

基于 MODTRAN 的双查找表法反演高光谱数据的水汽含量

陶东兴 赵慧洁 贾国瑞

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要 基于 MODTRAN 辐射传输模型, 假设近红外波段地物反射率随波长线性变化, 考虑程辐射的影响, 发展了一种通过双查找表反演高光谱遥感数据水汽含量的方法。建立查找表过程中, 使用三次样条插值方法对查找表水汽含量值加密以减少 MODTRAN 运行时间。使用两个查找表, 通过逐步搜索法对高光谱遥感数据进行水汽反演, 得到水汽含量分布图。结果显示, 使用三次样条插值方法得到的辐亮度值与 MODTRAN 计算结果只有 0.1% 的误差。对两景机载可见光/红外成像光谱仪 (AVIRIS) 高光谱数据进行水汽反演, 得到水汽含量分布图, 并用其对辐亮度数据进行大气校正, 得到反射率数据。水汽含量分布图变化平缓, 无亮/暗点出现, 反射率数据在水汽吸收波段的光谱曲线没有过/欠校正现象, 这表明水汽反演方法有效。

关键词 遥感; 水汽含量; 双查找表; 逐步搜索法; MODTRAN

中图分类号 TP751.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.1001001

A MODTRAN-Based Double-Lookup-Tables Retrieval Algorithm for Water Vapor Amount of Hyperspectral Data

Tao Dongxing Zhao Huijie Jia Guorui

(Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology, Education of Ministry,

School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract Assuming that surface reflectance changes linearly with wavelength in the near-infrared band and the impact of path radiance is considered. An algorithm based on radiative transfer model MODTRAN, which gets the column water vapor amount using two lookup-tables (LUTs) is developed. Cubic interpolation method is used to reduce the water vapor amount step in LUTs. Using the LUTs through a stepwise-search method, water vapor amount distribution image can be gained from hyperspectral data. It shows that the radiance gotten by cubic spline interpolation only has 0.1% error compared with MODTRAN simulated radiance. Water retrieval is performed to two scenes of airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) data, and two water vapor amount distribution images are obtained. Reflectance data are obtained using the images through atmosphere correction. Water vapor amount distribution images change smoothly without bright or dark spots in them, and there is no peaks or valleys in the water vapor absorption band of reflectance spectra. It is proved that the algorithm is valid.

Key words remote sensing; water vapor amount; double-lookup-tables; stepwise-search method; MODTRAN

OCIS codes 010.1030; 010.7340; 260.3060; 280.4991

1 引 言

水汽在可见至短波红外波段有一系列的吸收带, 它严重影响高光谱遥感数据的使用。Fowle^[1]在 1915 年确定了水汽各个吸收带的光谱透射率, 为

以后的水汽提取提供了理论依据。使用近红外空间外差光谱仪^[2,3]或者太阳光度计^[4,5]可以测得水汽含量, 但是高光谱遥感数据采集时, 并不能实时使用这些仪器测量水汽含量。所以, 直接从遥感数据反

收稿日期: 2012-04-19; 收到修改稿日期: 2012-05-22

基金项目: 国家 863 计划(2008AA121102)、中央高校基本科研业务费专项基金(YWF-11-03-Q-074)和长江学者和创新团队发展计划(IRT0705)资助课题。

