

文章编号:1001-9014(2006)04-0316-05

PHI 高光谱图像的大气校正算法

李庆利^{1,2}, 薛永祺², 王建宇², 白智全³

- (1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200030;
2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
3. Graduate School of Information Technology and Telecommunications, Inha University, Korea)

摘要:从高光谱遥感图像中提取较为精确的定量信息,大气校正是必不可少的步骤.本文在应用大气辐射传输模型对高光谱遥感数据进行大气模拟的基础上,研究并发展基于遥感影像信息的经济、有效的大气辐射校正和反射率反演算法.该算法可以根据遥感图像有效地估计大气中气溶胶的空间分布,并分析交叉辐射的影响,进而对其进行大气辐射校正和反射率反演.通过对几景 PHI 高光谱遥感图像的校正试验,表明了这种算法的有效性.

关键词:大气校正;高光谱;反射率;PHI 光谱成像仪

中图分类号:TP7 **文献标识码:**A

ATMOSPHERIC CORRECTION OF PHI HYPERSPETRAL IMAGERY

LI Qing-Li^{1,2}, XUE Yong-Qi², WANG Jian-Yu², BAI Zhi-Quan³

- (1. Dept. of Automation, Shanghai JiaoTong Univ., Shanghai 200030, China;
2. Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. Graduate School of Information Technology and Telecommunications, Inha University, Korea)

Abstract:To extract quantitative information from the hyperspectral imagery accurately, atmospheric correction is a necessary step. Based on the atmospheric simulation by using atmospheric radiance transfer model to analyze the hyperspectral remote sensing data, the economic and efficient algorithm of the atmospheric correction and surface reflectance retrieval was studied. This algorithm can effectively estimate the spatial distribution of atmospheric aerosols and analyze the adjacent effects according to the remote sensing image. Case study of PHI images demonstrates that the algorithm is very effective to remove heterogeneous atmospheric effects and recover surface reflectance.

Key words:atmospheric correction; hyperspectral; reflectance; pushbroom hyperspectral imager

引言

成像光谱技术是20世纪80年代初在遥感界发展起来的新兴研究领域,是当前乃至下一世纪初的遥感前沿技术.高光谱遥感光谱分辨率在可见光区高达纳米数量级,往往具有波段多的特点,在可见到近红外光谱区光谱通道多达数十至数百.高光谱成像系统的传感器接收到的地面辐射,既包括了地面反射光谱信息,也记录了大气辐射传输效应引起的地面反射辐照度的变化信息.影像上灰度值的大小与地形、太阳光入射角、天空光散射、传感器观测角等有关.剔除这些干扰因素,将遥感影像原始 DN 值

数据转换为反射率,这对于正确利用遥感数据进行定量分析、信息提取、遥感应用十分关键.目前光谱反演模型大体可分为3类^[1]:利用图像本身来做反射率反演、借助地面特殊地物的已知光谱反射率来反演地物反射率以及利用辐射传输方程进行大气辐射传输校正.

利用图像本身来做反射率反演是仅从图像数据本身出发进行反射率反演,不需要其它辅助数据,典型的方法有:内部平均法、平场域法、对数残差法、包络线消除法等^[2].这些方法可以消除大气效应,可以反映光谱的吸收特征,而且不需要大气参数以及野外同步实地测量数据,因此被众多的研究者所使

收稿日期:2005-06-28,修回日期:2006-02-16

基金项目:国家863高技术计划(2001AA131090)资助项目

作者简介:李庆利(1977-),男,山东平邑人,博士研究生,主要研究方向为高光谱图像的处理和应用.

