

遥感图像恢复与传感器 MTF 在轨检测技术

王先华, 乔延利, 洪 津

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 遥感成像过程受到大气和成像系统中的光学、探测器和电子学子系统等的影响, 引起成像退化作用, 造成图像模糊, 降低了图像中信息的提取能力。图像恢复技术可以改善图像的质量, 提高图像信息提取能力。依据图像恢复技术的要求, 高精度成像系统调制传递函数(MTF)是高质量图像恢复的基本条件。针对不同传感器之间、同一传感器不同时期存在的成像性能变化, 所引起成像系统 MTF 变化的实际情况, 介绍了成像过程中系统 MTF 在轨检测技术。着重于介绍刃边法, 对刃边法的原理、刃边法检测对地物景观的要求等进行了详细分析, 对这一方法中有关图像景物的行扫描采样、扫描行的配准以及对所获得的边扩散函数的拟合等关键技术进行了详细介绍, 这些技术是保证较高精度获取遥感图像 MTF 的基础。文章在介绍基于成像系统 MTF 图像恢复技术后, 通过实验检验了方法的可行性, 结果表明以 MTF 在轨检测为基础的图像恢复技术, 可以明显地提高遥感图像质量。

关键词: 遥感; 图像恢复; MTF; 在轨检测

中图分类号: TP 75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0323(2006)05-0440-05

1 引言

遥感成像系统的退化作用造成了图像模糊, 这种模糊对图像中目标的识别和信息提取产生着重要影响。图像恢复可以依据退化模型对图像进行复原、提升图像品质, 通过图像品质的提升达到提高识别目标能力的目的。

调制传递函数(MTF)是遥感图像恢复的重要参数, 是图像退化模型中最重要的部分。由于难以获取相关图像成像系统的 MTF, 人们试图采用盲去卷积的方法通过对系统模型的假设进行图像恢复^[1,2]。然而盲去卷积法在计算复杂程度、收敛性和算法的可移植性上很难达到和谐的折衷, 因此寻求一种传感器 MTF 参数在轨检测与图像恢复的综合技术就表现出重要的实际意义。

由于成像条件的变化、成像系统所处运行环境的变化以及长期运行造成的元器件老化等因素, 遥感成像系统特别是星载成像系统的成像质量会发生变化, 表现为调制传递函数发生变化, 因此在轨检测卫星传感器的调制传递函数, 跟踪传感器成像性能的

变化是非常必要的, 如美国机载高分辨率多光谱成像仪的在轨检测^[3], 美国高分辨率卫星 IKONOS 的在轨检测^[4], 以及法国 SPOT 的在轨检测^[5]等, 都是为了满足这种需求。

本文提出了传感器 MTF 在轨检测技术, 以及在此基础上利用 MTF 对图像进行恢复的技术。

2 遥感图像恢复原理

成像系统成像过程中的退化作用, 从空域上可将过程模型化为作用在原始图像 $f(x, y)$ 上的系统退化模型 $h(x, y)$ 与一个加性噪声 $n(x, y)$ 的联合, 产生了退化图像 $g(x, y)$, 其数学形式为:

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

式中“*”表示卷积。

对退化模型进行傅立叶变换, 得到如下形式:

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot H(u, v) + N(u, v) \quad (2)$$

其中: “·”表示乘积, $G(u, v)$ 、 $F(u, v)$ 、 $H(u, v)$ 和 $N(u, v)$ 分别为 $g(x, y)$ 、 $f(x, y)$ 、 $h(x, y)$ 和 $n(x, y)$ 傅立叶变换后的频率形式。

收稿日期: 2006-01-07; 修订日期: 2006-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(40571105)资助。

作者简介: 王先华(1963--), 男, 副研究员, 主要从事定量遥感、传感器成像性能及图像信息提取的研究工作。

空域上的退化系统模型 $h(x, y)$ 经过傅立叶变换得到频域上的传递函数 $H(u, v)$ 。由于图像恢复中原始图像与模型在频域上为乘积关系, 计算过程简单, 所以恢复通常在频域进行。