作者简介: 陶东兴(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事大气遥感及成像仿真方面的研究。

E-mail: buaeye@aspe.buaa.edu.cn

导师简介: 赵慧洁(1966—), 女, 博士, 教授, 主要从事高光谱遥感方面的研究。E-mail: hjzhao@buaa.edu.cn

演水汽含量显得非常重要。在假设近红外波段地物反射率随波长线性变化,且忽略程辐射影响的情况下,Bruegge 等^[6]提出了连续波段内插法(CIBR)提取水汽含量,刘三超等^[7]针对高光谱数据,增加了CIBR法的反演通道数,提出了双CIBR(DCIBR)法,并对该方法进行了误差分析;Kaufman 等^[8]提出使用水汽吸收波段和其附近非水汽吸收波段的比值(双通道比值法)来提取水汽含量;孟宪红等^[9,10]针对中分辨率成像光谱仪数据(MODIS)对双通道比值法进行了改进,考虑了混合像素和卫星扫描视场角的影响,使其精度更高。Felde 等^[11,12]提出使用水汽吸收波段和其周围非水汽吸收波段,结合MODTRAN辐射传输模型,建立查找表,提取水汽含量,并将该算法集成到FLAASH大气校正模块中。查找表法仍假设近红外波段地物反射率随波长线性变化,但是包含了程辐射的影响。然而,由于水汽吸收波段能量低,易受噪声影响,FLAASH模块建立单一查找表,不能保证水汽提取的稳定性,而且由于使用查找表方法等原因,有时会出现像素值超出查找表范围^[11],导致水汽提取错误,并最终使反射率数据在水汽吸收波段出现过/欠校正现象。

针对查找表法的上述问题,基于MODTRAN辐射传输模型,使用水汽吸收波段和其左、右非水汽吸收波段,分别建立查找表,使用逐步搜索的方法,分别提取水汽含量,然后将两个水汽含量做平均,得到遥感数据的水汽分布图。在假设近红外波段地物反射率线性变化的基础上,使用两个查找表分别提取水汽含量做平均,可以得到准确的水汽含量值;对每个查找表,使用逐步搜索方法,有效地避免了像素值超出查找表的现象,提高了水汽反演的稳定性。使用本方法反演的水汽含量分布图对遥感数据进行大气校正,可以很好地消除水汽吸收对遥感数据的影响,得到有

效的反射率数据。

2 原理和方法

2.1 双查找表法原理及流程

对于传感器入瞳辐亮度,假设如下^[13]:1) 传感器主要接收的是地表反射的直射辐射,程辐射较少,而且以单次散射为主;2) 散射与水汽吸收两种过程各自独立;3) 散射辐射随波长变化缓慢,非水汽吸收波段和水汽吸收波段的入瞳辐亮度可以表示为

$$L = cL_s \rho \tau_a, \quad (1)$$

$$L_{wv} = cL_{s,wv} \rho_{wv} \tau_a \tau_{wv}, \quad (2)$$

式中 L_s 为大气外界太阳辐射, ρ 为地表反射率, τ_a 表示不包含水汽吸收的大气透射率,下标“wv”表示水汽吸收波段, τ_{wv} 表示水汽吸收透射率。将(1)、(2)式相比可得

$$\frac{L_{wv}}{L} = \frac{L_{s,wv}}{L_s} \frac{\rho_{wv}}{\rho} \tau_{wv}. \quad (3)$$

假设近红外波段地物反射率线性变化,则

$$\frac{L_{wv}}{L} = k \tau_{wv} \frac{L_{s,wv}}{L_s}. \quad (4)$$

遥感数据在水汽吸收波段和其左、右非水汽吸收波段入瞳辐亮度的比值与水汽含量密切相关。反演遥感数据的水汽含量时,水汽吸收波段一般使用940 nm或1140 nm。选择前者时,其左、右非水汽吸收波段选取880 nm和1010 nm附近;选择后者时,其左、右非水汽吸收波段选取1060 nm和1200 nm附近。太阳是稳定光源,在反射率不变的情况下,两波段比值随水汽含量单调变化,可以使用查找表法提取水汽含量,考虑大气与地表多次反射时,这个比值与反射率的取值有关,如图1所示(在标准大气压下,水汽单位用cm高度表示)。