Received date: 2005-06-28, revised date: 2006-02-16

用.但这几种方法得到的数据本身不是反射率,而是可以称之为相对反射率的量.它们在相对分析时有一定的用途,但在绝对分析例如通过与标准光谱比较进行物质识别时其缺点就比较明显.借助地面特殊地物的已知光谱反射率来反演地物反射率的方法可以归结为经验线性法和混合光谱方法^[3],这2种方法都需要已知几种地面物质的反射光谱.这种方法简单,运算量小.反演精度取决于定标点的选择,通常地面测点越多精度越高,其缺点是需要野外实地光谱数据.大气辐射传输校正^[5-8]考虑光子与大气相互作用机理,物理意义明确,有较高的反演精度,其主要校正方法有辐射传输模型法、参考地物法、暗目标法、直方图匹配法和反差减少法等^[5,6].大气校正主要包括2个步骤:大气参数估计和表面反射率反演,如果获得了大气属性参数,进行大气校正就变得相对容易.但是获得准确的大气属性参数通常比较困难,而从遥感图像本身估计这些大气属性参数是一种比较可行的方法.本文旨在找出一种应用于 PHI 高光谱遥感图像的大气校正算法,从而直接从图像本身估计出大气属性参数并进行反射率的反演.

Pushbroom Hyperspectral Imager (PHI) 高光谱成像系统^[1,4]是由中国科学院上海技术物理研究所研制的一种推帚成像系统. PHI 系统设计独特,完全实现了温度控制、积分时间和扫描率可调.它采用低读出噪声、高速帧转移面阵 CCD,该系统工作在可见、近红外波段,在植被生长状态、湿地生态环境调查,地物精细光谱分析,环境监测和城市规划等方面已经发挥了和正在发挥着重要的作用. PHI 成像仪经过了严格而标准的光谱定标和辐射定标,为后续的遥感定量化研究提供了准确而又科学的依据.结合 PHI 成像仪的这些特点,将本文介绍的大气辐射校正方法应用于 PHI 高光谱遥感图像的校正,取得了良好的效果.

1 大气辐射传输模型

大气校正利用辐射传输模型计算出气体分子、水蒸汽、气溶胶等大气成分的吸收与散射的影响进而恢复地物原来的光谱性质的过程^[6].大气校正一般包括2个步骤:大气参数的估计和表面反射率的反演.根据辐射传输理论,可以得到传感器接收到的辐射亮度 $L(\mu_v)$ 与表面反射率 r 的关系^[5].在地表为朗伯体、大气水平均一假设条件下,可以得到二者的简化关系如下

$$\begin{aligned} L(\mu_v) &= L_0(\mu_v) + \frac{r}{1-rS} \mu_s F_0 T(\mu_s) \cdot T(\mu_v) \\ &= L_0(\mu_v) + \frac{r}{1-rS} \cdot F \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\mu_v = \cos\theta_v$, $\mu_s = \cos\theta_s$; θ_v 、 θ_s 分别为观测天顶角与太阳天顶角; $L(\mu_v)$ 为传感器接收到的辐射亮度, $L_0(\mu_v)$ 为观测方向的路径辐射项; r 为地表反射率; S 为大气下界的半球反射率; πF_0 为大气层顶与太阳光垂直方向的通量密度.

由传感器接收到的表观辐亮度是地面辐亮度、大气透过率和由于大气散射造成的向上大气光谱辐亮度(即程辐射)的函数^[11],利用入射太阳辐射项 $F_0 \mu_s$ 归一化式(1)可得

$$\begin{aligned} \rho_{TOA}(\mu_s, \mu_v, \phi) &= \rho_0(\mu_s, \mu_v, \phi) \\ &+ \frac{T(\mu_s) T(\mu_v) \rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi)}{1 - \rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi) S} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 ρ_{TOA} 是大气顶部反射率, ρ_0 是大气的路径辐射项等效反射率.其中 T 可以分为直射和散射两部分:

$$T(\mu) = e^{-\tau/\mu} + t_d(\mu) \quad (3)$$

τ 是总体光学厚度, t_d 是散射透射.

