

去除大气邻近效应影响的遥感图像 MTF 计算方法

李海巍^{1,2} 张浩² 陈正超² 原娟³

¹中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083

²中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094

³浙江农林大学环境资源学院, 浙江临安 311300

摘要 考虑到大气对遥感影像成像的模糊作用,在常用刃边法测量调制传递函数(MTF)的基础上,在大气校正中对邻近像元效应进行校正来去除大气 MTF 的影响,在真实的表反射率图像上利用刃边法计算 MTF,结果更加接近实验室测量值,客观反映了传感器的 MTF。此外,通过模拟实验分析了气溶胶光学厚度对在轨测量 MTF 的影响,表明该方法比传统刃边法更加适合在轨测量传感器 MTF,更客观反映了传感器真实成像特性。

关键词 遥感;调制传递函数;刃边法;邻近效应

中图分类号 O4788

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0328002

MTF Computing Method of Remote Sensing Image after Removing the Effects of Atmospheric Adjacency Effect

Li Haiwei^{1,2} Zhang Hao² Chen Zhengchao² Yuan Juan³

¹School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China

²Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

³School of Resource and Environment, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an, Zhejiang 311300, China

Abstract Taking into account the effect of remote sensing images blurred by the atmospheric, the effect of atmospheric modulation transfer function (MTF) is removed by correcting the adjacent effects in atmospheric correction on the basis of traditional knife-edge method, and the MTF is calculated on a real surface reflectance images. The result which objectively reflects the MTF of the sensor is better than conventional methods and is closer to the laboratory measurements. In addition, the effects of the aerosol optical thickness on the MTF measurement through the simulation experiments are analyzed, the experimental results show that the proposed method is more suitable for on-orbit MTF measurement than the traditional knife-edge method, and more objectively reflect the real imaging sensor.

Key words remote sensing; modulation transfer function; the knife-edge method; adjacency effect

OCIS codes 280.1100; 110.4100; 120.0280

1 引言

调制传递函数(MTF)反映了在传感器成像时对不同空间频率信号地扩散和削弱程度,客观地反映了光电成像系统的空间频率响应特性,是目前评价航天相机成像质量和性能的重要指标之一^[1]。MTF在轨测量方法主要为刃边法和脉冲法,其中刃边法具有严格的理论基础、数据处理简单,且能够得到较好的信噪比和评价结果等特点,已成功应用于 SPOT-5/HRS、EO-1/Hyperion^[2]、IKONOS^[3]、QuickBird^[4]、HYDICE^[5]、CBERS-

收稿日期: 2014-09-24; 收到修改稿日期: 2014-11-02

基金项目: 国家 863 计划(2012AA12A301,2013AA12A301)

作者简介: 李海巍(1986-),男,博士研究生,主要从事图像质量评价、辐射传输方面的研究。E-mail: haiwei6583@163.com

导师简介: 张浩(1982-),男,博士,副研究员,主要从事遥感辐射定标与大气校正等遥感预处理和大气辐射传输等方面的研究。E-mail: haozhang@ceode.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

01/-02/CCD^[6]等航天相机在轨 MTF 评价。

刃边法在轨测量 MTF 关键在于从靶标图像中获取准确的边缘响应函数,随后通过图像上刃边扩散和削弱程度来评价成像质量和系统性能。传感器成像前后,在黑白分明的刃边上,原先灰度高的区域会降低一些,原先灰度低的区域会升高一些,因此刃边变得模糊,这种模糊程度的正确表达就是刃边法测量 MTF 的关键所在。成像前后这种变化在频谱上表现为高频信息的损失和低频信息的增加。

通常在轨测量所得 MTF 为系统的总 MTF,一般情况下,由光学系统 MTF、电荷耦合器件(CCD)探元 MTF、推扫 MTF 和大气 MTF 组成。其中大气 MTF 与大气条件有关,随时变化^[7]。

大气是一种不稳定的传播介质,其运动和变化是随机的、无规律的,电磁波在其中传播,会受到大气分子吸收、散射、湍流扰动等影响。大气对图像的影响主要由湍流和气溶胶两部分组成。湍流扰动主要由大气折射率变化引起,导致光波相位和振幅随机起伏,成像焦平面上产生像点强度分布扩散、峰值降低、位置偏移,反映在图像上表现为图像模糊、偏移、光强闪烁,图像质量下降^[8]。气溶胶受人和天气的影响比较大,其微小粒子对光波的散射和吸收作用也会对目标成像产生影响,散射和吸收会使电磁波受到削弱,另外,散射也会造成目标辐射光线扩散,进而导致成像焦平面上影像的模糊^[9]。

大气对传感器成像造成的模糊会随着大气自身状况的变化而变化,此时测量出的 MTF 并没有反映传感器自身成像质量和性能,而是综合反映了成像时刻大气和传感器的整体质量。当大气发生变化时,目标区域影像会有所变化,对于同一刃边测得的 MTF 也会有所不同。所以在轨测量 MTF 时应该考虑去除大气影响,进而反映成像系统真正的质量和性能。另外,在轨测得的 MTF 一般都会和卫星发射前实验室测得的 MTF 作对比,以便了解发射前后传感器性能变化状况和整体工作状态。实验室是采用 MTF 专用测试设备来测量 MTF,主要有直接法和间接法。直接法是直接测量系统对正弦曲线靶或条形靶的响应以得到 MTF,间接法是基于傅里叶变换得到系统 MTF^[6]。两者的测试环境均没有考虑大气对传感器成像的模糊作用。通常 MTF 在轨测量没有考虑去除大气对成像的影响,在实验室测得的 MTF 仅反映了成像系统的质量和性能,而在轨测得的 MTF 反映的是成像时刻系统和大气的综合状况,两者的对比很难准确说明卫星发射前后传感器的性能变化情况。