调制传递函数显示成像系统具有随频率升高响应降低的特点。图像恢复就是针对成像过程中的高频损失, 对原始图像进行频率补偿。由式(2)可得, 频率补偿后的图像频谱应为:

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

由于高频 $H(u, v)$ 值较小, $N(u, v)/H(u, v)$ 会将噪声放大, 这样使得恢复的结果与预期的结果可能产生很大的差距。

为了克服频率补偿带来的噪声放大问题, 引入以下控制条件: 设 $\hat{f}(x, y)$ 为 $f(x, y)$ 的最佳预估, 若要满足下面的条件: $\min E\{[f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2\}$ 中 E 是期望值^[6], 由这个条件得到:

$$\hat{F}(u, v) = H_w(u, v)G(u, v) \quad (4)$$

其中: $H_w(u, v)$ 为维纳滤波器, 它的表达式如下:

$$H_w(u, v) = \frac{H(u, v)^*}{|H(u, v)|^2 + \frac{S_n(u, v)}{S_f(u, v)}} \quad (5)$$

其中: $H(u, v)^*$ 是传递函数 $H(u, v)$ 的复共轭, $S_f(u, v)$ 和 $S_n(u, v)$ 是信号和噪声的功率谱。实践中许多场合并不知道噪声的分布, 所以这两项通常是未知的, 一般可以简化为:

$$H_w(u, v) = \frac{H(u, v)^*}{|H(u, v)|^2 + k} \quad (6)$$

利用式(4), 对图像频谱 $G(u, v)$ 进行频率补偿, 得到恢复后图像的频谱 $\hat{F}(u, v)$, 进行傅立叶反变换, 即恢复后的图像。由式(4)关系式看出, 恢复图像的效果完全取决于由系统 MTF 决定的滤波器 $H_w(u, v)$ 。

3 刃边法在轨检测遥感器 MTF

遥感器 MTF 在轨检测方法主要依据图像中的点、线或边缘等特殊目标^[7], 其中点目标有小岛、小湖, 反射镜和人工光源等, 线性体目标有水上的大桥、路和运河等, 边缘体目标有海岸线, 湖岸线和冰体的前缘等。

边缘法利用的是一块反射率较低地块与一块反射率较高地块以直线相交的地域景物, 是一种高分

辨率卫星最常用的检测方法, 如美国 IKONOS, Quikbird 等卫星的在轨检测都采用这种方法。这种利用高低反射率地块亮度突变的景物检测遥感器的方式称为刃边法, 这里我们着重介绍刃边法获取 MTF 的技术。

3.1 对刃边景物的采样

刃边法检测技术的关键是获取反映遥感器 MTF 特性的刃边扩散廓线, 这个廓线称为边扩散函数。要获得准确的边扩散函数, 首先要求图像中刃边处有足够的采样点, 以保证边扩散廓线的完整性。在胶片成像等模拟成像方式中, 对刃边景物采样时可以采用过采样的方式, 提高刃边的采样数据点。对于目前广泛使用的数字成像系统, 由于采样间隔是固定的, 不可能用过采样方式获得刃边所需的足够采样点。为解决数字成像系统采样点不足的问题, 我们可以采用刃边与扫描方向保持一个小夹角的方式增加刃边的采样数据点, 其原理如图 1 所示: 由于航线与刃边有一个较小的夹角, 从而保证从一个扫描行到另一个扫描行的刃边位置有轻微的位移, 通过不同扫描行以刃边交会线为基准进行位置配准, 也可获得足够的采样点。

