

机载成像光谱图象边缘辐射畸变校正

郭小方 王润生

(国土资源部航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要 由于受大气效应、地物反射非朗伯特特性、仪器-太阳-目标相对几何关系以及仪器系统本身特性等多种因素的影响, 机载成像光谱数据中不可避免地将引入系统或非系统的辐射畸变, 严重地影响了数据表达信息的可靠性和有效性. 目前虽然已有一些机载遥感扫描图象辐射畸变校正方法, 但由于受各种应用条件的限制, 所发展的这些方法普遍缺乏实用性和通用性. 该文在对机载成像光谱图象边缘辐射畸变形成机制进行理论分析和探讨的基础上, 针对机载成像光谱图象边缘辐射畸变的特征, 提出了一种基于图象本身辐射特征的、实用有效的机载成像光谱图象边缘辐射畸变校正方法.

关键词 成像光谱 辐射校正

中图分类号: TP751 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)01-0016-05

Radiometric Correction of Airborne Imaging Spectrometer Data

GUO Xiao-fang, WANG Run-sheng

(Center for Remote Sensing in Geology, Beijing 100083)

Abstract Quality and interpretability of airborne imaging spectrometer data generally are degraded by radiometric distortions which are related to the larger viewing field of remote sensor. During the period of data acquisition, some parameters, such as path radiance, atmospheric attenuation and the sun-object-sensor geometry, continuously change with viewing angle, which causes a severe radiometric distortion on airborne imaging spectrometer data in scanning direction. Additionally, non-Lambert reflection of ground objects and relief of terrain strongly complicate the radiometric distortion. It is impossible to do data processing and quantitative analysis if radiometric distortions of data are not corrected properly. In this paper, a new method based on image itself is developed to correct edge radiometric distortion of airborne imaging spectrometer data. Experimental results presented in the paper illustrate that the proposed method is more practical, effective and efficient for radiometric restoration of airborne imaging spectrometer data.

Keywords Imaging spectrometer, Radiometric correction

0 引言

由于受大气效应、地物反射非朗伯特特性、仪器-太阳-目标相对几何关系以及仪器系统本身特性等多种因素的影响, 机载成像光谱数据中不可避免地将引入系统或非系统的辐射畸变, 严重地影响了数据表达信息的可靠性和有效性.

机载成像光谱图象的边缘辐射畸变与仪器大视

场角有关, 主要由大气效应、地物反射非朗伯特特性、仪器-太阳-目标相对几何关系等因素综合作用所引起, 视觉上表现为图象存在明显的沿扫描方向的辐射亮度不均, 使得无法直接利用机载成像光谱数据进行基于地物光谱特征的地物定量或半定量分析和识别.

现实中的地物表面既非完全光滑, 亦非完全粗糙, 其对入射辐射能量的反射机制非常复杂, 一般称之为有向反射或双向反射. 地物的有向反射特性不

仅取决于其组成物质材料的光谱特性,而且也取决于其表面的空间结构分布特征^[1].假设观测表面结构不具有明显的方向性,有向反射率呈主轴为入射方向的椭球面分布,则观测方向与主反射方向的夹角越大,探测器探测到的表面有向反射率值越小.定义扫描成像时观测方向与主反射方向夹角最小时为沿扫描方向有向反射率的“热点”,任何角度的偏移都将导致有向反射率值的减小.如果“热点”在探测器视场之外,则图象显示出沿扫描方向由低到高的亮度渐变趋势;如“热点”在视场之内,则图象显示出沿扫描方向亮度呈从“热点”向两边递减的趋势.

仪器观测角发生变化时,地面象元至探测器的辐射传输路径长度随之发生相应的变化.从图象中心至边缘,大气辐射传输路径长度由最小变为最大.由于大气对辐射能量的吸收、散射及自辐射等作用的影响,大气传输路径长度的变化导致仪器接收到的处于不同位置的象元辐射能量具有一定的差异,而这种差异并不是象元本身特性的反映.另一方面,由于路径大气柱的散射和自辐射作用,一部分辐射能量直接进入了仪器的瞬时视场,从而增加了仪器接收到的辐射能量强度.由于波长小于 $3\mu\text{m}$ 时,大气自辐射可以忽略,因此大气散射是主要的考虑因素.但是大气的散射并非各向同性的,通常前向散射系数大于后向散射系数,从而直接进入仪器瞬时视场的大气散射的能量也是不均匀的.

