

文章编号: 1007-4619(2007)03-0318-05

卫星光学相机 MTF 在轨检测方法研究

王先华, 乔延利, 易维宁

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 调制传递函数是反映卫星光学相机成像性能的重要参数, 针对调制传递函数多种在轨检测方法, 本文在分析了可利用地面景物的基础上, 结合目前卫星光学相机分辨率不断提高的现状, 着重从原理和方法上介绍了利用不同亮度地块接壤的地面靶标进行检验的刃边法, 同时依据实验研究成果, 介绍了对原始刃边数据拟合和调制传递函数的频谱增密技术, 这些技术对提高调制传递函数获取精度具有重要的作用。

关键词: 调制传递函数; 在轨检测; 刃边法

中图分类号: TP702 文献标识码: A

In-flight Measurement of Satellite Optical camera MTF

WANG Xian-hua, QIAO Yan-li, YI Wei-ni

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

Abstract: Modulation transfer function (MTF) is an essential parameter which characterizes imaging quality of satellite optical camera. We present a review of techniques for modulation transfer function in-flight measurement and emphasize the technique of knife edge according to situation of developing ground sample distance. The important techniques of data fitting and frequency augment are discussed on the bases of mathematics and digital signal processing theory. These techniques are important to improve accuracy of acquired modulation transfer function.

Key words: modulation transfer function; in-flight measurement; technique of knife edge

1 引 言

调制传递函数 (MTF) 是对卫星光学相机成像性能进行评估的一个重要参数, 该函数反映了相机的两个重要特性, 即所成图像的分辨率和对比度, 它是目前评价光学相机空间特性最好的参数^[1]。

由于卫星发射的冲击、空间运行环境的变化和运行过程中元器件的老化等原因, 卫星相机的特性都可能发生变化, 因此在轨检测是不能用发射前地面实验室检测来代替的。美国、法国等航天大国都在其卫星相机运行期间作了较详细的在轨跟踪检验^[2,3]。准确把握相机调制传递函数在运行过程中

的变化, 关系到遥感数据资源的合理及有效利用。根据 McGillm et al.^[4], 遥感图像中可以用作获得 MTF 的地物有三种: (1) 刃边目标: 图像中亮度反差较大的地物景观, 如海岸、不同植被地块或建筑物与其阴影等; (2) 线性脉冲目标: 图像中的一条直而窄的道路或桥梁; (3) 方波目标: 图像中一系列亮暗条带区域, 如不同作物的相间种植。在遥感图像中虽然线性体较普遍的存在, 但用作 MTF 检测的线性体应具有较小的宽度, 其扩散要能在图像中被足够分辨, 若考虑相机动态范围的设置是希望能够对较大反射率变化范围目标识别的实际情况, 事实上寻找合适线性体并不是容易的事^[5]。而地面目标中第三种类型显而易见更难获得^[6]。与第二和

第三类目标相比, 第一类刃边目标在分辨率较高的条件下容易获得, 特别是随着卫星相机分辨率的提高, 根据需要还可以布设人工靶标。人工靶标反射率均匀, 高低反射率的差可以根据需要设置, 有利于提高检测精度, 因此随着卫星相机分辨率的提高, 这种方法具有广阔的应用前景。目前国外的高分辨率卫星如 IKONOS 等都采用人工靶标的方法。

利用两块反射率反差较大的目标获取 MTF 的方法叫刃边法。由于刃边法可以利用较多的数据点, 因此如果数据处理手段合理, 则可以有效地减少由图像噪声带来的误差, 提高卫星相机 MTF 的检测精度。本文将就刃边法的原理、方法和数据处理技术进行探讨。

2 刃边法原理

刃边法使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景观, 在接壤处发生亮度的突变, 这种亮度上的突变在数学上可以以 $U(x, y)$ 表示, 若相机的响应函数为 $h(x, y)$, 对于一个线性不变系统, 则输出图像函数 $g(x, y)$ 为:

$$g(x, y) = U(x, y) * h(x, y) \tag{1}$$

“*”表示卷积运算。假设成像系统点扩散函数 $h(x, y)$ 是可分离的, 则:

$$h(x, y) = h_x(x) h_y(y) \tag{2}$$

一般相机基本满足这种假设。可以通过求两个垂直方向的响应函数而得到相机的两维响应函数^[7], 从而极大地简化检测工作。

设刃边的垂直方向阶跃函数为 $U(x)$, 点扩散函数为 $h(x)$, 则该方向的图像输出函数 $g(x)$ 就由 (1) 式简化为:

$$g(x) = U(x) * h(x) \tag{3}$$

$g(x)$ 称为边扩散函数 (ESF)。根据卷积的性质, 对于卷积函数 $g(x)$ 微分, 可得

$$\frac{dg(x)}{dx} = \frac{dU(x)}{dx} * h(x) = \delta(x) * h(x) = h(x) \tag{4}$$

式中, $\delta(x)$ 为冲击函数。(4) 式表明, 对边扩散函数 $g(x)$ 的微分可以得到系统的响应函数, 由于这个响应函数是垂直于刃边方向的一维函数, 通常称为线扩散函数 (LSF)。

由于线扩散实际上就是一个方向的一维点扩散函数, 基于点扩散函数与调制传递函数是一对傅里叶变换的关系, 对由 (4) 式线扩散函数进行傅里叶变换, 即可得到相机一个方向的调制传递函数, 同理

可以获得另一垂直方向的调制传递函数, 从而获得相机的二维调制传递函数。

3 刃边法技术

刃边法获取调制传递函数的技术流程包括对图像中刃边图像的采样、扫描行数据点的配准以及拟合、微分和傅里叶变换等一系列数据处理手段。

3.1 对刃边景物的采样

边扩散函数是通过对刃边图像采样获得的刃边廓线分布获得的。要获得准确的边扩散廓线, 首先要求刃边有足够的数据点。对于诸如胶片成像等模拟成像方式, 在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, 不可能用过采样的方式获得刃边所需的足够采样点, 因此为了解决数字成像系统采样点不足的问题, 必须采用其他采样方式。为解决数字相机采样点不足的问题, 可以采用刃边与扫描方向产生小夹角的方式增加刃边的采样数据点。采样原理如图 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的位置配准, 可以获得足够的采样点。

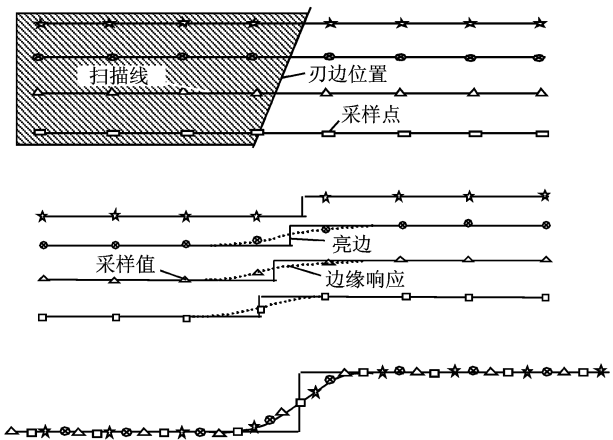


图 1 倾斜刃边的行像元配准
Fig 1 Registering scans with shifted knife

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, 分别对图像中刃边的低亮度区和高亮度区的灰度值进行平均, 并求高低亮度的平均值, 该值就是刃边

交会处的值;其次,在每行中以平均值进行逐点比较,确定行中与该平均值对应的位置,这个位置值通常为亚像元值,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。

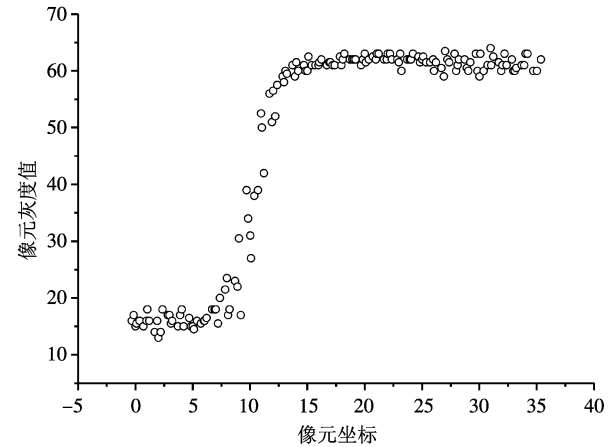


图 2 行配准后的像元分布

Fig 2 Combined scan with registered edges

3.3 系统调制传递函数的计算

在对边扩散函数微分之前,需对上述方法获得的边扩散函数进行拟合,这种拟合是必须的,因为拟合后的边扩散函数可以较大地降低图像噪声的影响。对拟合后的边扩散曲线进行微分运算即得到线扩散函数(图 3),再通过对线扩散函数进行离散傅里叶变换并取模即得到所需的调制传递函数(图 4)。