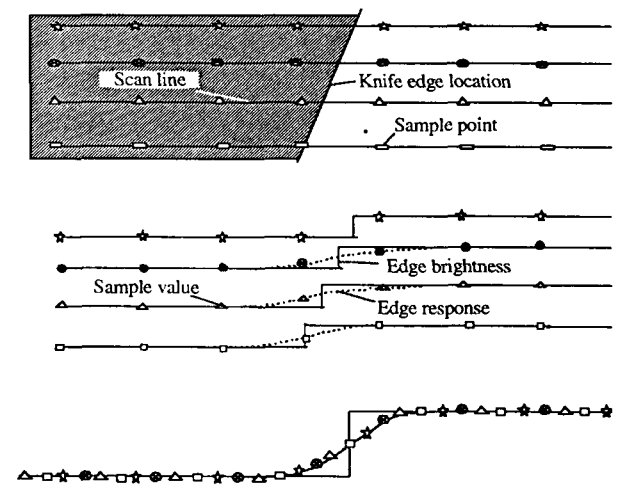


图 1 倾斜刃边的行像元配准

Fig. 1 Registering scans with shifted knife

3.2 边扩散函数的采样获取方法

边扩散函数的获取通常采用这样几个步骤。首先, 分别对刃边景观中低亮度区和高亮度区的灰度值分别求平均, 并进而求出高低亮度的平均值, 该值就是刃边交会线处的值; 其次, 在每行中以平均值对像元进行逐点比较, 以确定每行刃边交会线的位置, 这个位置通常为亚像元值, 需线性内插; 第三步, 由于数据噪声的存在, 所获得的各行刃边交会位置与

实际位置会有所偏差,不在一条线上,故而对各行中求得的刃边交会位置要进行线性拟合;最后,以拟合后的刃边交会位置为基准,对各行像元进行配准,得刃边上像素的灰度分布。图 2 是利用这种方法获得的刃边廓线分布。

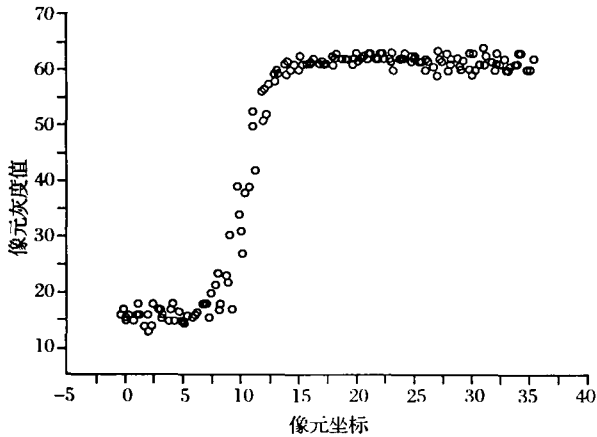


图 2 行配准后的像元分布

Fig. 2 Combined scan with registered edges

3.3 系统调制传递函数的计算

设刃边的垂直方向亮度突变以阶跃函数为 $U(x)$ 表示,传感器系统的点扩散函数也即图像恢复中的退化模型为 $h(x)$,则该方向的图像输出函数 $g(x)$ 则为:

$$g(x) = U(x) * h(x) \quad (7)$$

$g(x)$ 称为边扩散函数。

根据卷积的性质,对于卷积函数 $g(x)$ 微分,可得:

$$\frac{dg(x)}{dx} = \frac{dU(x)}{dx} * h(x) = \delta(x) * h(x) = h(x) \quad (8)$$

其中: $\delta(x)$ 为冲击函数。式(8)表明对边扩散函数 $g(x)$ 的微分可以得到系统的响应函数。这个响应函数是垂直于刃边方向的一维函数,实际上就是一个方向的点扩散函数,同理可以获得另一垂直方向的一维点扩散函数,由于遥感器系统点扩散函数的可分离性,由这两个方向的点扩散函数可以获得遥感器二维点扩散函数,对其进行傅立叶变换即得二维调制传递函数。

