

$$L(x) = d(E(x)) / dx \quad (5)$$

如果假设 LSF 是高斯对称的,则可更方便的求得 LSF 的值。由公式(5)得到,

$$E(x) = \int L(x) dx \quad (6)$$

$$L(x) = 1 / [(2\pi)^{1/2} \sigma] \exp[-x^2 / (2\sigma^2)] \quad (7)$$

令  $\sigma = 1$ ,将式(7)代入(6)中,得到:

$$E(x) = 1 / (2\pi)^{1/2} \int \exp(-x^2 / 2) dx \quad (8)$$

上式是呈标准正态分布的规格化曲线函数,通过查表计算,求得  $\sigma$ ,代入式(7),也可求得 LSF。

(5) 对 LSF 进行傅里叶变换,频谱的模经归一化处理得到 MTF。LSF 的傅里叶变换即为 MTF,公式表示为:

$$H(u) = \sum_{k=0}^{n-1} L(x_k) e^{-j \frac{2\pi ku}{N}} \quad (9)$$

$L(x_k)$ 是一维离散的 LSF 值,  $N$ 是离散数据个数。对  $H(u)$ 进行归一化处理,得到 MTF,公式表示为<sup>[7]</sup>:

$$M(u) = \frac{|H(u)|}{\sum_{k=0}^{N-1} L(x_k)} \quad (10)$$

传感器成像模型中, PSF 具有高斯类型的分布, LSF 与 MTF 的图示如图 1 所示<sup>[6]</sup>。

### 3 图像复原

根据公式(4)可知,复原退化图像,关键是求取

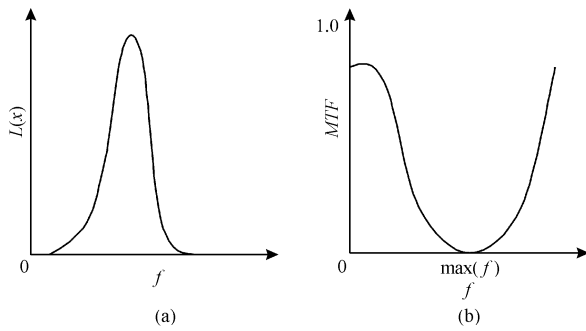


图 1 LSF 和 MTF

Fig 1 LSF and MTF diagram

$G(u, v)$  和  $H(u, v)$ ,  $G(u, v)$  为退化图像  $g(x, y)$  二维离散傅里叶变换的频谱,  $H(u, v)$  为测定的 MTF。由于在去卷积的过程中, 图像的频率与测定的 MTF 相应频率对应起来, 在频率范围一致的情况下, 不需要调整图像的频率分布, 直接用图像每行的频率数据除以 MTF 完成去卷积过程, 再通过逆傅里叶变换, 取得复原图像。复原流程如图 2。