长期以来,人们一直为机载遥感扫描图象复杂而严重的辐射畸变所困扰,也发展了一些机载遥感扫描图象辐射畸变校正方法.例如,通过建立特定地区、特定条件下的大气传输模型来计算大气透射比和路径辐射率以对图象辐射畸变实施校正(需提供地区先验大气数据);利用多高度、多角度飞行采集数据,从图象中提取参数计算大气透射比和路径辐射率的图象辐射畸变校正方法(费用太大);利用具有伪不变特征的地物,结合地面同步或准同步光谱测量建立空地相关的辐射畸变校正方法(地面工作负担太重);基于统计理论的相对机下点的辐射度归一化校正方法(定量化程度太低)等等^[2-5].但是,由于受各种应用条件的限制,所发展的这些方法普遍缺乏实用性和通用性.

本文在对机载成像光谱图象边缘辐射畸变形成机制进行理论分析的基础上,针对机载成像光谱图象边缘辐射畸变的特征,提出了基于图象本身辐射特征的、实用有效的机载成像光谱图象边缘辐射畸

变校正方法.

1 边缘辐射畸变校正方法的理论依据

由于现实中无法确切地知道每个地面象元的组成物质材料和几何结构分布特征,无法有效地描述和表达地物的有向反射特征,因此暂不考虑地物有向反射特性对图象边缘辐射畸变的影响,即假设地面象元为具有漫反射特征的朗伯体.

大气衰减系数主要反映的是大气柱对辐射信号的散射和吸收作用,表示通过单位距离后,大气对辐射信号的衰减比例,以 $K(\lambda, h)$ 表示大气衰减系数,其定义为^[6]

$$K(\lambda, h) = - \frac{dE(\lambda)}{E(\lambda) - dh} \quad (1)$$

由于机载成像光谱数据采集时一般在晴朗碧空的天气条件下进行,能见度大于 10 公里,作业时间一般都在中午前后 2 小时左右,飞行航高一般均为几千米.因此,在此数据采集环境条件下,可以假设大气在水平方向上分布均匀,即在数据采集区域内可以假设大气衰减系数仅与大气的垂直分布特性和波长无关,与象元在区域内所处位置无关.

根据朗伯-布格透射定律^[6],设图象中任一象元 i 的地面地物辐射强度为 $E_0(\lambda)$,则经过大气衰减后探测器探测到第 i 个象元的辐射强度 $E_i(\lambda)$ 可以表示为

$$E_i(\lambda) = E_0(\lambda) e^{-\int_0^H K(\lambda, h) \sec\theta_i dh} \quad (2)$$

其中 H 为航高, θ 为第 i 个象元对应的仪器观测角.由于 $\int_0^H \sec\theta dh$ 表示第 i 个象元的辐射传输路径长度,定义 ΔH_i 为第 i 个象元与同一扫描行机下点象元辐射传输路径长度差,则有

$$E_i(\lambda) = E_0(\lambda) e^{-K(\lambda)(H + \Delta H_i)} \quad (3)$$

其中 $K(\lambda)$ 为航高范围内平均大气衰减系数(以下简称为大气衰减系数),它仅为波长的函数.由于探测器接收到的经大气衰减之后的机下点象元辐射强度可以表示为 $E_{机} = E_0(\lambda) e^{-K(\lambda)H}$,则探测器接收到的第 i 个象元的辐射强度与机下点象元辐射强度之间的关系可以表示为

$$E_i(\lambda) = E_{机} e^{-K(\lambda)\Delta H_i} \quad (4)$$

令 $\alpha(\lambda) = e^{-K(\lambda)\Delta H_i}$, $\alpha(\lambda)$ 即为第 i 个象元相对机下点象元的辐射强度修正系数.