由以上几式可以看出,如果已知大气的垂直廓线(温、湿、压),大气水汽含量,大气光厚度(气溶胶),以及气溶胶模式,我们可以通过大气辐射传输模式模拟计算3个不同地表反射率条件下的大气层顶辐射亮度,进而求解得到 S 和 F 值,从而达到大气效应校正的目的.由于直接获得相关的大气属性参数比较困难甚至有些情况是不可能的,比较实际的做法是从遥感图像本身间接估计这些大气参数.对于 PHI 遥感图像,由于其图像本身还包含有 GPS 数据,可以提供较为准确的位置参数信息,为使用辐射传输模型进行大气校正提供了一定的条件.

2 用于 PHI 遥感图像的大气校正算法

2.1 校正算法概述

根据大气辐射传输模型,对于可见光/近红外波段而言,至少有2个主要的大气属性变量需要估计:气溶胶光学厚度和大气水汽含量^[7].另外,为了使用模型进行反射率反演,还需要一些位置参数和考虑交叉辐射的影响等.本文提出的算法基于以下两个条件:一是图像的近红外波段受大气气溶胶影响较小,地面目标可以进行聚类分析;二是在同一个群中模糊区域和清晰区域有着近似的表面反射率.这两个条件在大多数情况下是满足的,所以具有一定

的通用性. 算法的流程如图 1 所示, 主要包括以下几个步骤:

1. 数据输入和预处理后, 采用无监督聚类分析区分图像中模糊和清晰区域, 并计算清晰区域的表面反射率.

2. 判断图像的近红外波段是否存在严重的遮挡阴影, 如果存在则采用直方图匹配算法进行消除.

3. 通过对近红外波段子集进行聚类分析, 按照地表覆盖物类型分成不同的类群.

4. 根据假设条件计算各个类群区域模糊和清晰部分的表面反射率, 并对计算结果进行滤波平滑以消除误差.

5. 结合交叉辐射影响纠正模型, 对 PHI 高光谱图像进行大气辐射校正.

以上校正算法中比较关键的是对大气中气溶胶和水汽等影响因素的处理, 下面分别进行讨论.

2.2 气溶胶光学厚度

对于可见光/近红外波段而言, 大气状况最主要的影响因素是大气气溶胶的变化, 即大气光学厚度的变化, 因此大气校正的关键一步是如何估算遥感图像的气溶胶分布. 在参照了已有的大气校正算法的基础上, 本文在对 PHI 高光谱图像进行校正时, 采用了一种可以从图像本身自动估计大气中非匀质气溶胶分布的算法. 这一算法基于直方图匹配的思想, 但并不是直接对清晰和模糊区域的直方图进行匹配, 而是假设同一种地表覆盖类型的物体在不同大气条件下有着相同的平均反射率, 并采用近红外波段估计该物体反射率与平均反射率的偏差, 进而估计模糊区域该物体的反射率. 由于在 PHI 高光谱图像中的近红外波段波长较长, 受大多数气溶胶的散射影响较小, 我们可以利用图像中 71 波段至 80

波段的 10 个 NIR 波段来估计未受气溶胶散射影响区域某类型地表覆盖物反射率与其平均反射率偏差. 并以式(4)来估计受气溶胶散射影响区域同一地表覆盖类型的反射率.

$$r^i = \bar{r}^i + k_i \Delta r^i, \quad (4)$$

式中, i 是波段号; k_i 是取值在 0 至 1 之间的权重系数; \bar{r}^i 是未受气溶胶散射影响区域同一类型地表覆盖物反射率平均值; Δr^i 是通过分析 10 个近红外波段得到的偏移量, 可以由式(5)计算得到.

$$\Delta r^i = f_i(IR^{71}, IR^{72}, \dots, IR^{80}), \quad (5)$$

式中预测函数 $f_i(\cdot)$ 可以根据所选择的近红外波段的数量取为线性或者非线性^[5]. 在本文处理 PHI 图像时, 采用了线性关系的预测函数. 通过使用这种算法进行处理获得气溶胶模式后, 利用对动态气溶胶模型计算的辐射传输查找表, 将遥感观测的辐射亮度反演为气溶胶光学厚度. 进而利用得到的气溶胶光学厚度对整幅遥感影像进行内插, 就可以得到整幅图像的光学厚度.