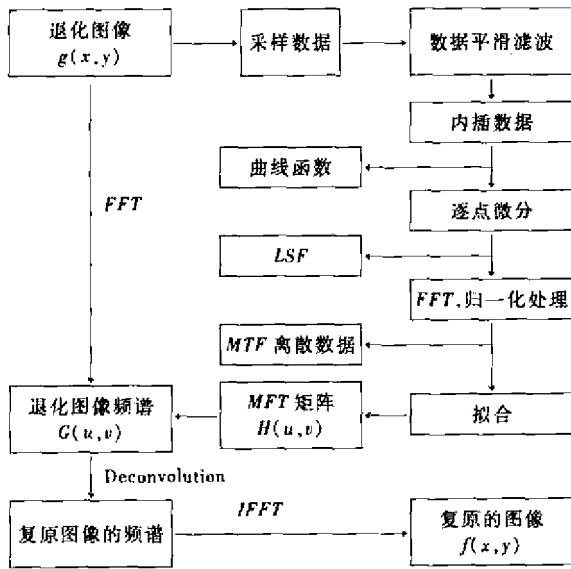


图 2 图像复原流程图

Fig 2 Flow diagram of image restoration

正、去条带预处理, 同时为了避免去条带处理影响测定 MTF 的准确性, 故在去条带处理之前, 获取了原始图像的 MTF。

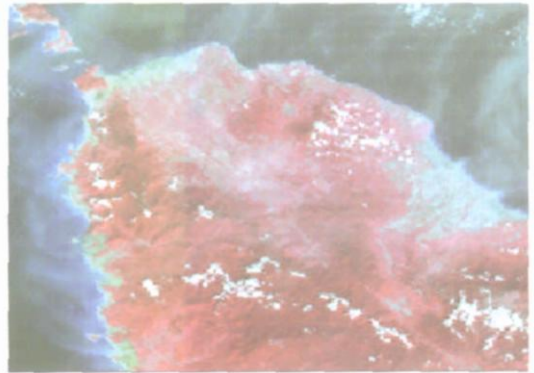


图 3 原始图像

Fig 3 Source image

选择有代表性的 4 种 MTF 曲线, 如图 4, 其所对应的复原结果如图 5。由图 4 看出, 测定的 MTF 曲线在高频部分出现震荡, 这属于正常情况, 是由于采样数据不均匀, 导致 LSF 出现波动造成的。由 MTF 的分析可知, 低频部分主要决定图像的反差, 高频部分主要决定了图像的清晰度, 因此 MTF 曲线包含的面积大则说明了图像反差好, 清晰度高。综合 MTF 曲线包含的面积大小、平滑性与近似正弦波频率曲线的情况分析, 图 4 中 (d) 所示的曲线状况最好。通过比较相应的 MTF 复原结果来看, 由测定的 MTF 进行图像复原, 结果得到了一定程度的改善, 图 5 中 (d) 的效果最好, 而这也与实际测定的良好的 MTF 曲线是相对应的。

在进行 MTF 复原之前时, 进行了纠正、去条带处理, 在一定程度上会影响到结果的准确性, 但预处理效果好, 复原结果不会有太大的精度损失。由于均值 (Mean Value) 反映图像整体亮度水平。平均梯度 (Mean Gradient) 从整体上反映图像边缘、纹理细节等结构的清晰程度。采用这两个可参考的指标定量评价复原处理效果。

### 4 试验结果及分析

试验数据是英国 DMC 小卫星 2005-01-07 获取的印度尼西亚苏门答腊岛的遥感图像, 主要针对图像中受地震海啸灾害最严重的印度尼西亚齐特别自治区进行 MTF 复原方法研究。由于原始图像是未纠正的, 且具有明显的条带噪声, 为了避免去卷积过程中在一定程度上放大噪声, 故对图像进行了纠

$$M = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I(i, j)}{m * n} \tag{11}$$

$$\nabla G = \frac{\sum \sqrt{(\nabla I_x^2 + \nabla I_y^2) / 2}}{(m-1) * (n-1)} \tag{12}$$