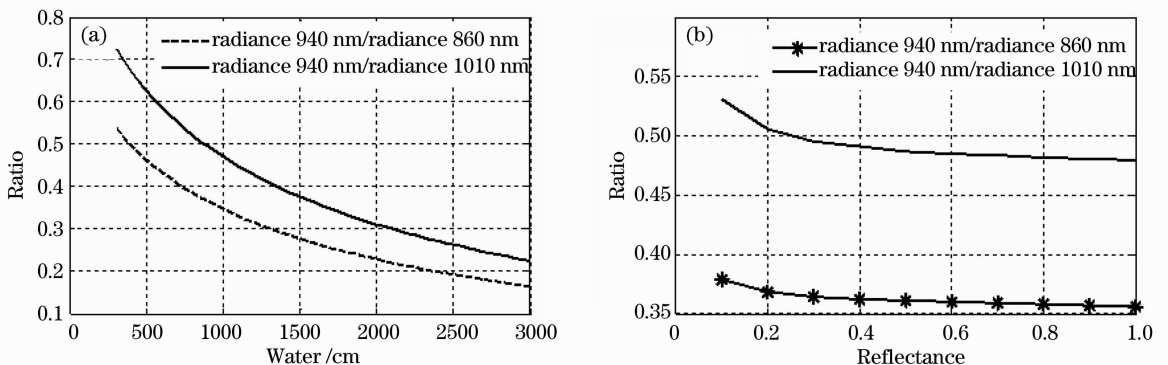


图1 MODTRAN模拟的双波段比值随(a)水汽含量和(b)反射率的变化曲线

Fig. 1 Ratio of two band radiance changed with (a) water vapor amount and (b) reflectance based on MODTRAN

基于辐射传输模型 MODTRAN, 计算一系列水汽含量和反射率下的入瞳辐亮度。水汽吸收波段入瞳辐亮度记为 L_{LUT_a} , 其左、右非水汽吸收波段的入瞳辐亮度分别记为 L_{LUT_l} 和 L_{LUT_r} 。以 $(L_{LUT_l}, L_{LUT_a}/L_{LUT_l})$ 和 $(L_{LUT_r}, L_{LUT_a}/L_{LUT_r})$ 分别建立查找表, 记为查找表 1 和查找表 2。通过两个查找表, 使用逐步搜索法对高光谱遥感数据的每个像素进行水汽反演, 得到两个水汽含量分布图, 做平均后, 得到最终的水汽含量分布图, 水汽反演的流程图如图 2 所示。