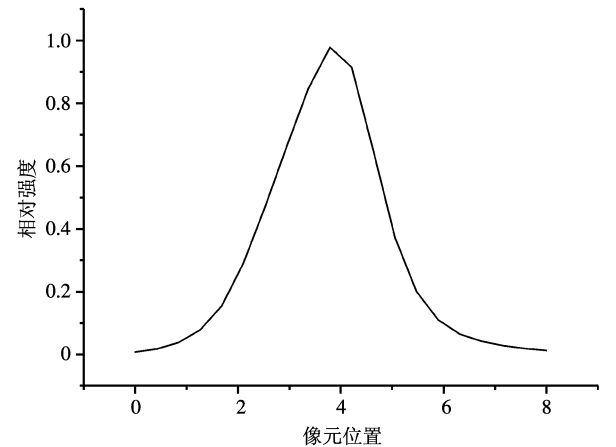


图 3 点扩散函数曲线

Fig 3 The curve of point spread function

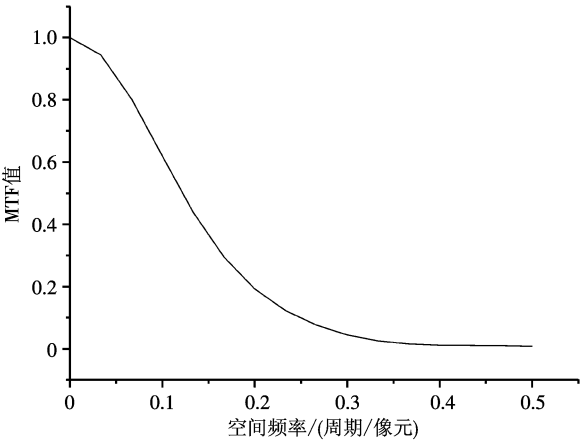


图 4 调制传递函数曲线

Fig 4 The curve of modulation transfer function

4 获取调制传递函数技术的改进

卫星遥感图像形成过程中,受到多种因素的影响,存在各种噪声。采用有效的处理方法,可以在一定程度上克服其影响,提高卫星相机调制传递函数的获取精度,从而满足对卫星相机成像特性分析与卫星遥感图像处理的需求。在对相机调制传递函数在轨检验实验的基础上,对数据处理方法进行了一些研究。

4.1 边扩散函数拟合方式的探讨

若不考虑刃边高低亮度部分的数据点,则刃边廓线分布具有多项式曲线的特点,因此在处理方法上可以采用多项式拟合,这是一种较为方便的处理方式。在遥感中,特别是对一些分辨率较低的相机,要想获得足够多的刃边数据点是困难的。利用多项式进行拟合,不能很好地利用刃边两端亮度均匀的数据点(图 5),显然这不利于充分利用数据源,通过拟合降低图像噪声的影响。因此寻找一种新的拟合方式,充分利用刃边两端的数据点,对于提高获取图像调制传递函数的精度是非常意义的。

通过选择发现,费米函数曲线特征非常类似于刃边扩散分布,用其作为刃边的边扩散拟合函数可以充分利用刃边的数据。费米函数的通常表达式为:

$$f(x) = \frac{a}{\exp((x-b)/c) + 1} \tag{5}$$

由于大多数刃边的上升边或下降边并非关于中点的严格对称,所以直接用此函数不够准确,但用三项费米函数的和可以解决这个问题。

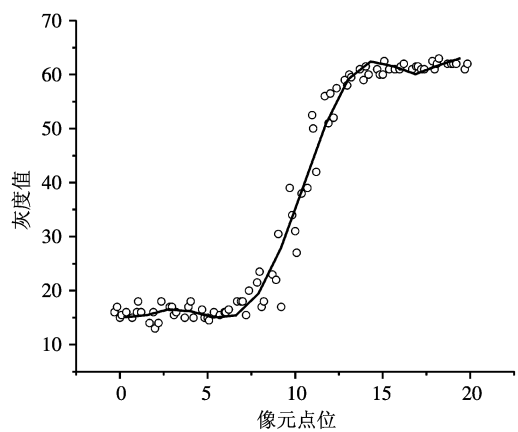


图 5 多项式拟合
Fig 5 Fitting with multinomial function

$$F(x) = D + \sum_{i=0}^2 \frac{a_i}{\exp[(x - b_i)/c_i] + 1} \quad (6)$$

通过拟合可以获得多项式中的待定参数。
图 5 显示, 多项式拟合在平坦的亮边和暗边出现振荡, 故在数据拟合中难以利用到亮边和暗边这两部分的数据; 相反, 图 6 的费米函数拟合却可以很好地利用这部分数据, 提高拟合曲线的精度。

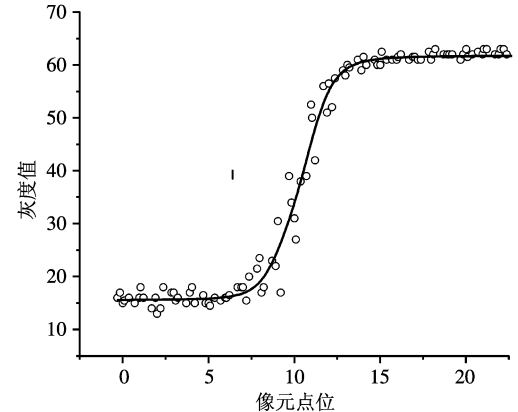


图 6 费米函数拟合
Fig 6 Fitting with Femi function

4 2 增加调制传递函数频谱密度的方法

根据离散傅里叶变换原理, 点扩散函数离散傅里叶变换得到的调制传递函数, 其频谱点以基频的整数倍出现, 而基频值为采样点和采样间隔乘积的倒数。例如对点扩散函数以 d 间隔采样, 得到 N 个采样点, 那么基频为 $\frac{1}{Nd}$ 则由该点扩散函数得到的调制传递函数频谱点为 $\frac{1}{Nd}$ 的倍数, 即依次为 0

$\frac{1}{Nd}, \frac{2}{Nd}, \dots$, 这即是数字处理中的栅栏效应。
在利用 MTF 对卫星相机进行分析或利用 MTF 对图像进行恢复中, 常常需要准确的 MTF 曲线形态, 即需要频谱点较密。从数字信号处理原理角度来看, 由于点扩散函数宽度较窄, 基频值往往相对较大。针对这一情况, 通常的思路是通过增加采样密度的方式增加频谱点。事实上, 由于增加采样密度同时也增加了采样的点数, 即 d 值减小的同时 N 值以同样的速度增加。这一点从频率公式可以看出, 设采样间隔为 x , 可得 N 个样点, 则在 MTF 中出现的频谱点为基频 $\frac{1}{N \cdot x}$ 。如果将采样点加密 n 倍, 采样间隔为原来的 $1/n$ 倍, 采样点数就为 $n \cdot N$ 个, 则基频为 $\frac{1}{n \cdot N \cdot \frac{x}{n}} = \frac{1}{N \cdot x}$ 。基频值仍不变, 因此增加采样点不能达到增加频谱间隔的目的。
研究表明, 可以采用对点扩散函数补零的方式达到增加频谱密度的目的。在数字信号处理的离散傅里叶变换中, 对于原函数 $f(x)$, 其离散傅里叶变换可以表示为:
$$F(y) = \sum_{n=0}^{N-1} f(x) \cdot e^{-j \frac{2\pi}{N} y n}$$

式中, $e^{-j \frac{2\pi}{N} y n}$ 可以看作为核函数, 而 $f(x)$ 可以看作为权函数, 换言之, 傅里叶变换实际上就是把原函数看作权重的核函数加权求和, 权重函数在这里就是点扩散函数。依据傅里叶变换的这样涵义, 若在原权重函数区间基础上进行扩展, 扩展区间上权重函数若为零, 则并不影响 $F(y)$ 的值。由于补零后采样间隔不变, 采样点增加, 于是可以在 $F(y)$ 不变的情况下提高频谱的密度。
图 3 所示的是由实际卫星图像刃边数据获得的点扩散函数, 对该函数以 0.5 为间隔进行采样得到 20 个数据点, 由进行离散傅里叶变换得到的 MTF 曲线空间频率间隔为 0.1 周期/像元 (图 8)。图 7 在图 3 的基础上在点扩散函数两端各补 20 个零, 结果得到如图 8 所示的 MTF 曲线, 其频率间隔为 $1/30$ 周期/像元, 频率密度有了较大的提高。比较图 8 中补零前后 MTF 的频谱分布, 补零后的 MTF 曲线克服了由于数字处理的栅栏效应, 显示了更多的频率值, 提高了 MTF 曲线形态对相机 MTF 的逼近程度, 从而在利用 MTF 对相机性能进行分析或对卫星图像恢复过程中减少了误差。