显然对于两个不同的波段,处于相同位置的象

元辐射强度相对机下点象元辐射强度的修正系数之间存在如下关系:

$$\frac{\ln\alpha(\lambda_1)}{\ln\alpha(\lambda_2)} = \frac{K(\lambda_1)}{K(\lambda_2)} = C(\text{常数}) \quad (5)$$

(5)式所表达的意义是:如知道某一波段任意象元*i*的辐射强度相对同一扫描行机下点象元*i*的辐射强度的修正系数,则可以通过两个波段的大气衰减系数之比,求得另一波段处于同一位置的象元辐射强度相对同一扫描行机下点象元辐射强度的修正系数。

2 边缘辐射畸变的校正方法

从对上述理论的分析可知,实现机载成像光谱图象以机下点为基准的边缘辐射畸变校正的关键在于确定每个波段与基准参考波段间的大气衰减系数比和每条扫描线的机下点象元位置。

(1) 大气衰减系数比的估算

现实中的大气状态随地区、季节、时间和环境等因素的变化极大,无论何种理论大气模型都无法描述具体工作区的实际大气状态特征。由理论大气模型计算的大气衰减系数与大气的实际状况相差太远。为此,提出了基于统计理论,从图象数据本身估算大气衰减系数比的方法。

假设地物水平分布均匀,地形平坦。根据统计理论,如进行无限统计时,图象列均值曲线应趋近为一条直线。当由于大气衰减作用使得图象存在边缘辐射畸变时,图象列均值曲线则为一条反映图象边缘辐射畸变特征的曲线,这也是常用的基于统计理论校正机载扫描图象边缘辐射畸变的理论依据。因此,可以利用图象列均值曲线反映的图象边缘辐射畸变规律,视其最大值对应的象元位置为机下点来近似估计大气衰减系数比。

理论上列均值曲线上的任一点与其最大值的修正系数都可用来求取大气衰减系数比,但是由于实际的图象列均值统计毕竟是有限的,在不同象点估算的大气衰减系数比会有一些的差异,因此实际应用中可以取其均值作为整幅图象的大气衰减系数比估计值。

由(5)式可知,大气衰减系数比亦可表达为

$$\frac{\ln E_{\text{机}}(\lambda_1) - \ln E_i(\lambda_1)}{\ln E_{\text{机}}(\lambda_2) - \ln E_i(\lambda_2)} = \frac{K_1(\lambda_1)}{K_2(\lambda_2)} = C(\text{常数}) \quad (6)$$

(6)式表达的是一线性方程,通过直线的最小二

乘法线性拟合可以估算出作为直线斜率的大气衰减系数比。

(2) 机下点象元位置的确定

理想的情况是飞机配备有能在数据采集时同步记录飞行姿态参数的设备,如惯性导航系统等,则可以通过利用这些设备提供的扫描瞬时飞机侧滚角计算出每条扫描线的机下点象元位置。但是,目前国内只有各别遥感用飞机配置有该类设备,因而无法直接计算每条扫描线的机下点位置。为此,采用了一种基于图象本身特征来确定每条扫描线机下点位置的方法。

1.9 μm 附近的光谱区域是大气对辐射能量的强吸收谱带。由于大气对辐射能量的强烈吸收作用,成像光谱波段中心波长位于1.9 μm 附近的图象中几乎没有地物信号的直接反映,图象所反映的基本为大气辐射效应特征,尤其由于大气辐射传输路径差异引起的图象边缘辐射畸变效应在图象中表现极为明显。显然由于机下点象元辐射传输路径最短,在图象中应表现为具有最大值。因此,可以通过确定每条扫描线最大值象元位置来确定每条扫描线的机下点位置。

(3) 基于小波变换的边缘辐射畸变校正

由于成像光谱图象信噪比较低,图象中往往含有各种系统或非系统因素产生的随机噪声或奇异值点。这种噪声或奇异值点的存在不仅会影响机下点象元位置的确定,而且对于依据辐射修正系数进行的象元辐射值的恢复也会产生较大的影响。为此,整个图象边缘辐射畸变的校正处理应在消除各种噪声或奇异值干扰的基础上进行。

小波变换的特点在于可将信号分解为不同尺度的小波信号和原始信号的低频模拟。由于图象的边缘辐射畸变特征主要表现为沿扫描方向的低频变化,因此可采用交互分析的方法,选择最佳尺度对待校正的原始图象进行小波分解,以使图象中含有边缘辐射畸变特征的低频信号与图象的高频信号(含噪声或奇异值)进行有效的分离。边缘辐射畸变的校正处理只针对原始图象的低频模拟图象,这样可以消除各种噪声或奇异值点对边缘辐射畸变校正处理的影响。