目前去除大气影响的方法主要是利用经验公式计算大气 MTF,然后从系统总 MTF 中去除大气 MTF。大气 MTF 主要由气溶胶 MTF 和湍流 MTF 组成。湍流 MTF 又分为短曝光和长曝光两种情况,用不同 MTF 函数表示,计算时需要用到成像系统镜头孔径直径和大气折射率结构常数等^[10]。气溶胶 MTF 依赖于大气中所含气溶胶粒子的浓度和大小^[11]。Li 等^[12]利用气溶胶 MTF 模型和湍流 MTF 模型从系统 MTF 中去除了大气 MTF 的影响,将 Nyquist 处的 MTF 提高了 10%,并总结出当气溶胶光学厚度值很大或者湍流作用严重时,整个图像的 MTF 会被降低 50%。

针对在轨测量 MTF 时没有考虑去除大气影响这种情况,本文在研究时采用 Liang 等^[13]利用 SHDOM 辐射传输模型建立的经验方程去除地表邻近效应对刃边测量 MTF 的影响。在总系统 MTF 中去除大气 MTF,保留光学系统 MTF、CCD 探元 MTF、推扫 MTF,使所得 MTF 不受大气模糊作用的影响。用真实的地表状况来计算 MTF,测量结果和实验室测量得到的值更加接近,更能反映传感器成像的真实性能。通过一幅刃边图像,模拟不同气溶胶对 MTF 的影响,得出随着气溶胶光学厚度增大,MTF 逐渐减小的线性变化规律。

2 原 理

2.1 刃边法的线性不变特征

利用刃边法在轨测量 MTF 首先要从刃边图像中准确地获取边缘扩展函数(ESF)。这个环节一般通过亚像元边缘探测和边缘最小二乘直线拟合及边缘差异的平移、配准来完成。随后对边缘扩展函数进行差分,以便获得均匀采样的线扩展函数(LSF),然后对线扩展函数进行截取和归一化处理,并进行离散傅立叶变换,最后根据变换后的直流分量对傅立叶变换谱进行归一化,利用系统原始采样频率对频率轴进行归一化从而得到系统 MTF 曲线。

当两个边缘扩展函数线性相关时,其差分结果也线性相关,对此再进行归一化,就变成了相同的线扩展

函数,因此线性相关的两个边缘扩展函数求得的MTF相同。差分公式可表示为

$$L(n) = E(n) - E(n-1), \quad (1)$$

式中 $L(n)$ 为线扩展函数, $E(n)$ 和 $E(n-1)$ 分别代表任意相邻的边缘扩展函数,用系数 $a, b (a \neq 0, b \neq 0)$ 对其进行线性变换:

$$E'(n) = aE(n) + b, \quad (2)$$

$$E'(n-1) = aE(n-1) + b. \quad (3)$$

则有:

$$L'(n) = E'(n) - E'(n-1) = a[E(n) - E(n-1)], \quad (4)$$

式中 $L'(n)$ 代表运算后的线扩展函数, $E'(n)$ 和 $E'(n-1)$ 代表运算后相邻的边缘扩展函数。在随后进行归一化处理中,系数 a 被约去,所以两者MTF的计算结果相同。

通过研究证明,使用一般的大气校正方法如FLAASH、6S辐射传输模型对图像进行大气校正,其校正前后图像成近似的线性关系,MTF变化不大,也就是说一般的大气校正方法并没有真正去除大气对系统MTF的影响。

2.2 邻近效应对MTF的影响

邻近效应指遥感中非目标像元对目标像元辐射量度的贡献,又称为大气的交叉辐射效应。由于大气多次散射作用使得邻近目标的反射光子对目标地物反射率产生了贡献。邻近效应一般增加了暗像元的辐射值,减少了亮像元的辐射值,从而降低了图像对比度,使图像变得模糊^[4]。Lyapustin等^[15]研究指出,在对卫星分辨率小于1 km的影像进行大气校正时,就应该充分考虑邻近效应的影响。

对于刃边法测量MTF而言,邻近效应会使刃边两侧图像的对比度降低,而且会使刃边变得模糊,这种模糊是由于大气的存在而产生,并非成像系统本身的性质,并会随着大气的不同而发生变化,所以在轨测量MTF时应当先去大气干扰,还原出反映地表的真实遥感影像,再利用成熟的测量方法测得MTF。

现有去除邻近效应的方法很多,主要分为两大类:1)基于辐射传输模型的经验公式;2)点扩展函数校正公式。Liang等在2001年利用SHDOM辐射传输模型建立的用于邻近效应计算的经验方程,正是通过两种高对比度反射率地物来模拟阶跃函数,分析目标像元反射率、气溶胶和背景像元至目标像元距离三者的定量化关系,得出经验方程。由于是对阶跃函数模拟而得出的经验方程,所以非常适合用来进行刃边邻近效应的分析研究。经验模型如下:

$$r_e = \frac{\int g(s)r(s)ds}{\int g(s)ds}, \quad (5)$$

$$g(s) = f_1(\tau)\exp(-1.424s) + f_2(\tau)\exp(-12916s), \quad (6)$$

式中 r_e 为地表有效反射率,即包含目标像元和环境像元的综合反射率。 s 为距离目标像元的距离(单位为km)。

$g(s)$ 为经验权重函数,它与目标像元真实反射率 $r(s)$ 的卷积就是有效反射率。其中,

$$f_1 = 0.003\tau, \quad f_2 = 0.071\tau^3 - 0.061\tau^2 - 0.439\tau + 0.996, \quad (7)$$