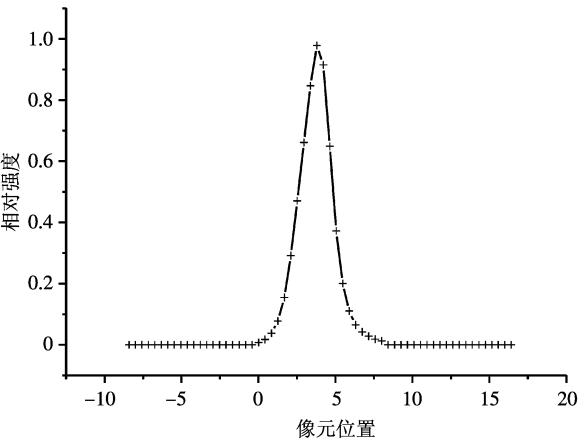


图 7 补零后的点扩散函数曲线

Fig 7 The curve of point spread function Added zero

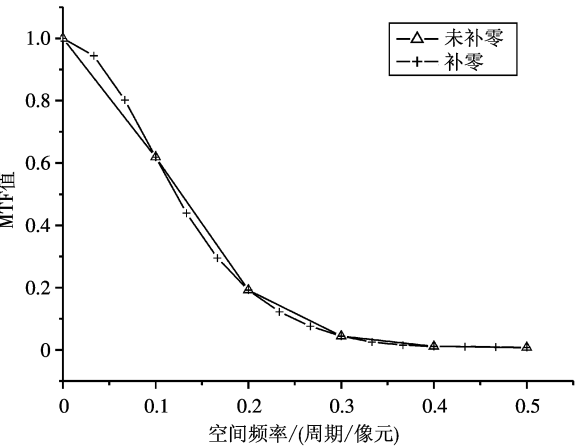


图 8 补零前后 MTF值的分布

Fig 8 Distribution ofMTF with and without added zero

5 结 论

基于卫星光学相机性能评估、卫星图像恢复等

技术对调制传递函数的需求, 针对在轨检测中具有较高精度的刃边法特点, 依据数学和数字信号处理原理提出的数据处理技术, 在本文已经完成的对高分辨率卫星相机和航空相机的检测中显示了明显的效果, 费米函数拟合可以充分利用刃边靶标中的数据点, 从而有效地克服了图像噪声的影响, 点扩散函数补零法可以获得高密度频谱点的调制传递函数曲线, 该曲线对于卫星相机的性能分析、遥感图像恢复等具有至关重要的作用。

参 考 文 献 (References)

[1] Wolfe W L, Zissis G J The Infrared Handbook M]. Office of Naval Research, Department of the Navy, Washington, DC 1978

[2] Makarewicz E, Barolucci L A, Lozano D F, et al Landsat 4 and Landsat 5 Thematic Mapper Data Quality Analysis [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1985, 51(9): 222—236

[3] Gerard B SPOT Image Quality—Twenty Months Experience [J]. INT J Remote Sensing, 1998, 9(9): 1409—1414

[4] McGillm C D, Anuta P E, Makarewicz E, et al Estimation of a Remote Sensing System Point Spread Function from Measured Imagery [A]. Proceedings of Machine Processing of Remotely Sensed Data [C]. Purdue University, Indian, 1983

[5] Schowengerdt R A, Archwanetv C, Wrigley R C Landsat Thematic Mapper Image Derived MTF [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1985, 51(9): 1395—1406

[6] Camahan W H, Zhou G P Fourier Transform Techniques for the Evaluation of the Thematic Mapper Line Spread Function [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1986, 52(5): 639—646

[7] Reichenbach S E, Park S K, Narayanswamy R Characterizing Digital Image Acquisition Devices [J]. Optical Engineering, 1991, 30(2): 170—177