最后将经过上述边缘辐射畸变校正方法处理后的低频模拟图象与分离出的各尺度小波信号进行小波反变换处理,即恢复了经过边缘辐射畸变校正处理的完整图象。

3 校正试验结果分析

为了检验本文提出的机载成像光谱图象边缘辐射畸变校正方法的可行性和有效性, 利用原地矿部航空物探遥感中心于 1997 年 5 月在河北张家口地区利用上海技术物理所研制的 64 通道成像光谱仪获取的成像光谱图象进行了图象边缘辐射畸变校正处理方法试验. 试验中以第 47 波段 ($1.924\mu\text{m} \sim 1.945\mu\text{m}$) 作为基准参考波段. 第 47 波段位于大气强烈的辐射能量吸收谱带. 图象中基本不含地物信号, 反映的只是大气本身的辐射效应特征.

试验中提取了基准参考波段和各待校正波段图象在不同尺度下小波变换的低频模拟图象, 通过交互分析选定尺度为 2^3 的低频模拟图象作为边缘辐

射畸变校正处理用图象. 利用基准参考波段图象确定了图象中每条扫描线的机下点位置, 并提取了基准参考波段图象每个象元基于机下点的辐射修正系数, 采用最小二乘线性拟合方法求取各待校正波段与基准参考波段的大气衰减系数比, 按照前述的图象边缘辐射畸变校正数据处理方法和工作步骤, 完成了对试验图象的边缘辐射畸变校正.

图 1 和图 2 分别是第 42 波段边缘辐射畸变校正前后图象. 从校正前后图象的目视效果分析来看, 校正前图象存在明显的中间亮、两边暗的视觉效果, 而且沿扫描方向其辐射亮度极不均衡, 这是由于图象边缘辐射畸变引起的, 尤其图象右侧地物信息受到明显的压抑. 校正后图象整体辐射亮度均匀, 受边缘辐射畸变影响而受到压抑的地物信息得到了较好的展示, 反映了明显的边缘辐射畸变消除效果.