式中 τ 为气溶胶光学厚度。

对于(6)式右边,第一项是环境像元的贡献,第二项是目标像元及最接近的相邻像元的贡献。将(5)式离散化可以表示为

$$r_e = \frac{\sum_i^N \sum_j^N r_{ij} g_{ij}}{\sum_i^N \sum_j^N g_{ij}}, \quad (8)$$

$$g_{ij} = \iint_{x_i, y_j} g(\sqrt{x^2 + y^2}) dx dy, \quad (9)$$

式中 g_{ij} 是像素的贡献, N 是对目标像元有贡献区域的大小,其中的所有像元对中间像元值(DN)均有贡献,阈值 α 为

$$\alpha = \frac{\sum_i^N \sum_j^N g_{ij}}{\sum_i^\infty \sum_j^\infty g_{ij}}, \quad (10)$$

式中 r_{ij} 是地表真实反射率^[13]。以上经验公式综合考虑了气溶胶和距离对目标像元的影响,可以看出:如果大气能见度很高,即气溶胶光学厚度很薄的时候,传感器获取信息主要来自目标像元本身,随着气溶胶光学厚度增加,邻近效应影响越来越明显。

邻近效应影响可以看作是地表辐射场和大气点扩展函数的卷积,如果能得到精确的点扩展函数,就可以通过反卷积去除邻近效应的影响^[16]。(6)式就是表示刃边图像与大气关系的点扩展函数,利用(8)式可以求出去除邻近效应后的地表真实反射率。

3 成像 MTF 的计算

实验数据是 SPOT-5 HRG2 传感器的多光谱数据。研究区域位于甘肃省张掖市周边地区,地形以戈壁为主。数据获取日期为 2013 年 6 月 13 号。实验当天在地面同步测量了大气数据。图 1 为不同波段所截取的同一刃边示意图,图中蓝色标记为用来计算 MTF 的区域,大小为 13×7 个像元。图 2 为实验当天 550 nm 处气溶胶光学厚度(AOT)随时间变化和过境时刻 AOT 随波长变化的示意图;图 3 为随时间变化的水汽含量示意图。

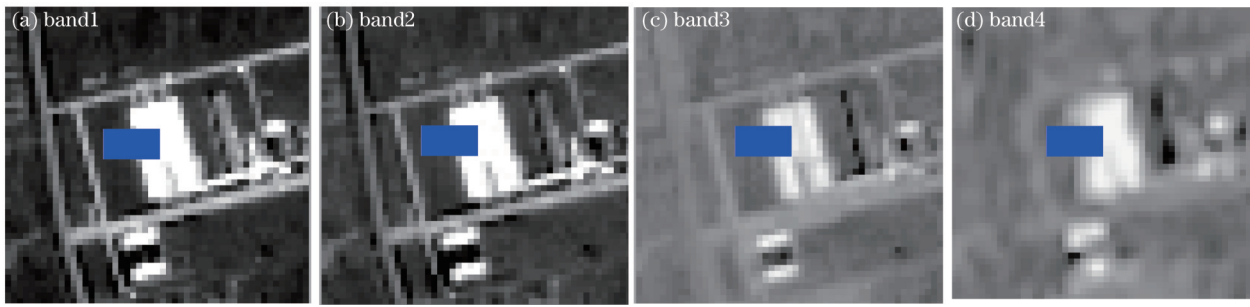


图 1 实验区不同波段截取刃边示意图

Fig.1 Picture of knife-edge cut out from experimental region in different bands

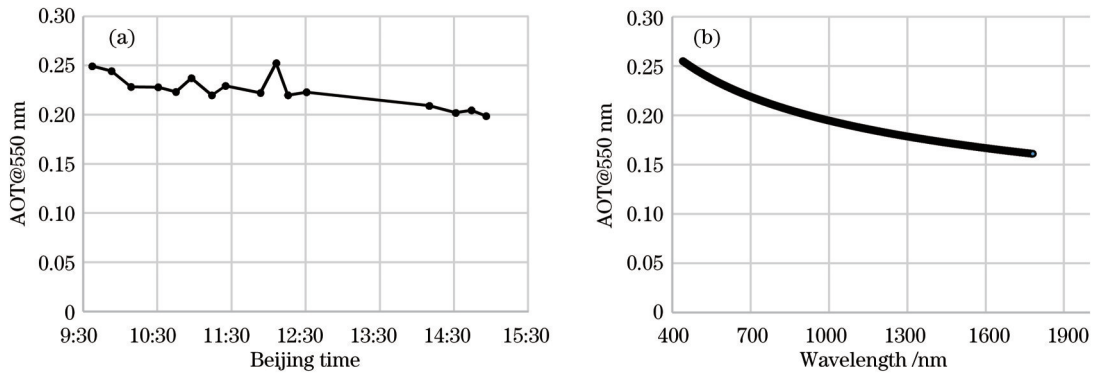


图 2 550 nm 气溶胶光学厚度。(a)随时间变化;(b)随波长变化

Fig.2 AOT of 550 nm. (a) Change over time; (b) change over wavelength

依照(5)式构造卷积算子,如图 4 所示。其中距离 s 的步长要和实际图像分辨率相对应。气溶胶数值采用卫星过境时同步测量值。大气对影像的影响随着波长的变化也会有所不同,所以在对 SPOT5 不同波段的影像处理时使用了相应波段中心波长处的 AOT。