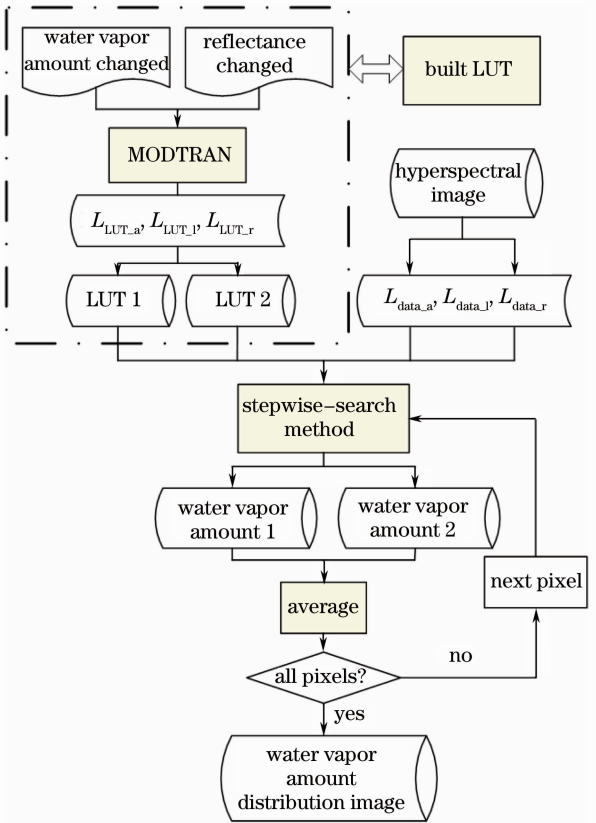


图 2 水汽反演流程图

Fig. 2 Flow chart for water vapor retrieval

2.2 使用三次样条插值的双查找表建立

建立查找表时, 假设地表均一, 则入瞳辐亮度可以表示为

$$L = \frac{K\rho}{1-\rho S} + L_a, \quad (5)$$

式中 K 和 S 是只和大气有关的参数, L_a 为程辐射。为考虑大气散射和程辐射, 需要在 MODTRAN 中输入气溶胶含量值, 现在已有很多方法可以直接从遥感数据中提取气溶胶含量^[14~18]。对某一水汽含量, 分别令 $\rho=0, 0.5, 1$, 使用 MODTRAN 计算入瞳辐亮度, 并代入(5)式, 求得 (K, S, L_a) 值。设置一系列 (n 个) 水汽含量, 得到与之对应的 n 组 (K, S, L_a)

值, 水汽含量的范围应尽可能宽, 以包含遥感数据中所有的水汽含量。对某一组 (K, S, L_a) 值, 给定一个反射率, 即可得到一个入瞳辐亮度, 为包含遥感数据中所有的反射率值, 反射率值范围设置为 $[0, 1]$, 以 0.01 为间隔, 这样通过计算 $3n$ 组 MODTRAN, 可以得到 $101n$ 组 (V_{water}, ρ) 下的入瞳辐亮度, 并以此建立查找表。

n 值越大, 查找表建立得越精细, MODTRAN 的计算量也就越大, 使用插值方法对查找表进行加密, 以减小 MODTRAN 的计算量。对于区间 $[a, b]$ 的一个分划

$$a = x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1} < x_n = b, \quad (6)$$

它的三次样条函数为

$$s(x) = \sum_{j=0}^3 a_j x^j + \frac{1}{3!} \sum_{j=1}^{n-1} c_j (x - x_j)^3, \quad a \leq x \leq b \quad (7)$$

具有连续二阶导数, 曲线光滑性很好, 可以使用三次样条函数对查找表进行插值。

2.3 逐步搜索法反演水汽含量

以查找表 1 为例, 说明逐步搜索法步骤:

1) 取一个阈值 η , 对某一像素, 将查找表中, 满足(8)式的部分取出, 建成一个新的查找表。

$$|L_{\text{data}_a}(i, j) - L_{LUT_l}| < \eta. \quad (8)$$

2) 对新的查找表, 令

$$t = |L_{\text{data}_a}(i, j)/L_{\text{data}_l}(i, j) - L_{LUT_a}/L_{LUT_l}|, \quad (9)$$

使 t 值最小的值所对应的水汽含量, 即认为是像素的水汽含量值。

非水汽吸收波段的辐亮度值与水汽含量无关, 只与反射率有关, 步骤 1) 中, 合理选择 η 值, 像素的非水汽吸收波段辐亮度值不会超出查找表范围, 通过步骤 1), 可以大致确定像素的反射率范围, 将这个反射率范围内的查找表单元提取出来, 组成新的查找表; 通过步骤 2) 精确得到像素对应的水汽含量值, 逐步搜索法可以提高查找表对不同地物像素的适应性。

对每一个像素, 重复 1)、2) 两步, 通过逐步搜索法得到每一个像素对应的水汽含量值, 从而得到整个遥感数据对应的水汽含量分布图。使用查找表 2 亦可得到一个水汽含量分布图, 将两者做平均, 得到高光谱遥感数据最终的水汽含量分布图。

3 实验结果与分析

3.1 三次样条插值精度验证

标准大气模式下, 设置两组水汽含量, 变化区间

均为 300~3000, 第一组间隔为 50, 第二组间隔为 300, 分别使用 MODTRAN 计算两组入瞳辐亮度, 并将第二组使用三次样条插值成间隔为 50 的入瞳辐亮度, 比较两组辐亮度 940 nm 水汽吸收波段的幅值, 如图 3 所示, 两者的均方根相对误差小于 0.1%, 所以建立查找表时使用三次样条插值完全满足需要。

