

基于遥感影像的大气辐射校正和反射率反演方法^{*}

田庆久 郑兰芬 童庆禧

(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

提 要

应用 1995 年 7 月在法国 La Crau 辐射校正场进行的遥感实验获得的 SPOT HRV 数据, 在 DOS 方法的基础上, 合理分析假设暗体反射率值, 并结合 Lowtran-7、6S、Modtran-3 大气辐射传输模型进行大气模拟, 研究并发展基于遥感影像信息的快速、经济、有效的大气辐射校正和反射率反演方法. 通过 La Crau 场的反射率反演值与实时测量反射率值相比较, 分析评价了该研究方法的有效性.

关键词: 遥感影像 辐射定标 大气辐射校正 反射率反演

引 言

近 20 年来, 定量遥感技术迅速发展, 特别是利用多遥感器、多时相遥感数据进行监测和分析全球资源环境、气候变化等的需要, 使得遥感数据的定标、大气辐射校正和地表物理量反演方法的研究越来越受到重视. 就太阳反射光谱区的遥感数据而言, 大气辐射校正和反射率反演方法研究的目的就是将这些卫星遥感定标后的表观辐亮度转换为反映地物真实信息的地表反射率. 最理想的大气辐射校正和反射率反演方法应该是仅通过遥感影像信息, 而不需要野外场地测量等辅助数据, 并且能够适用于历史数据和很偏远的研究区域. 最早基于图像的大气辐射校正法是利用清洁水体的象元值直接取代大气程辐射, 不考虑大气其它因素的影响^[1]. 后来对该方法加以改进形成暗体减法, 即 DOS 法 (Dark-Object Subtraction)^[2]. 另外还有 RM、CMM、RIM 法等. 但这些方法主要解决的是程辐射问题, 对大气透过率和天空光向下漫射辐射的影响没有校正. 本文应用 1995 年 7 月在法国 La Crau 辐射校正场进行的遥感试验获得的 SPOT 数据, 研究并发展基于遥感影像信息的快速、经济、有效的大气辐射校正和反射率反演方法.

1 大气辐射校正简化理论模型

假设天空辐照度各向同性和地面朗伯面反射, 并忽略大气的折射、湍流和偏振, 由遥感方程, 地物表面反射辐亮度是太阳辐照度和表面反射率的函数^[3]:

^{*} 国家自然科学基金委员会“遥感信息机理和传输”课题资助。
1997-08-14 收到, 1997-10-06 收到修改稿。

$$L_{g\lambda} = (\rho_{g\lambda}/\pi) [E_0(\lambda)\cos\theta_z \exp(-\delta_\lambda \sec\theta_z) + E_{d\lambda} \downarrow] \quad (1)$$

式中 $L_{g\lambda}$ 为地物表面反射辐射亮度; $\rho_{g\lambda}$ 为地物表面反射率; $E_0(\lambda)$ 为大气层外相应波长的太阳光谱辐照度; θ_z 为太阳天顶角; δ_λ 为相应波长的大气光学厚度; $E_{d\lambda} \downarrow$ 为由天空光漫射到地表面的光谱辐照度。

由卫星接收到的表观辐射亮度是地面辐射亮度、大气透过率和由于大气散射造成的向上大气光谱辐射亮度 $L_{d\lambda} \uparrow$ (即:程辐射)的函数:

$$L_{s\lambda} = L_{g\lambda} \exp(-\delta_\lambda \sec\theta_v) + L_{d\lambda} \uparrow \quad (2)$$

其中 θ_v 为卫星遥感器观测角。

由式(1)、(2)可得:

$$\rho_{g\lambda} = \pi(L_{s\lambda} - L_{d\lambda} \uparrow) / \tau_{v\lambda} [E_0(\lambda)\cos\theta_z \tau_{z\lambda} + E_{d\lambda} \downarrow] \quad (3)$$

式中 $\tau_{z\lambda}$ 和 $\tau_{v\lambda}$ 为向下和向上的大气透过率。在 θ_z 和 θ_v 小于 70° 角时,在大气散射和弱吸收(可见和短波红外)情况下, $\tau_{z\lambda}$ 和 $\tau_{v\lambda}$ 可近似为 $\exp(-\delta_\lambda \sec\theta_z)$ 和 $\exp(-\delta_\lambda \sec\theta_v)$ 。

当忽略大气影响时,卫星表观反射率可写为

$$\rho_{g\lambda u} = (\pi L_{s\lambda}) / (E_0(\lambda)\cos\theta_z) \quad (4)$$