在用(8)式计算地表真实反射率时,选取了经典的维纳滤波复原图像来消除邻近效应。维纳滤波也称为最小均方误差滤波,综合了系统退化函数和噪声统计特性两个方面,目的是使复原后图像与原始图像的均方误差最小^[17]。SPOT5 第一波段所用卷积算子及复原前后刃边梯度图像对比如图 4、5 所示。

实验中用刃边法对 6S 和 FLAASH 两种大气校正方法校正后的影像,以及利用定标系数算得的辐亮度图像的 MTF 进行了计算。计算的主要步骤:1)边缘探测;2)最小二乘直线拟合;3)计算边扩展函数(ESF);4)计

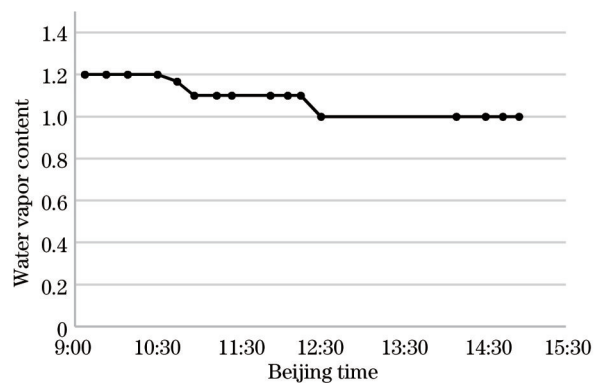


图3 水汽含量随时间变化曲线

Fig.3 Curve of water vapor content changes over time

算线扩展函数(LSF);5)LSF归一化处理;6)计算调制传递函数;7)MTF归一化处理^[18-20]。图6-8分别为不同影像计算过程中第一波段的ESF、LSF和MTF曲线示意图。最终的计算结果如表1所示。

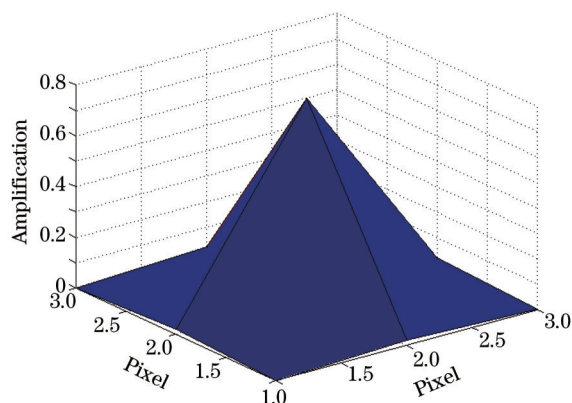


图4 band1 卷积算子

Fig.4 Convolution operator of band1

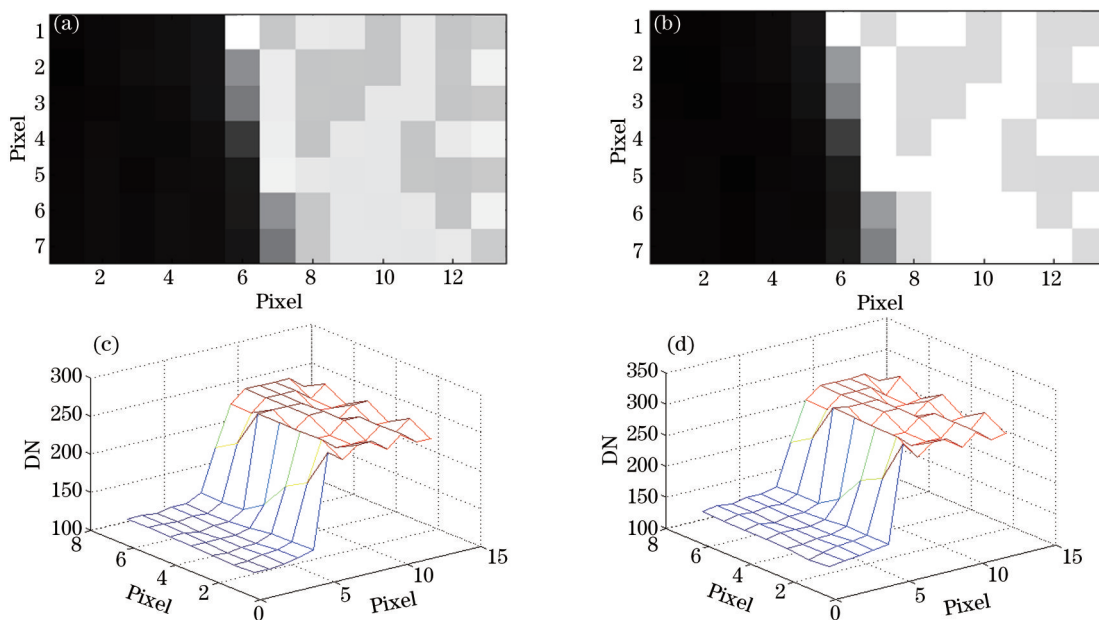


图5 band1灰度梯度图。(a)、(c)复原前;(b)、(d)复原后

Fig.5 Gray intensity gradient image of band1. (a), (c) Before recovery; (b), (d) after recovery