从表 1 看出, MTF 复原处理后, 结果图像均值均有不同程度的降低, 但降低幅度不大, 说明复原后图像亮度水平稍有降低。结果图像比原始图像平均

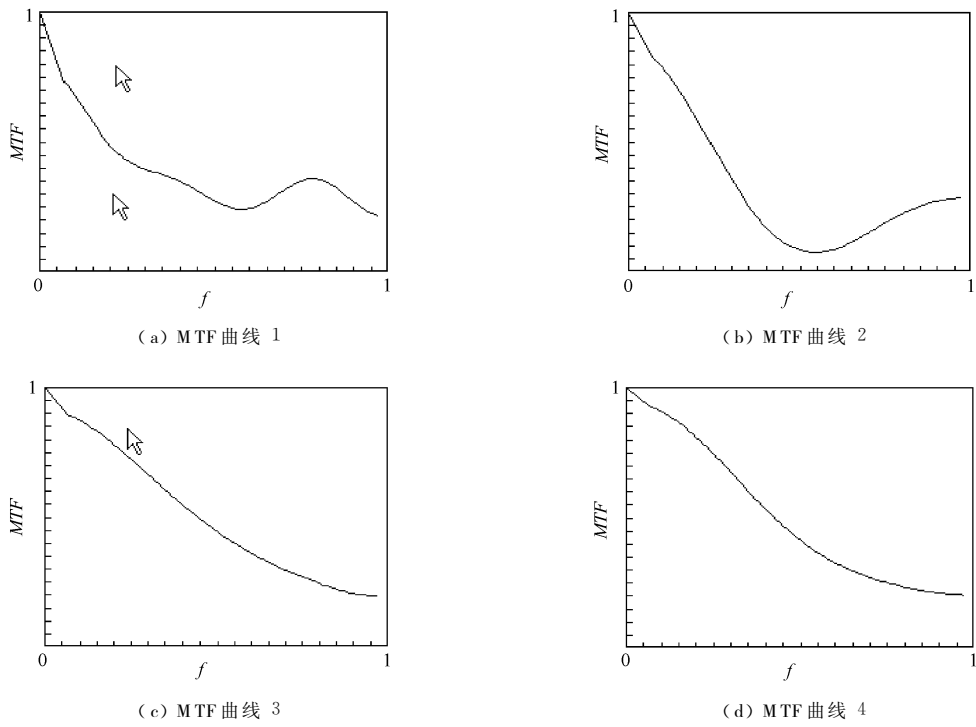


图 4 MTF 曲线  
Fig 4 Curve of MTF

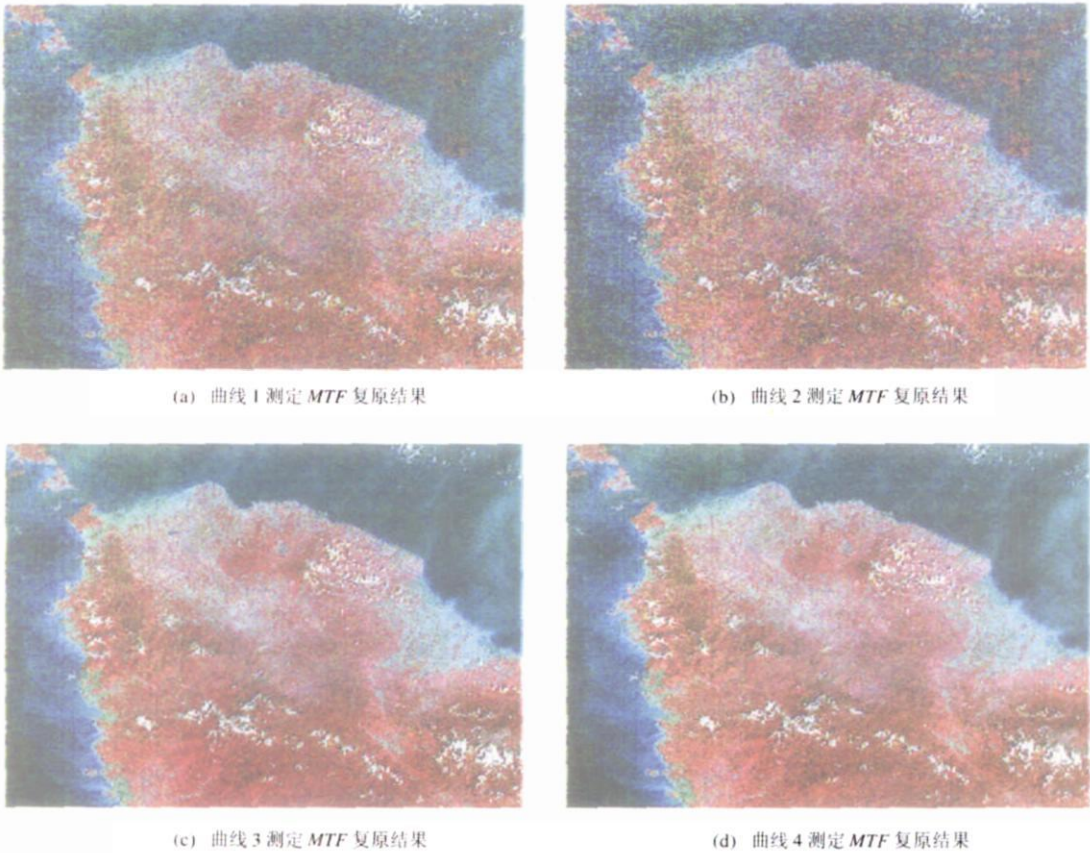


图 5 MTF 复原的图像结果  
Fig 5 Image result of MTF restoration

表 1 复原结果评价

Table 1 Assessment of restoration result

评价类型	均值	平均梯度
原始图像	123.2318	21.3983
曲线 1 测定 MTF 复原结果	120.8646	35.4498
曲线 2 测定 MTF 复原结果	114.7501	34.4985
曲线 3 测定 MTF 复原结果	118.2113	42.3055
曲线 4 测定 MTF 复原结果	119.8941	47.3950