2.3 大气水汽含量

大气中水汽含量是大气组成中影响 0.4 ~ 2.5 μm 光谱段辐射性的主要不确定因素之一. 目前根据遥感图像估计大气水汽含量的算法比较多, 主要有: 窄波段和宽波段比例法、CIBR^[7]、曲线拟合法^[1]、APDA 和 smoothness test^[8] 等. 这些算法大多数只是根据图像的某几个波段来进行大气水汽含量的估计, 虽然这样比较简单易行, 但是忽略了气溶胶载荷和表面反射率变化带来的影响, 从而使得估计结果不是很好. 所以有些算法在进行大气水汽含量估计之前, 需要首先进行气溶胶的预校正. 然而, 估计大气中气溶胶载荷又需要大气中水蒸气的先验知识, 当光谱波段比较多时, 计算就变得较为复杂.

针对这种情况, 本文在根据 PHI 遥感图像估计大气水汽含量时, 利用图像的多个波段来估计大气水汽含量. 算法首先利用 CIBR 方法估计大气水汽含量, 在 PHI 高光谱图像中选择 3 个波段, 利用式(6)计算 CIBR 指数:

$$\text{CIBR}_{\text{PHI}} = \frac{L(60)}{a \cdot L(54) + b \cdot L(70)}, \quad (6)$$

式中 $L(x)$ 是波段 x 的辐射亮度值, 系数 a 和 b 由波段 x 和中央水吸收带波段之间的相对距离决定. 在计算 CIBR 指数之后, 利用一个隐层的人工神经网络找出其最佳投影方向, 使得原始变量得到加强而不需要的变量得到抑制, 并使用 MODTRAN 的输出进行样本训练. 该方法得到的结果具有更高的相关

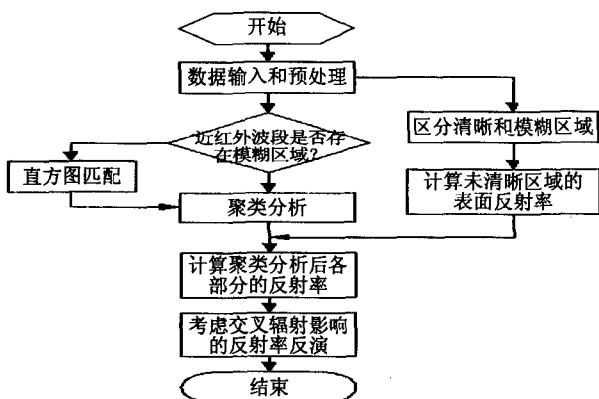


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flowchart of the new algorithm

系数和更小的标准残差,完全适合应用于 PHI 高光谱遥感图像的分析。

2.4 其他参数

本文分析处理的 PHI 高光谱遥感图像,是面阵 CCD 光谱仪垂直于地面获取的数据,其总视场角为 21 度,每扫描行有 64 128 个字节,前 64 000 个字节为图像数据,后 128 个字节是 GPS 数据,共记录了 80 个光谱波段,每波段 800 个字节,为 400 个象元。图像数据的排列采用 BIL 格式,每个象元占 2 个字节(低前高后),高 12 位有效。GPS 数据占有 128 个字节,为 ASCII 字符,以“\$PASHR, POS,”起始。GPS 数据中包含了图像采集时的时间、经纬度、高度、航迹向、航速等信息,我们可以根据这些数据来确定图像的位置参数等其他大气校正需要的参数。

2.5 交叉辐射影响

交叉辐射又称为临近象元效应,假定在地表朗伯体、大气水平均一条件下获得大气校正的地表反射率为 ρ_s^{ac} ,则根据式(2)有

$$\rho_{TOA} = \rho_0 + \frac{\rho_s^{ac} \cdot T(\mu_s)T(\mu_v)}{1 - \rho_s^{ac}S} \quad (7)$$