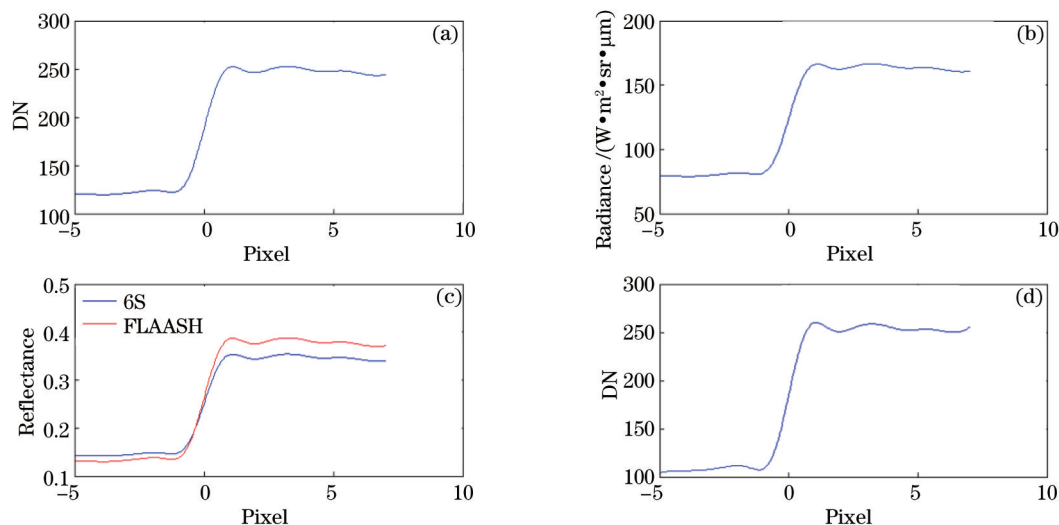


图6 不同方法的ESF示意图(band1)。 (a)原始图像; (b)辐亮度图像; (c) 6S和FLAASH校正后的图像; (d) 图像复原的图像
 Fig.6 Graph of ESF by different methods (band1). (a) Original image; (b) radiance image; (c) image after 6S and FLAASH atmospheric correction; (d) restored image

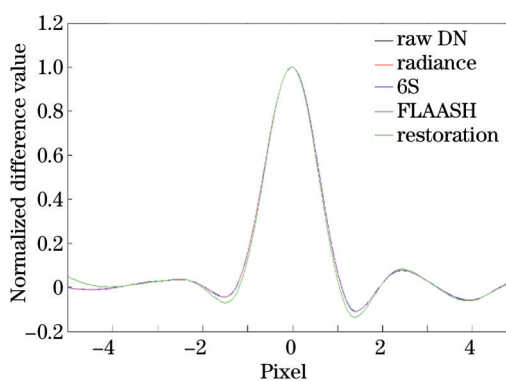


图7 不同方法的LSF示意图

Fig.7 Graph of LSF by different methods

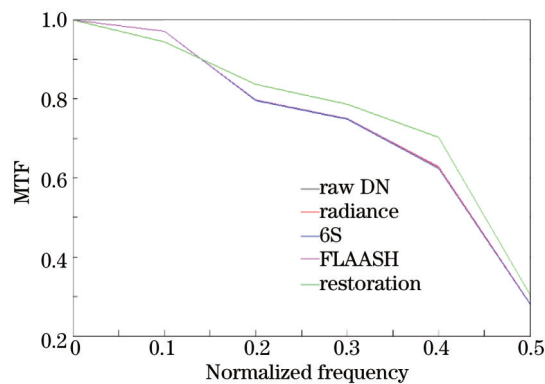


图8 不同方法的MTF示意图

Fig.8 Graph of MTF by different methods

表1 SPOT5 多光谱各波段MTF计算结果

Table 1 MTF values of SPOT5 multispectral in different bands

	Raw image	Radiance	6S correction	FLAASH correction	Restored image	Laboratory measurement
Band1(0.49~0.61 μm)	0.2805	0.2805	0.2793	0.2812	0.3040	0.3000
Band2(0.61~0.68 μm)	0.2099	0.2099	0.2094	0.2103	0.2405	0.3000
Band3(0.78~0.89 μm)	0.1654	0.1654	0.1634	0.1653	0.2062	0.2000
Band4(1.58~1.78 μm)	0.0332	0.0332	0.0331	0.0332	0.0424	0.3000

从表1结果看：

1) 将原始DN值图像利用说明文件中的定标系数转换成辐亮度图像后,计算所得刃边MTF与转换前的MTF相同,验证了前文所述的刃边法测量MTF具有线性不变特征:对原始图像做整体线性变换,同一刃边用刃边法测得MTF的值均不会变化。

2) 校正前后影像的线性关系如图9所示。从散点图的分布情况和对比 R^2 可以看出经过6S和FLAASH大气校正的影像和原始影像成近似的线性关系, R^2 分别为0.9561、0.9301。而经过邻近效应去除的影像和原始影像的线性差异相对前者较大, $R^2=0.8738$ 。