其中 u 表示反射率还未经大气校正。

由式(3), $L_{s\lambda}$ 可由星上或地面定标结果求得; $E_0(\lambda)$ 可由探测器响应函数计算求得; θ_z 由日期和时间计算得; θ_v 可从数据头文件中读出。因此要解决 $\rho_{g\lambda}$, 还有 4 个未知数: $\tau_{z\lambda}$ 、 $\tau_{v\lambda}$ 、 $L_{d\lambda} \uparrow$ 、 $E_{d\lambda} \downarrow$ 。该 4 个未知数可通过大气辐射传输模型进行模拟估算。由式(3)还可看到,象元间的多次散射影响也没有考虑,该影响可降低象元间的反差,但由于邻界作用是相当复杂的且计算量大,而常常被忽略。地形因子也没有考虑,对研究区地形不复杂的地区也可忽略。

2 实验

1995 年 7 月 15 日 SPOT-2 对 La Crau 场和附近的 Camargue 应用研究区扫描成像,扫描宽度为 60km,每行扫描象元为 6000 个。该影像既有地中海域、阿尔卑斯山区、罗拉河,也有湖水、池塘、各种小田块等,形成明显的空间变化和辐射反差。SPOT-2 的 HRV 遥感器分 4 个通道(绿波段 XS1: $0.5 \sim 0.59\mu\text{m}$; 红波段 XS2: $0.61 \sim 0.68\mu\text{m}$; 近红外波段 XS3: $0.79 \sim 0.89\mu\text{m}$)和全色波段($0.51 \sim 0.73\mu\text{m}$)。每次扫描时遥感器几何参数及太阳参数如下:太阳观测角(θ_z) 25.2° ; 太阳方位角(ψ_z) 145° ; 遥感器观测角(θ_v) 3.6° ; 遥感器方位角(ψ_v) 102° 。

La Crau 场地光谱反射率测量是用 SPOT 模拟辐射计进行的。此辐射计是针对 SPOT 定标而设计的,它的 3 个通道的光谱范围及带宽与 SPOT 可见光 3 通道一样。在 SPOT 过顶时,两台模拟辐射计同时在 $400\text{m} \times 400\text{m}$ 的定标区按照一定的统计规则布点进行光谱测量,每台测量约 100 次。根据场地状况共测量 205 个点;测得 La Crau 场相应 SPOT XS1 的反射率为 14.84%(均方差为 1.60);相应 XS2 的反射率为 21.33%(均方差为 2.23);相应 XS3 的反射率为 30.42%(均方差为 2.16)。

3 数据处理与分析

在本次实验中,依据 La Crau 定标场,利用同步测量的地面光谱、大气及太阳参量和 6S 大气辐射传输模型,对 SPOT-2 HRV 原始数据进行了绝对辐射定标。SPOT HRV 3 条通道 XS1、XS2、XS3 的定标系数分别为 2.0、1.478、1.643 $[DC/(W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr))]$,相应定标不确定度为 8.44%、7.60%和 8.37%^[4]。

利用 La Crau 核心区反射率与 SPOT 图像象元值 DC 对应来验证本方法的可行性和有效性。该区几乎近于星下点,空间均匀平坦,其测量的地面光谱反射率也比较客观真实,并且由原始图像很容易提取平均 DC 值。该区包括至少 10×10 个象元,其均匀性通过其图像的 DC 值来检验,最后得到平均的 DC 值分别为 XS1:147.4(均方差 5)、XS2:120.9(均方差 4)、XS3:123.5(均方差 4)。

用定标系数将原始 DC 值转换为大气层顶太阳辐亮度 L_{da} ; $E_0(\lambda)$ 由探测器响应函数计算; θ_z 由日期和时间计算; θ_s 从数据头文件中读出; HRV 入瞳处的地物表观反射率 ρ_{gda} 由式(4)计算。