3.2 水汽含量提取及验证

机载可见光/红外成像光谱仪(AVIRIS)高光谱数据的波长范围覆盖 370~2500 nm, 光谱分辨率为 10 nm, 空间分辨率为 20 m。使用本文方法对两景不同地物类型、大小均为 200 × 200 × 224 的 AVIRIS 机载数据进行水汽反演, 得到水汽含量分布图, 如图 4 所示。第一景数据于 1997 年 4 月 3 日获取自美国加利福尼亚州水晶泉水库附近, 主要由植被和水体像素组成, 图 4(a) 是其 557 nm 波段的

图像; 第二景数据于 1997 年 6 月 23 日获取自美国月亮湖定标场附近, 由裸地像素组成, 图 4(c) 是其 557 nm 波段的图像。由图 4(b) 和 (d) 可见, 两景数据的水汽含量分布图变化都比较平缓, 第一景在水体像素处水汽含量明显升高, 这符合实际情况。

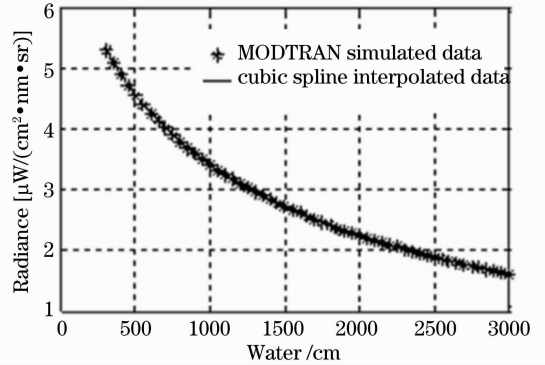


图 3 插值辐亮度和 MODTRAN 模拟辐亮度比较
Fig. 3 Comparison of interpolated radiance with simulated radiance by MODTRAN

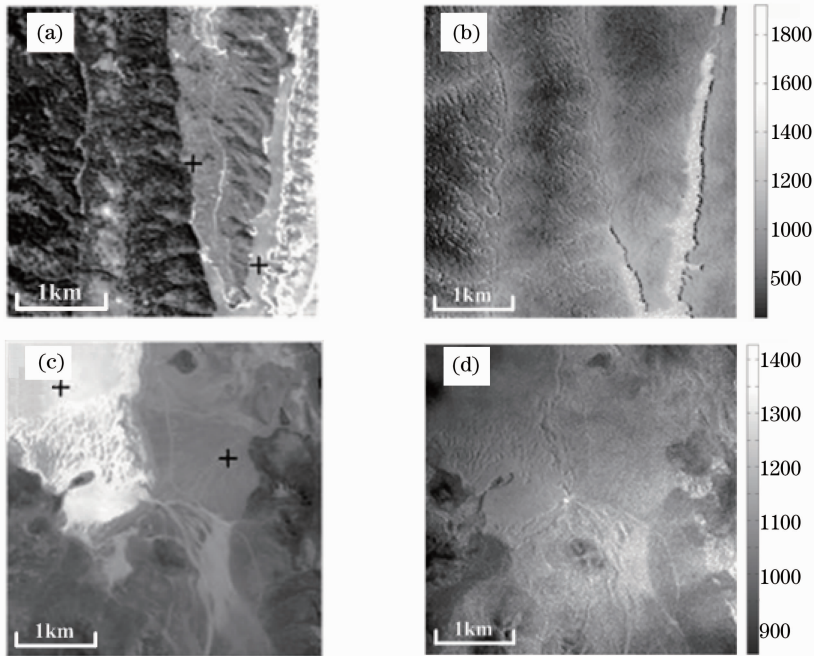


图 4 AVIRIS 数据和其反演的水汽含量分布图。(a) 第一景 AVIRIS 数据; (b) (a) 数据反演的水汽含量分布图; (c) 第二景 AVIRIS 数据; (d) (c) 数据反演的水汽含量分布图