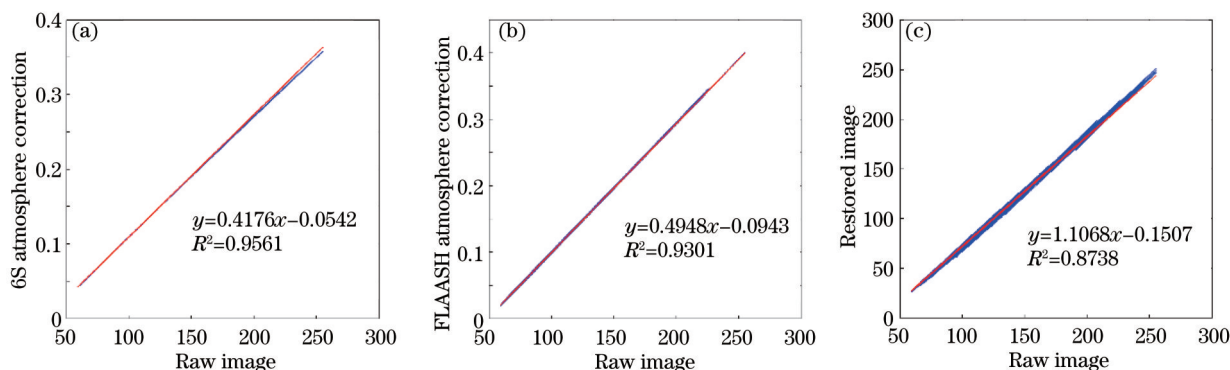


图9 校正前后图像线性关系图。(a)原图与6S;(b)原图与FLAASH;(c)原图与去邻近

Fig.9 Linear relationship diagram before and after correction. (a) Raw and 6S correction image; (b) raw and FLAASH correction image; (c) raw and restored image

实验中用6S辐射传输模型进行大气校正时未考虑邻近像元对刃边的影响,而且对整个图像区域使用的校正参数相同,所以6S大气校正前后的数值近似一种线性变化,用刃边法测得MTF变化不大。FLAASH大气校正模型考虑了邻近效应的影响,但是FLAASH是利用给定像素及其一定范围内像素整体平均值来估算环境平均反射率,其精确程度不足以满足刃边测量MTF的需要,所以校正前后MTF的值变化也很小。

3) 去除邻近效应的图像与原始DN图像计算的MTF相比,明显有所增大,且变化趋势更接近实验室MTF的测量值。其中绿波段、红波段近红外波段的值增加幅度比较大,短波红外波段增幅较小,原因是由于气溶胶光学厚度随着波长增加而减小,大气与地表之间多次散射,邻近效应对于目标像元影响也随着波长的增加而减小,因此随着波长的增长,邻近效应对MTF的影响也逐渐减小。

4) 短波红外波段图像的刃边比较模糊,如图1(d)所示,故计算出的MTF普遍偏小。实验中还选取并计算了其他刃边的MTF,结果相差不大。在短波红外波段,物体热辐射能量远大于太阳的反射能量,且热红外遥感图像的空间分辨率一般低于可见光-近红外遥感影像,因此,混合像元的问题显得相当突出^[21]。从图像上选择的刃边受到这种影响,相比可见光-近红外波段影像,边界扩散程度更大且清晰度更低,因而实验中此波段MTF测得的结果较小。相比而言,短波红外波段经过邻近复原后,MTF的值也有所增加,且更接近实验室测量值。

4 模拟实验

4.1 刃边法线性不变性质地验证

为了验证刃边法线性不变的性质,模拟了一幅反射率由0.05至0.9变化,原始MTF为0.3660,大小为7 pixel×13 pixel的刃边图像。通过对原图DN值进行线性变换,即 $X_{DN'} = aX_{DN} + b$,再用刃边法计算MTF。目的是对比线性变换前后图像MTF是否有变化。图10和图11分别为线性变换的图像求MTF过程中的ESF和LSF示意图。表2为计算得到的MTF。