关键是程辐射 $L_{da} \uparrow$ 的求解。由 DOS 模型理论,程辐射 $L_{da} \uparrow$ 由图像直方图下限值决定。直方图由非零 DC 值开始,逐渐随象元个数增高。该直方图的下限值被假定为该光谱段向上程辐射量和暗体反射辐射量之和。因此,程辐射为暗体目标(水体、阴影等)辐射亮度减去暗体表面反射的贡献。暗体反射率如何假设一直是困扰 DOS 方法研究者的难题和该方法的主要误差源。水的光学特性变化相当大,据光谱测 A_z 量,相应 HRV XS1、XS2、XS3 3 波段,纯水的反射率分别为 2.9%、0.59%、0.04%;在自然条件下,清洁水的反射率为 2.6%、0.85%、0.25%^[5];清洁海水的反射率为 5%、4%、0^[6];清洁湖水的反射率为 7.6%、5.6%、2.2%^[7]。因此,在利用 DOS 方法时,应根据实际情况而定。另外,在研究区内也许有阴影存在,这就要求在利用 DOS 方法时,对选择的直方图下限值要与图像中的水体的象元值相比较,以确定该下限值是否可能为水体所致。一般情况下,阴影区的象元值比自然水体的要小得多。众所周知,即使在晴朗的天气里用精密的野外光谱仪对阴影区进行光谱测量,由于其光照度不足,也很难测得反射率值,往往只是一些噪声。由此可想到高空中的遥感器对阴影区的反射光也很难有所反应。在本研究中,在 ENVI2.5 图像处理系统上,对 $6000L \times 6000P$ 的 SPOT 图像上的海水、湖水、河水进行直方图的提取,从图像中提取对应 HRV XS1、XS2、XS3 3 波段直方图的下限值(DC)分别为(79、28、14)、(67、28、12)、(70、31、20)。但整幅图像的直方图下限值为(30、15、1),而且该象元处在山区内。再与水体象元值比较,有理由认为该下限值对应的暗体为阴影区。由于对应 XS3 的直方图下限值为 1,暗体(阴影区)在该波段几乎既无程辐射,也无反射作用。由此可推理暗体的反射作用对 XS1、XS2 影像也很难产生影响。那么暗体的反射率设为 0 应比较合理。这样,程辐射直接由直方图下限值决定。

τ_{za} 、 τ_{za} 和 $E_{da} \downarrow$ 可根据 DOS 模型计算的 $L_{da} \uparrow$ 值,利用大气辐射传输模型模拟大气状态,从而推导出 τ_{za} 、 τ_{za} 和 $E_{da} \downarrow$ 。由于程辐射在短波区较大,一般以 XS1 对应的程辐射计算比较合理。但是本文的具体算法:对于 Lowtran-7^[8]和 Modtran-3^[9],首先利用其内设大气

模型模拟 $L_{da} \uparrow$ 值,并与计算的相应 XS1 波段的 $L_{da} \uparrow$ 值相比较,以最接近为基准,确定最合适的大气模式进行模拟,相应的 τ_{za} 、 τ_{za} 和 $E_{da} \downarrow$ 不再推算,而是将要反演的地物对应的 L_{sa} 代入已选定大气模式的 Lowtran-7 和 Modtran-3 直接推算 ρ_{ga} . 本文计算对应的大气模式对 Lowtran-7 和 Modtran-3 都为中纬度夏季模式. 对于 6S^[10], 首先由 6S 模拟大气状况,寻找与计算的程辐射对应的大气气溶胶光学厚度值,然后根据 L_{sa} 直接推算 ρ_{ga} . 6S 选取大陆型气溶胶和中纬度夏季大气模式.

表 1 为 La Crau 场地反演的反射率结果与实际测量反射率的比较. 以 $(\rho - \rho_{ga})$ 来评价各方法的有效性(图 1),并用 $|(\rho - \rho_{ga})/\rho| \times 100\%$ 来估算各方法的不确定度(表 2). 由表 1、表 2 和图 1 可看出:①对 SPOT XS1、XS2、XS3 3 波段,仅用 DOS 方法的大气校正是无意义的. 对应 XS1、XS2、XS3 3 波段未经大气校正的 La Crau 场地表观反射率比实测值都偏低,由式(3)和式(4)可知,不论程辐射设为多大,仅由 DOS 方法进行大气校正反而使反演的反射率与实测的反射率的差值加大. 说明大气辐射校正对于 SPOT 数据仅考虑程辐射

表 1 La Crau 场地的反射率反演值与实测值的比较

	XS1	XS2	XS3
DC(原始数据象元均值)	147.4(均方差 5)	120.9(均方差 4)	123.5(均方差 4)
ρ (实测反射率%)	14.84(均方差 1.60)	21.33(均方差 2.23)	30.42(均方差 2.16)
ρ_{ga} (卫星表观反射率)	12.37	18.03	25.10
ρ_{ga} (Lowtran-7 反演)	13.10	19.79	27.36
ρ_{ga} (Modtran-3 反演)	13.96	20.35	28.06
ρ_{ga} (6S 反演)	13.82	20.12	28.55
ρ_{ga} (DOS 反演)	10.19	16.05	25.10