Fig. 4 AVIRIS images and the water vapor amount distribution images. (a) First AVIRIS images; (b) water vapor amount distribution image of (a); (c) second AVIRIS image; (d) water vapor amount distribution image of (c)

使用反演的两个水汽含量分布图, 对这两景数据进行大气校正, 得到反射率数据, 记为数据 1 和数据 2。提取图 4(a) 和 (c) 中使用“十”字标识的像素的反射率, 如图 5(a)、(b) 所示, 反射率光谱在水汽

吸收波段没有出现过/欠校正现象, 这说明, 该方法提取的水汽含量分布图是准确的, 而且适用于不同的地物。

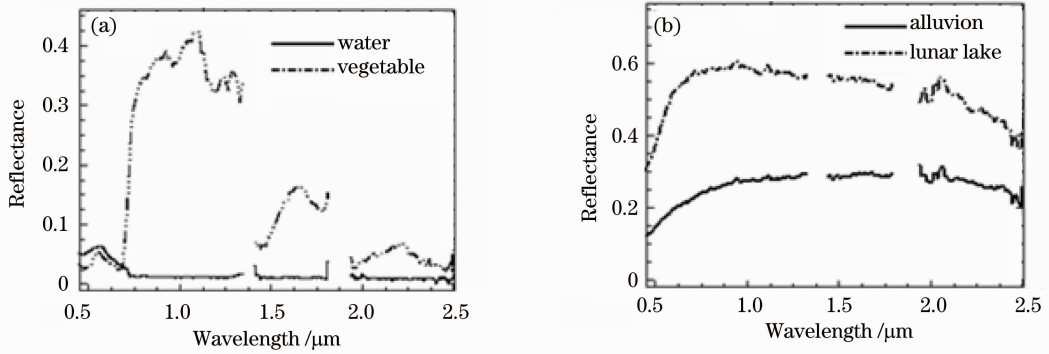


图 5 “十”字标识像素的反射率光谱曲线。(a) 图 4(a)中；(b)图 4(c)中

Fig. 5 Reflectance curves marked by “十”. (a) In Fig. 4(a); (b) in Fig. 4(c)

FLAASH 是常用的大气校正模块,使用 FLAASH 对图 4(a)所示数据进行大气校正,得到水汽含量分布图和反射率数据,反射率数据记为数据 3,水汽含量分布图如图 6 所示。在部分低反射率的水体像素区域,不能得到正确的水汽含量,反射率反演时,只能使用图像的平均水汽含量来代替这些像素的水汽含量,这会使它们的反射率光谱在水汽吸收波段出现过/欠校正现象。

FLAASH 反演的水汽含量分布图中,黑色部分是水汽含量反演错误的像素,FLAASH 对这些像素的水汽含量赋负值(-779 cm),分别从数据 1 和数据 3 中提取图 6 中使用“十”字标识的像素的反射率光谱,如图 7 所示,数据 1 反射率光谱在水汽吸收波段正常,没有过/欠校正现象,而数据 3 反射率光谱在 940 nm 和 1135 nm 两个水汽吸收波段(虚线椭圆圈中)出现了欠校正现象。这是因为水体像素

的水汽含量明显高于平均水汽含量,FLAASH 使用平均水汽含量对这些像素进行大气校正,致使这些像素的反射率出现欠校正现象。

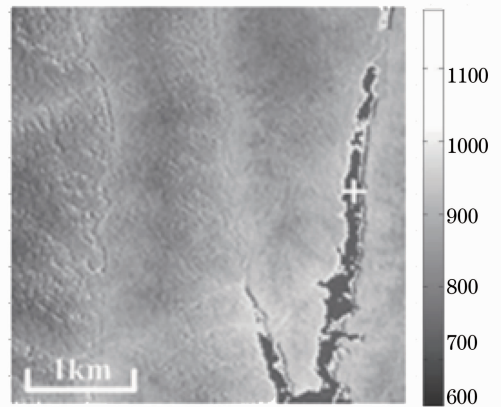


图 6 FLAASH 反演的图 4(a)的水汽含量分布图
Fig. 6 Water vapor amount distribution image of fig. 4(a) by FLAASH