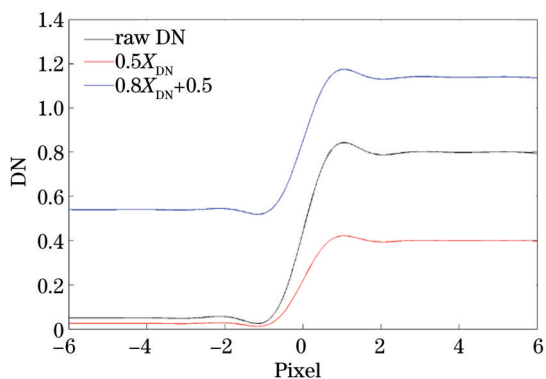


图10 线性变换后边缘扩展函数对比

Fig.10 Comparison of the ESF after linear transform

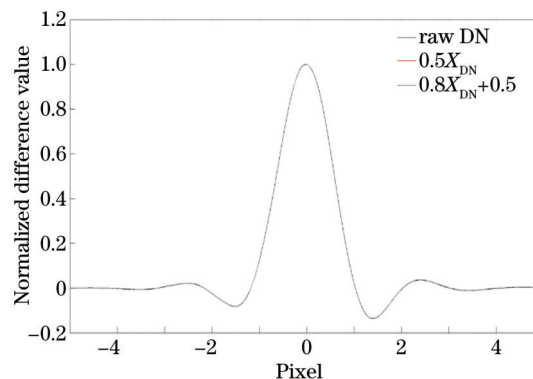


图11 线性变换后线扩展函数对比

Fig.11 Comparison of the LSF after linear transform

表 2 对原图线性变换测得的 MTF

Table 2 MTF of the raw image after linear transform

	Raw X_{DN}	$X_{DN'} = 0.5X_{DN}$	$X_{DN'} = 0.8X_{DN} + 0.5$
MTF	0.3660	0.3660	0.3660

该实验可以证明在对图像进行线性变换时,使用刃边法测量 MTF 得出的结果不会发生变化。

4.2 气溶胶对 MTF 影响的模拟实验

为了验证不同气溶胶光学厚度对 MTF 的影响,实验中用 4.1 节中模拟的图像(MTF 值为 0.3660),通过改变辐射传输方程中 550 nm 处气溶胶光学厚度,利用(7)、(10)式计算不同气溶胶光学厚度下的卷积算子,计算出反卷积复原出的图像,再计算 MTF,过程如图 12~15 所示,实验结果如表 3 所示。

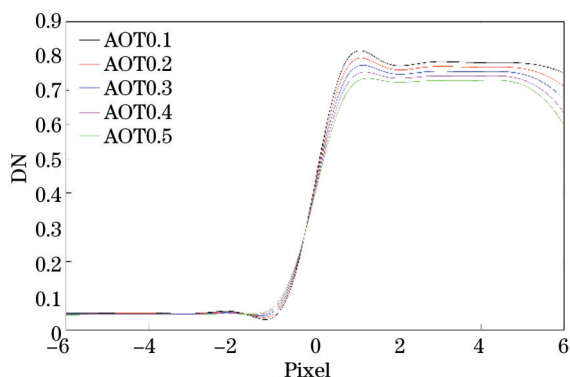


图 12 边缘扩展函数对比

Fig.12 Comparison of the ESF

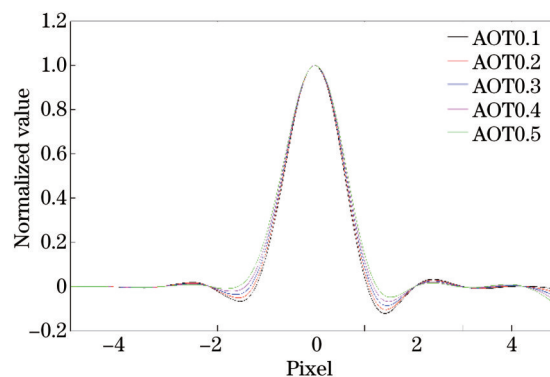


图 13 线扩展函数对比

Fig.13 Comparison of the LSF

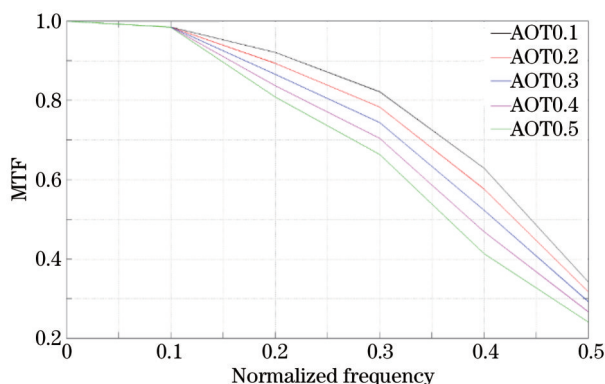


图 14 不同气溶胶下 MTF

Fig.14 MTF under different AOT

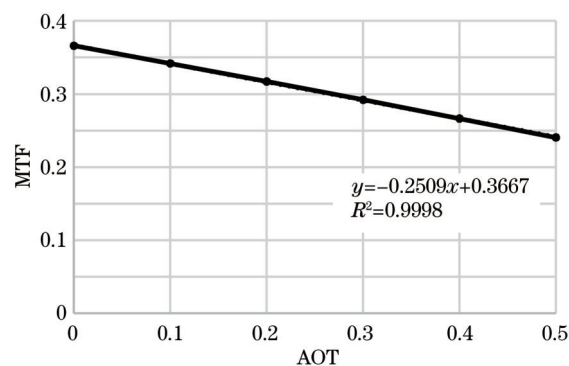


图 15 Nyquist 处 MTF 随气溶胶不同的变化曲线

Fig.15 Nyquist MTF changes over AOT

表 3 气溶胶影响模拟结果

Table 3 Simulation results under the effect of AOT

AOT	AOT 0.1	AOT 0.2	AOT 0.3	AOT0.4	AOT 0.5
MTF	0.3418	0.3172	0.2921	0.2665	0.2406

从结果可以看出,随着气溶胶光学厚度增大,MTF 逐渐减小,下降趋势明显,且呈线性变化,拟合公式中的 0.3667 为 AOT 为 0 时 MTF 的值,由于存在拟合误差,所以和原图设置的 0.3660 有所差异。-0.2509 为气溶胶对 MTF 的影响因子。综上所述,在大气条件不佳的情况下,用刃边法在轨测量 MTF 时应该考虑去除大气影响。

5 结 论

为了更准确的计算 MTF,选用 Liang 的模型来去除邻近效应的影响,进而去除大气对计算 MTF 的影响,求解出传感器本身的 MTF。经过邻近效应去除后计算的 MTF 均有所提高,更加接近实验室的值,也更能体现传感器的特性。并进行了模拟实验,证明刃边法的线性不变性和气溶胶对在轨测量 MTF 的影响确实会影