在计算点扩散函数之前,需要刃边廓线进行拟合(图 3 中的实线)。这种拟合是必须的,因为拟合后的光滑边扩散函数才能够进行微分运算,得到点扩散函数。

对拟合后的边扩散曲线进行微分即得到点扩散函数(图 4),再通过点线扩散函数进行离散傅立叶

变换并取模即得到所需的调制传递函数(图 5)。

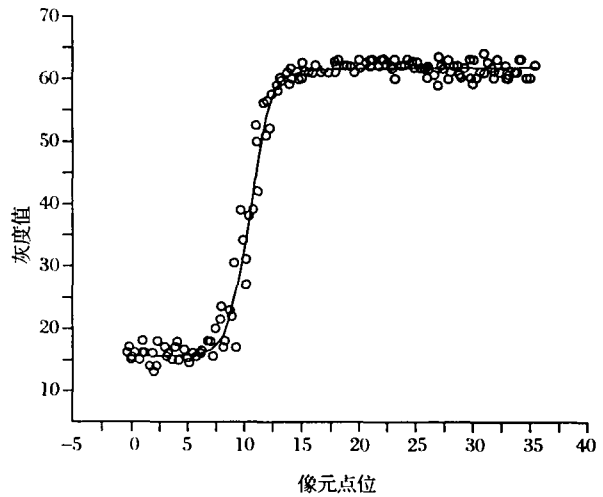


图 3 刃边廓线的拟合

Fig. 3 Fitted edge profile

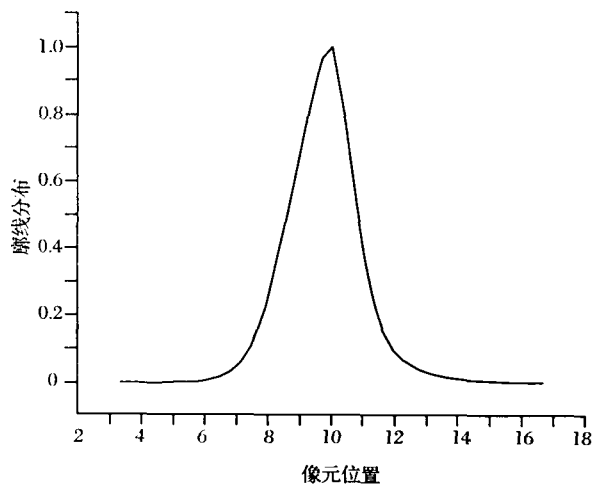


图 4 点扩散函数曲线

Fig. 4 The curve of point spread function

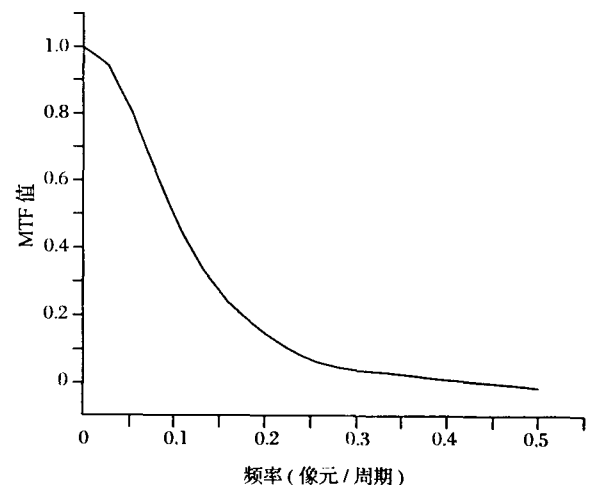


图 5 调制传递函数曲线

Fig. 5 The curve of modulation transfer function

4 遥感图像恢复

根据上述介绍的扩散函数和调制传递函数的获取方法,利用图5中的黑白靶标,得到了遥感图像扫描方向所示的点扩散函数(图4)以及相应的调制传递函数(图5),同理,利用白色靶条与地面构成的刃边获得轨道方向的点扩散函数和调制传递函数。由