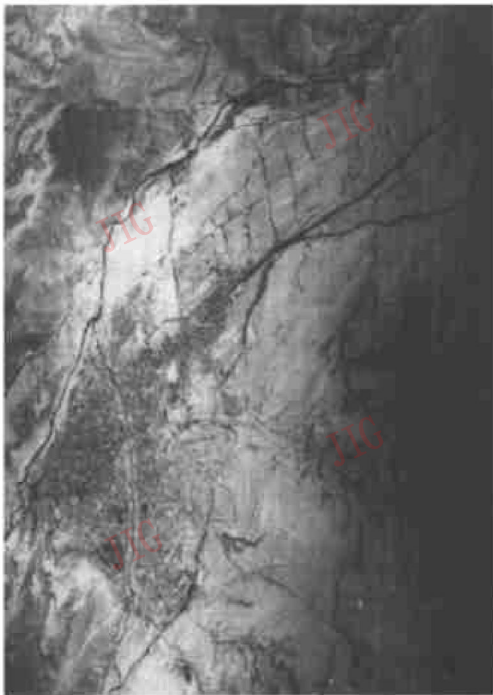


图 1 波段 42 原始图象

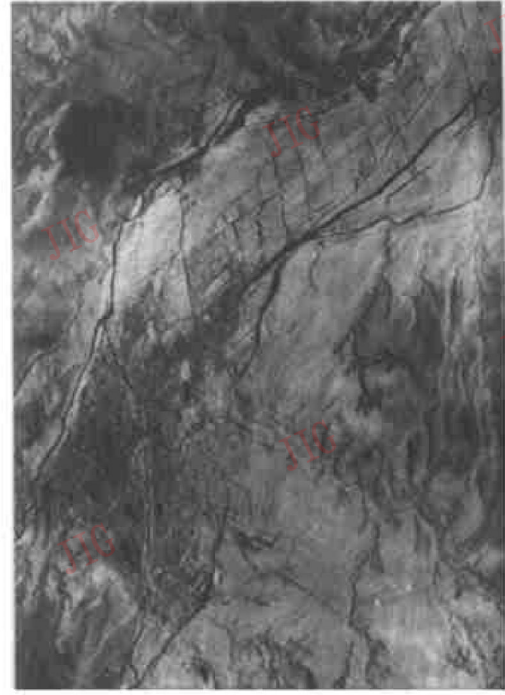


图 2 波段 42 校正图象

为了定量评价边缘辐射畸变校正效果, 从试验区第 42 波段图象中选取了 3 个子区图象进行均值和均方差统计分析. 辐射畸变校正效果分析应选择均匀的同种地物或布置的标靶进行, 但此次成像光谱数据采集过程中未设置标靶, 在试验区较均匀分布的地物为当时未播种的大片农用地, 因此本次试验以农用地作为参照地物进行评价. 3 个子区图象为沿扫描方向分布的农用地, 图象大小均为 10×10 个象元. 子区 A 位于机下点附近, 子区 C 位于图象右侧, 子区 B 位于 A、C 两子区之间, 各子区图象均值和均方差统计结果见表 1.

表 1 子区图象均值和均方差统计结果

	子区 A		子区 B		子区 C	
	均值	均方差	均值	均方差	均值	均方差
原始图象	1 537.85	27.61	1 289.58	24.99	1 122.05	28.98
校正图象	1 626.54	25.55	1 643.83	24.51	1 648.89	25.46

从以上统计分析结果可以看出, 原始图象 3 个子区图象的均值相差悬殊, 从 A \rightarrow B \rightarrow C 依次由大变小, 最大差值达 415.8, 反映了由于图象边缘辐射畸变的影响, 无法正确地表征处于不同位置的同种地物的辐射特征. 校正后图象的 3 个子区图象的均值

基本一致,正确地反映了3个子区具有相近的辐射特征.校正前后3个子区的均方差均未发生明显的变化,表明经过边缘辐射畸变校正后,良好地保留了地物原有的辐射特征的动态变化.

4 结束语

由于现实中诸多条件的限制,机载成像光谱数据的辐射恢复处理一直是遥感研究人员深感棘手的问题.本文在理论上对机载成像光谱图象边缘辐射畸变的形成机理进行了较详细的分析和探讨,并根据朗伯-布格大气透射定律和图象边缘辐射畸变特征,建立了基于图象本身辐射特征的相对扫描机下点的机载成像光谱图象边缘辐射畸变校正方法和模型,该方法实现了机载成像光谱图象边缘辐射畸变的逐扫描行、逐象元的定量校正.图象处理试验结果表明,本文提出的机载成像光谱图象边缘辐射畸变校正方法实用

性强、校正精度高,完全能满足实际应用的需要.

参考文献

- 1 李小文等.地物二向性反射几何光学模型和观测的进展.国土资源遥感,1991,(1):9~19.
- 2 田庆久,董卫东.基于地面定标技术的地物光谱反演方法研究.遥感技术与应用,1997,12(2):1~7.
- 3 Ahern F J. Radiometric correction of visible and infrared remote sensing data at the Canada for remote sensing. Int Journal Remote Sensing, 1987, 8(9): 1349~1376.
- 4 Schott J R. Radiometric scene normalization using pseudo-invariant features. Remote Sensing of Environment, 1988, 26(1): 1~16.
- 5 Johan Lavreau. Correction airborne radiometric data for water/vegetation screening using Landsat thematic mapper imagery. In: The Eighth Thematic Conference of Geologic Remote Sensing, Denver, Colorado, 1991, 439~446.
- 6 汤定元等译.遥感手册—第一分册.北京:国防工业出版社,1979.



郭小方 1963年生,1984年浙江大学遥感专业学士学位,1998年获北京大学地图学与遥感专业博士学位,现为国土资源部航空物探遥感中心高级工程师.长期从事地物光谱特征分析、遥感图象处理、信息提取及模式识别方法技术研究.已发表10余篇论文.



王润生 国土资源部航空物探遥感中心教授级高工,中国地质大学博士生导师.主要研究领域为遥感数学图象分析和应用模型,近年来从事高光谱技术及应用、分析和海洋遥感技术研究.著有《地质勘查分析和综合》,已发表论文40余篇.