如果考虑临近象元的影响,则有如下关系

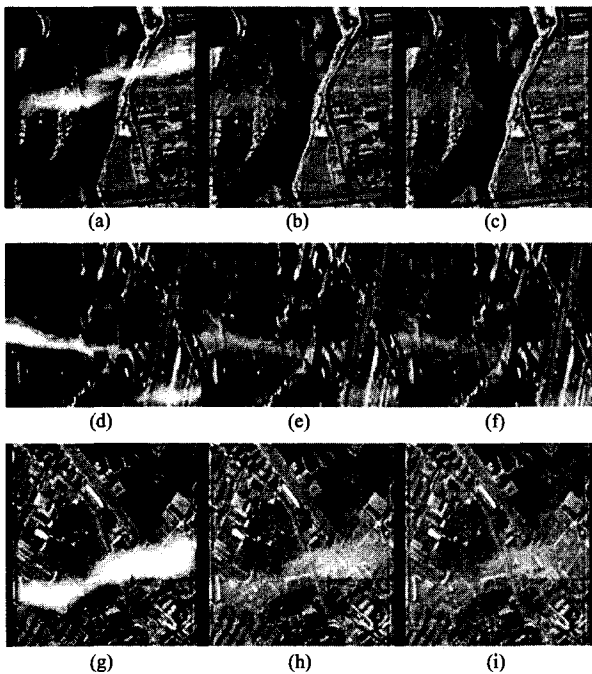


图2 试验结果 (a)(d)(g)为校正前结果;(b)(e)(h)为使用“黑体法”的校正结果;(c)(f)(i)为使用新算法的校正结果

Fig.2 Experiment results (a)(d)(g) before atmospheric correction images; (b)(e)(h) atmospheric correction results using the ‘dark-object’ method; (c)(f)(i) atmospheric correction results using the new algorithm.

$$\rho_s^{ac} = \rho_s \cdot \frac{e^{-\tau/\mu_v}}{T(\mu_v)} + \tilde{\rho}_s \frac{t_d(\mu_v)}{T(\mu_v)} \quad (8)$$

由此可得

$$\rho_s = \frac{\rho_s^{ac}T(\mu_v) - \tilde{\rho}_s t_d(\mu_v)}{e^{-\tau/\mu_v}} \quad (9)$$

其中 $t_d(\mu_v) = T(\mu_v) - e^{-\tau/\mu_v}$,

$$\tilde{\rho}_s = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(r(x,y))\rho(x,y) dx dy \quad ,$$

x, y 是目标像素为坐标原点的局部坐标系坐标值; $f(r)$ 是大气点扩散函数. 在对 PHI 遥感图像进行计算时, $\tilde{\rho}_s$ 可以由原始图像中校正象元为中心的 $2N \times 2N$ 象元子域计算得到

$$\tilde{\rho}_s = \sum_{j=-N}^N \sum_{i=-N}^N f(r(i,j))\rho_s^{ac}(i,j) \quad , \quad (10)$$

式中 $r(i, j)$ 为象元 (i, j) 距中心的距离。

通过上面的分析,在从 PHI 遥感图像中估计出气溶胶光学厚度、大气水汽含量再结合图像的本身的参数,即可以对整幅影像进行大气校正和表面反射率反演。

由于该算法的使用是有一定的前提条件的,所以当一景遥感图像中所有区域的地表覆盖类型完全不相同,或者不存在清晰区域与模糊区域的地表覆盖类型相同时,这一算法将变得作用不大. 另外,根据算法对大气气溶胶的处理方法可知,该算法对校正大气非均匀气溶胶分布是有效的,而对于水平均匀分布的气溶胶则效用不大. 但是这些情况在一景足够大的图像中是较少出现的,所以该算法对大多数的高光谱遥感图像还是比较有效的。

3 算法应用实例

为了验证利用前面讨论的算法的有效性,论文分别采用经典的“黑体”法和本文论述的方法对 3 景 PHI 高光谱遥感图像的部分进行了处理. 处理结果如图 2 所示. 其中图 2(a)、(d)、(g) 是 3 景未经处理的原始图像;图 2(b)、(e)、(h) 是使用“黑体”法进行处理后的图像;图 2(c)、(f)、(i) 是采用本文算法处理后的图像. 通过对比几幅图像可以看出,经过校正,气溶胶的影响已经基本被消除并恢复出了大部分的地物信息,并且本文论述的算法效果更好一些。