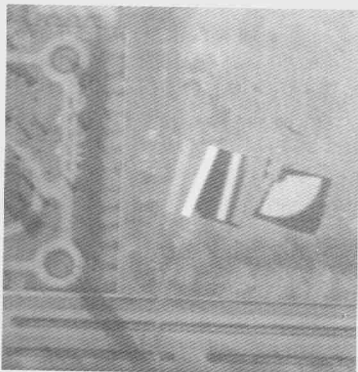


图6 原始图像
Fig.6 Original image

于遥感成像系统具有可分离的特性,因此我们得到成像系统的二维点扩散函数 $h(x, y) = h(x) \cdot h(y)$, 并由此得到相应的调制传递函数。

以此基础上获得的响应函数,利用式(5),得到作用频率补偿的滤波函数,对图6图像的频谱进行频率补偿,并进行傅立叶反变换,得到图7所示得恢复后的图像。

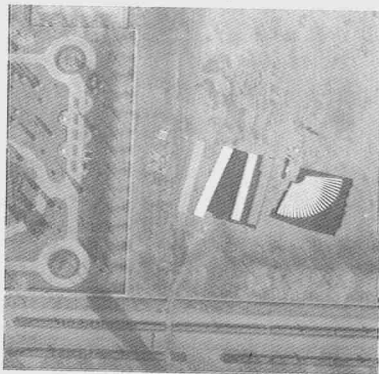


图7 恢复后的图像
Fig.7 Restored image

5 结 语

成像系统的退化作用导致图像模糊,图像恢复技术可以提高图像品质,提高图像目标的识别能力。图像恢复的依据是成像模型,准确的成像模型是提高图像恢复效果的基础,本文的在轨检测方法和在此基础上的图像恢复技术的结合可以较好的解决这个问题:

(1) 利用一定的地物目标,可以获得传感器的调制传递函数,由于这种方法是在传感器运行过程中进行的检测,因此对不同传感器或传感器运行过程中成像性能的变化,都可以给出相应的MTF。

(2) 利用在轨检测获得的调制传递函数对图像进行恢复效果明显,恢复后的图像质量得到了较大提高,图像中的细微结构明显凸现,这可用于检验传感器性能的放射装靶标上可以清晰显示。由于文中介绍的图像恢复方法是建立在实际检测上,因此该技术很容易移植到不同传感器获取的图像恢

复上。

参考文献:

- [1] David S.C. Biggs, Andrews M. Iterative Blind Deconvolution of Extended Objects[J]. IEEE International Conference on Image Processing, 1997, (2):454-457.
- [2] Henri L. Claude A. Hubert B, et al. Blind Deconvolution Using the Richardson-Lucy Algorithm[J]. SPIE, 1994, 2312:182-192.
- [3] Deweert M J, Leonard C L, Atkinson D L, et al. In-flight MTF Characterization for High-Resolution Multispectral MCM Reconnaissance[J]. SPIE, 2003, 5155:40-48.
- [4] Ryan R, Baldrige B, Schowengerdt R A, et al. IKONOS Spatial Resolution and Image Interpretability Characterization[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 88(1-2):37-52.
- [5] Gerard B. SPOT Image Quality-Twenty Months Experience[J]. INT J Remote Sensing, 1998, 9(9):1409-1414.
- [6] 章载普. 图像处理和分析[M]. 北京:清华大学出版社, 1999.
- [7] Schowengerdt R A. Measurement of the Sensor Spatial Response for Remote Sensing Systems[J]. SPIE, 2001, 4388:65-71.

A Technique of RS Image Restoration and In-flight Measurement of Remote Sensor MTF

WANG Xian-hua, QIAO Yan-li, HONG Jin

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Due to effects of atmosphere and optical subsystem, detector and electronic subsystem in imaging system, there is degradation in imaging process. The degradation of imaging system induces imagery blur. The ability to acquire information from blurred image is debased. The technique of image restoration can improve imagery quality, so it can enhance the ability to acquire information from restored image. According to the requirement of image restoration technique, high precision modulate transfer function (MTF) of imaging system is the base of high-quality imagery restored. Since there are differences of MTF between different remote sensors and at different period of same remote sensor, it is important to acquire MTF of imaging system in-flight. The paper presents systematically a in-flight measurement technique of remote sensor MTF, which is called knife edge technique. In the technique, we first analyze its principle and its requirement on targets in images, then introduce in detail several key techniques including sampling method line by line in image, registering line pixels with shifted knife method and fitting method to acquired knife edge. After introducing the technique of image restoration based on imaging system' MTF, the paper shows the improved image on the bases of experiment. The result appears imagery quality is improved obviously.

Key words: Remote sensing, Image restoration, MTF, In-flight measurement