响 MTF 的精确测量。由于邻近效应的影响相当复杂,其在不同的波段、大气参数、几何参数等条件下会表现出不同的特征。如何在像元级别更加精确地去除邻近效应,以及如何准确测得短波红外波段的 MTF,还需要更加深入的研究。

参 考 文 献

- 1 D Léger, F Viallefont, E Hillairet, *et al.*. In-flight refocusing and MTF assessment of SPOT5 HRG and HRS cameras [C]. International Symposium on Remote sensing. International Society for Optics and Photonics, 2003: 224–231.
- 2 N R Nelson, P S Barry. Measurement of Hyperion MTF from on-orbit scenes[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2001, 7: 2967–2969.
- 3 D Helder, T Choi, M Rangaswamy. In-flight characterization of spatial quality using point spread functions [C]. Proc Int Workshop Radiometric Geometric Calibration—In Post-Launch Calibration Satellite Sensors, 2004. 151–170.
- 4 D Helder, J Choi. On-orbit modulation transfer function (MTF) measurements on QuickBird [C]. Proceedings of the 2003 High Spatial Resolution Commercial Imagery Workshop, 2003.
- 5 R A Schowengerdt, R W Basedow, J E Colwell. Measurement of the HYDICE system MTF from flight imagery [C]. SPIE, 1996, 2821: 127–136.
- 6 K Bensebaa, G J F Banon, L M G Fonseca. On orbit spatial resolution estimation of CBERS-I CCD camera [C]. Multi-Agent Security and Survivability, IEEE, 2004: 576–579.
- 7 Gu Xingfa, Tian Guoliang, Yu Tao, *et al.*. Radiometric Calibration Theory and Method of Space Optical Sensors [M]. Beijing: Science Press, 2013.
顾行发, 田国良, 余涛, 等. 航天光学遥感器辐射定标原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- 8 Shi Xiuying. A Restoration Algorithm for Turbulence-Degraded Images Based on Estimation of PSF [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2012.
石秀英. 基于估计点扩散函数的湍流图像复原算法研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- 9 Wang Zhenguo. Research on Atmospheric Blur Removing Algorithms of Remote Sensing Images [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2010.
王振国. 遥感影像中大气模糊消除恢复算法研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010.
- 10 K Krapels, N S Kopeika, C E Halford, *et al.*. Atmospheric turbulence modulation transfer function for infrared target acquisition modeling [J]. Opt Eng, 2001, 40(9): 1906–13.
- 11 Wang Zhenguo, Geng Zexun, Zhao Zhenlei, *et al.*. Restoration of remote-sensing images based on meteorologic data[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(3): 110–114.
王振国, 耿则勋, 赵振磊, 等. 气象数据估计大气 MTF 的遥感影像恢复[J]. 光电工程, 2009, 36(3): 110–114.
- 12 X Li, X Gu, Q Fu, *et al.*. Removing atmospheric MTF and establishing an MTF compensation filter for the HJ-1A CCD camera [J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(4): 1413–1427.
- 13 S Liang, H Fang, M Chen. Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery. I. Methods [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2001, 39(11): 2490–2498.
- 14 Wen Xingping, Hu Guangdao, Yang Xiaofeng. Simulation experiments on adjacency effect of satellite remote sensing pixels [J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2009, 28(1): 46.
温兴平, 胡光道, 杨晓峰. 卫星遥感像元邻近效应的模拟试验[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(1): 46.
- 15 A Lyapustin, Y Kaufman. Role of adjacency effect in the remote sensing of aerosol [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984 - 2012), 2001, 106(D11): 11909–11916.
- 16 Wang Qian, Chen Xue, Ma Jianwen, *et al.*. A comparative study of two remote sensing image adjacency effect correction algorithms based on SHDOM empirical equation and synchronized measured spectral data [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3342–3348.
王倩, 陈雪, 马建文, 等. 基于 SHDOM 经验方程和基于同步实测光谱数据的遥感影像邻近效应校正算法对比研究[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3342–3348.
- 17 Lou Shuai. Study of Image Deconvolution Theory in Multiscale Transform-Domain [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
娄帅. 多尺度变换域图像反卷积理论研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

- 18 Li Lin, Yao Suying, Xu Jiangtao, *et al.*. Research on modulation transfer function model of TDI-CMOS image sensor with oversample-superposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0228002.
李 林, 姚素英, 徐江涛, 等. TDI-CMOS 图像传感器多次采样叠加调制传输函数模型研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0228002.
- 19 Li Tiecheng, Tao Xiaoping, Feng Huajun, *et al.*. Modulation transfer function calculation and image restoration based on slanted-edge method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2891-2897.
李铁成, 陶小平, 冯华君, 等. 基于倾斜刃边法的调制传递函数计算及图像复原[J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 2891-2897.
- 20 Xie Dingjie, Li Tiecheng, Feng Huajun, *et al.*. Image restoration of cassegrain optical remote sensing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0611004.
谢丁杰, 李铁成, 冯华君, 等. 卡塞格林光学遥感系统的图像复原[J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 0611004.
- 21 Zhao Yingshi. *Theory and Method of Remote Sensing Application Analysis* [M]. Beijing: Science Press, 2003.
赵英时. *遥感应用分析原理与方法* [M]. 北京: 科学出版社, 2003.

栏目编辑: 苏 岑