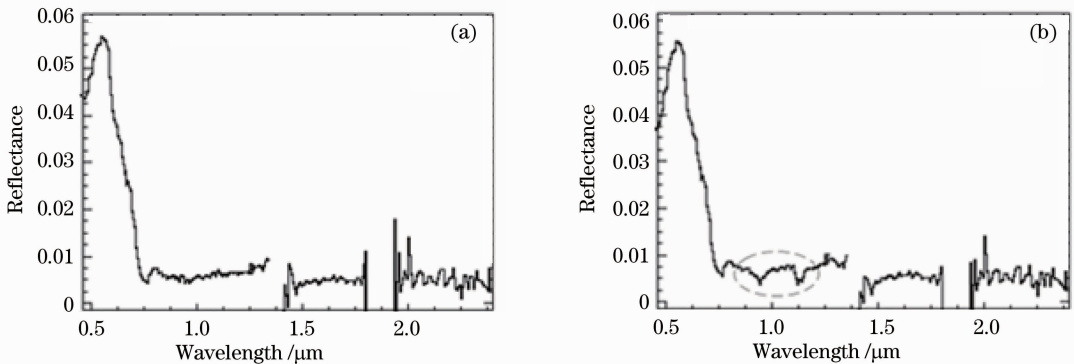


图 7 图 6“十”字标识像素的反射率光谱。(a)从数据 1 提取；(b)从数据 3 提取

Fig. 7 Reflectance spectra of fig. 6 marked by “十”. (a) From data 1; (b) from data 3

4 结 论

分析了使用查找表法反演高光谱遥感数据水汽含量的可行性,详细描述了双查找表法反演水汽含

量的步骤。基于辐射传输模型 MODTRAN 模拟成像光谱仪的入瞳辐亮度,提出一种通过逐步搜索,不断缩小查找表范围,最终反演水汽含量的方法。使

用水汽吸收波段和其左、右的非水汽吸收波段,建立了两个用于高光谱遥感数据水汽反演的查找表,通过两个查找表分别反演水汽含量,做平均后,得到遥感数据的水汽含量分布图。对两景不同地物类型的AVIRIS数据进行水汽反演,得到的水汽含量分布图符合水汽的空间分布规律,将水汽含量分布图用于这两景数据的大气校正,生成的反射率数据在水汽吸收波段没有过/欠校正现象,验证了该水汽反演方法的有效性。