4 结语

大气校正是对高光谱遥感图像进行定量分析和地物目标识别中比较重要的一步,本文在对大气辐射传输模型进行分析的基础上,结合现有的大气校

正算法在 ETM +、AVIRIS 等遥感图像中的应用^[5-10]分析,找出了一种能够较好地去除气溶胶散射影响的算法.将该算法应用于处理 PHI 高光谱遥感图像,并获得了较好的校正结果,以后的工作中需要进行地面同步测量来定量地研究这种算法的有效性.

REFERENCES

- [1] XU Wei-Dong, YIN Qiu, KUANG Ding-Bo. Comparison of different spectral matchmodels [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (许卫东,尹球,匡定波.地物光谱匹配模型比较研究. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(4):296—300.
- [2] WU Yun-Zhao, TIAN Qing-Jiu, JIN Zhen-Yu, et al. Evaluation of simplified procedures for retrieval of absolute surface reflectance from landsat enhanced thematic mapper (ETM +) [J]. *Theory Research* (吴昀昭,田庆久,金震宇,等. ETM + 数据绝对反射率反演方法分析. *理论研究*), 2004, **12**(2):9—12.
- [3] QI Cheng-Li, DONG Chao-Hua, ZHANG Wen-Jian, et al. Atmospheric transmittance calculation of infrared spectral radiometer to be onboard FY-3A meteorological satellite [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (漆成莉,董超华,张文建,等.风云三号(A)气象卫星红外分光计大气透射率计算试验. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(3):203—206.
- [4] LI Hong-Bo, SHU Rong, XUE Yong-Qi. Pushbroom hyperspectral imager and its potential application to oceanographic remote sensing [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李红波,舒嵘,薛永祺. PHI 超光谱成像系统及其海洋遥感应用前景分析. *红外与毫米波学报*), 2002, **21**(6):429—433.
- [5] ZHANG Peng, BRUNEL Pascal, DONG Chao-Hua, et al. Study of hyperspectral IR atmospheric sounding with an accurate forward simulation [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张鹏, Pascal Brunel, 董超华,等. 卫星高光谱红外大气探测的正演模拟研究. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(6):414—418.
- [6] Shun Lin-Liang, Hong Liang-Fang. An improved atmospheric correction algorithm for hyperspectral remotely sensed imagery [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2004, **1**(2):112—117.
- [7] SHI Chun-Xiang, XIE Zheng-Hui. Operational method of total precipitable water retrieved from satellite multi-channels' infrared data [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (师春香,谢正辉. 卫星多通道红外信息反演大气可降水业务方法. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(4):304—308.
- [8] Zheng Qu, Bruce C Kindel, Alexander F H Goetz. The high accuracy atmospheric correction for hyperspectral data (HATCH) Model [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2003, **41**(6):1223—1231.
- [9] WANG Qiang, SHU Jiong, YIN Qiu. DSGF method on detecting and removing spectral noise of hyperspectral mage [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王强,束炯,尹球. 高光谱图像光谱域噪声检测与去除的 DSGF 方法. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(1):29—32.
- [10] LIU Liang-Yun, ZHANG Bing, ZHENG Lan-Fen, et al. Target classification and soil water content regression using land surface temperature (LST) and vegetation index (VI) [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘良云,张兵,郑兰芬,等. 利用温度和植被指数进行地物分类和土壤水分反演. *红外与毫米波学报*), 2002, **21**(4):269—273.
- [11] TONG Jin-Jun, QIU Kang-Mu, LI Xiao-Wen. New method of in-flight absolute calibration for thermal infrared channels of satellite sensors [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (童进军,邱康睦,李小文. 一种卫星遥感仪器热红外通道在轨绝对辐射定标新方法. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(4):277—280.