梯度值明显增加,说明复原后图像有更强的细节表达能力,清晰度提高,尤其是曲线 4 测定 MTF 复原结果,即图 5 中(d)图平均梯度最高,说明复原效果最好,这也与目视评价结果保持一致。

## 5 结 论

退化模糊图像的复原是遥感图像处理中的一个经典研究内容。本文在不知道传感器、大气状况等参数的情况下通过原始图像的分析获取 MTF 并进行频率域的复原,将该方法应用到实际的 DMC 小卫星图像中,取得了较好的复原效果。

MTF 复原对改善图像质量,提高清晰度有较强的实用价值。在应用 MTF 进行图像复原时,如何提高 MTF 的测定精度,如何准确有效的估计图像中分布的噪声进行有约束的复原,以更有效的方法抑制噪声恢复图像,需要进行更深入更广泛的研究。

## 参 考 文 献 (References)

- [1] Chen S H, Zhu G F, Chen H, et al. Restoration of Images Blurred by the Atmosphere Based on Mean MTF Identification [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(12): 1091-1097. [陈书海,朱国富,陈华等.基于 MTF 识别的大气模糊图像复原[J]. *光子学报*, 1998, **27**(12): 1091-1097.]
- [2] 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.
- [3] Liu Z J, Wang C Y, Luo C F. CBERS-1 PSF Estimation and Image Restoration [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, **8**(3): 234-238. [刘正军,王长耀,骆成凤. CBERS-1 PSF 估计与图像复原[J]. *遥感学报*, 2004, **8**(3): 234-238.]
- [4] Xiong Z, Tong Q X, Zheng L F. Some Methods of Smooth and Interpolation to Influence of Image Spatial Resolution Estimation [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, **4**(1): 36-40. [熊桢,童庆禧,郑兰芬.若干平滑和插值方法对图像空间分辨率估算的影响[J]. *遥感学报*, 2000, **4**(1): 36-40.]
- [5] Andrews H C, Hunt B R. *Digital Image Restoration* [M]. Prentice Hall Inc, 1977.
- [6] Robert A. Schowengerdt. *Remote Sensing Models and Methods for Image Processing* [M]. New York: Academic Press Second Edition, 1997.
- [7] Zhou S T, Xuan J B. Restoration Technique Based on Image Features [J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 1999, **29**(3): 230-234. [周松涛,宣家斌.基于景物灰度分布特征的影像恢复技术[J]. *武汉测绘科技大学学报*, 1999, **29**(3): 230-234.]

## DMC Satellite Image MTF Analysis and Restoration Method Research

LI Sheng-yang ZHU Chong-guang

(National Engineering Research Center for Geomatics Institute of Remote Sensing Applications CAS Beijing 100101, China)

**Abstract** Restoration to the degraded and blurred image was a key point in remote sensing image processing. In this paper, modulation transfer function (MTF) of the imaging system and the basic theory of MTF was researched. A new method that proximately mensurate MTF of imaging system was presented, and a series of processing technologies such as limited sampling, curve fitting, Fourier transform and normalization and so on were included in this method, so as to get point spread function (PSF) in image acquisition and transmission. A complete and smooth modulation transfer function's curve was extracted, restoration of deconvolution to source degraded and blurred image was applied in frequency domain, and the restoration result was analyzed and evaluated. This method was applied to Disaster Monitoring Constellation satellite image, the quality of image was greatly improved, and the restoration result is satisfying.

**Key words** modulation transfer function; point spread function; disaster monitoring constellation (DMC) satellite; image restoration