参 考 文 献

- 1 F. E. Fowle. The transparency of aqueous vapor [J]. *J. Astrophys.*, 1915, **42**: 394~411
- 2 Xiong Wei, Shi Hailiang, Wang Yuanjun *et al.*. Study on near-infrared spatial heterodyne spectrometer and detection of water vapor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1511~1515
熊 伟, 施海量, 汪元钧 等. 近红外空间外差光谱仪及水汽探测研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1511~1515
- 3 Zou Mingmin, Fang Yonghua, Xiong Wei *et al.*. Line-by-line retrieval calculation of water vapor based on the observation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1701~1705
邹铭敏, 方勇华, 熊 伟 等. 一种基于空间外差光谱技术观测的水汽浓度逐线积分反演方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1701~1705
- 4 Zhou Ning, Liu Min. Total column water vapor retrieval methods and results comparison by using sun photometer[J]. *J. Remote Sensing*, 2011, **15**(3): 573~577
周 宁, 刘 敏. 太阳光度计反演大气水汽总量的方法与结果对比分析[J]. *遥感学报*, 2011, **15**(3): 573~577
- 5 Zhang Yuxiang, Li Xiaojing, Gu Xingfa. Estimation of water vapor amount over Beijing from sun photometer measurements [J]. *J. Remote Sensing*, 2006, **10**(5): 749~755
张玉香, 李晓静, 顾行发. 利用太阳光度计测值估算北京上空水汽含量[J]. *遥感学报*, 2006, **10**(5): 749~755
- 6 C. J. Bruegge, J. E. Conel, J. S. Margolis *et al.*. In-situ atmospheric water-vapor retrieval in support of AVIRIS validation [C]. *SPIE*, 1990, **1298**: 150~163
- 7 Liu Sanchao, Gao Maofang, Liu Qinhua *et al.*. Retrieval of water vapor using hyperspectral data [J]. *Remote Sensing Information*, 2009, (3): 11~14
刘三超, 高懋芳, 柳钦火 等. 高光谱数据反演大气水汽研究[J]. *遥感信息*, 2009, (3): 11~14
- 8 Y. J. Kaufman, B. C. Gao. Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS[J]. *IEEE Trans. Geosci. & Remote Sens.*, 1992, **30**(5): 871~884
- 9 Meng Xianhong, Lü Shihua, Zhang Tangtang. Testing, improvement and application of MODIS near infrared water vapor products-taking Jinta oasis in heihe river basin as a case study [J]. *J. Infrared Millimeter Waves*, 2007, **26**(2): 107~111
孟宪红, 吕世华, 张堂堂. MODIS 近红外水汽产品的检验、改进及初步应用—以黑河流域金塔绿洲为例[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(2): 107~111
- 10 Li Honglin, Li Wanbiao. Retrieval of atmospheric total water vapor with MODIS near infrared measurements [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (JCR Science Edition)*, 2008, **44**(1): 121~128
李红林, 李万彪. MODIS 近红外资料反演大气水汽总含量[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2008, **44**(1): 121~128
- 11 G. W. Felde, G. P. Anderson, J. A Gardner *et al.*. Water vapor retrieval using the FLAASH atmospheric correction algorithm[C]. *SPIE*, 2004, **5425**: 357~367
- 12 G. P. Anderson, G. W. Felde, M. L. Hoke *et al.*. MODTRAN4 based atmospheric correction algorithm; FLAASH (fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes) [C]. *SPIE*, 2002, **4725**: 65~71
- 13 Hu Xiuqing, Huang Yibin. Comparison and application of methods for satellite remote sensing of atmospheric water vapor based on 940 nm near-infrared bands[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2010, **38**(5): 582~587
胡秀清, 黄意玢. 利用 940 nm 卫星遥感数据反演大气水汽的方法比较与应用分析[J]. *气象科技*, 2010, **38**(5): 582~587
- 14 Li Dong, Chen Wenzhong. Comparison of remote sensing aerosol optical depth from MODIS data with in-situ sky radiometer observations over East China Sea[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2828~2836
李 栋, 陈文忠. MODIS 遥感中国东部海域气溶胶光学厚度与现场测量数据的对比分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2828~2836
- 15 Sun Xia, Zhao Huijie. Retrieval algorithm for optical parameters of aerosol over land surface from POLDER data[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1772~1777
孙 夏, 赵慧洁. 基于 POLDER 数据反演陆地上空气溶胶光学特性[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1772~1777
- 16 Wang Jiacheng, Qiao Yanli, Yang Shizhi. Retrieval of polluted aerosol optical properties over coastal water [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(6): 060101
王家成, 乔延利, 杨世植. 近海污染大气气溶胶光学性质反演研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(6): 060101
- 17 T. Perkins, S. M. Adler-Golden, M. Matthew *et al.*. Retrieval of atmospheric properties from hyper- and multi-spectral imagery with the FLAASH atmospheric correction algorithm[C]. *SPIE*, 2005, **5979**: 59790E
- 18 Y. J. Kaufman, A. E. Wald, L. A. Remer *et al.*. The MODIS 2.1- μm channel-correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol[J]. *IEEE Trans. Geosci. & Remote Sens.*, 1997, **35**(5): 1286~1298

栏目编辑: 何卓铭