表 2 各基于图像方法反射率反演结果的不确定度分析 $(|(\rho - \rho_{ga})/\rho| \times 100\%)$

大气校正方式	XS1	XS2	XS3
表观反射率(未校正)	16.67	15.47	17.49
Lowtran-7 大气模拟法	11.73	7.22	10.06
Modtran-3 大气模拟法	5.93	4.59	7.76
6S 大气模拟法	6.87	5.67	6.15
DOS 方法	31.3	24.1	17.49

是不够的,程辐射未必是 SPOT 数据大气校正的主要对象. 这也许是 SPOT 无蓝波段,程辐射在绿波段以后逐渐减弱,而大气吸收影响逐渐增强的原因. ②利用 DOS 方法与 Lowtran-7、Modtran-3、6S 大气模拟相结合,对 XS1、XS2、XS3 3 波段都表现出大气校正结果比未校正的表观反射率要好得多,表明本方法的有效性. 这也说明大气校正对 SPOT XS1、XS2、XS3 数据来说,大气透过率和天空光向下漫射辐射等也是非常重要的因素. ③

从反射率反演不确定度看,用大气辐射传输模型进行大气模拟和 DOS 方法相结合,其不确定度基本上保证在 10% 以内,该精度已满足目前大部分定量遥感应用的需要. ④本研究基于图像的方法所得结果与实测的差异不仅由于定标精度、光谱测量误差的影响,而且辐射传输方程和邻边效应等因素也会产生一定的影响. 若要定量地描述各种因素对结果精度的贡献大小,还需要作深入细致的研究工作. ⑤从不同波段的校正结果看,对于 XS1 波段,用 Modtran-3 大气模拟和 DOS 方法相结合的效果较好;对于 XS3 波段,用 6S 大气模拟和 DOS 方法相结合的效果较好;用 Lowtran-7 大气模拟与 DOS 方法相结合对于 HRV XS1、XS2、XS3 各波段都不如用 6S、Modtran-3 好,这也许是模型本身精度所致,因为 Lowtran-7 运算精度为 20%,Modtran-3 和 6S 运算精度为 5%。尽管该研究结果是相对于 La Crau 场进行的,但是大气混浊程度、背景反射、场地大小以及大气辐射传输模型的计算精度等因素将在反射率反演中不可避免地引入一定的固有误差。

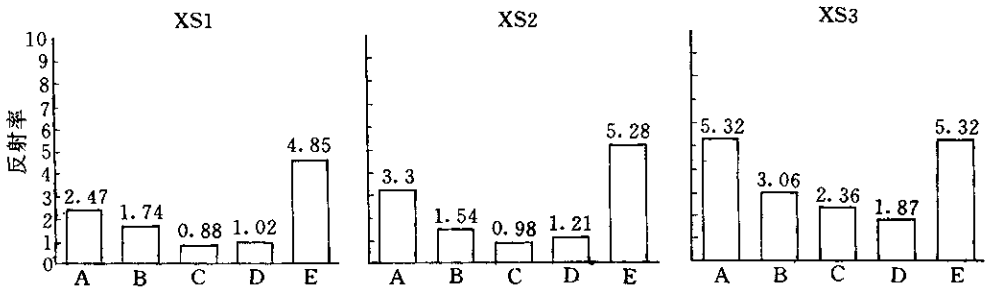


图 1 各种大气校正方法反演的反射率与实际测量值的差值分析

(A: 表观反射率(大气未校正) B: Lowtran-7 校正 C: Modtran-3 校正 D: 6S 校正 E: DOS 校正)

4 结 论

(1) 本文研究的基于遥感影像进行大气辐射校正和反射率反演方法, 经济实用、可操作性强。

(2) 在利用 DOS 方法求解程辐射时, 暗体反射率的假设是关键. 这不仅关系到程辐射的校正, 而且关系到其它大气因素的校正, 如大气透过率、天空光向下漫射辐射等. 因此, 在实际研究中, 对研究区的概况有所了解是必要的, 而且最好对暗体(水体、阴影等)的反射率有一定的先验知识。

(3) 仅用 DOS 方法对 SPOT 数据进行大气校正是不够的, 程辐射对 SPOT 数据的影响未必是大气影响最主要的因素。

(4) 大气透过率、天空光的漫射辐射影响对 SPOT 影响不可忽视, 用多级散射辐射传输模型作大气校正和反射率反演是必要的。

(5) 对不同光谱段的 SPOT 数据要注意选择合适的大气校正模型。

致谢: 感谢法国农科院生物气候实验站的顾行发博士和 G·Guyot 教授对本研究的支持和指导。

参 考 文 献

- 1 Ahern F J, Goodenough D G, et al. Use of clear lakes as standard reflectors for atmospheric measurements in Proc. 11th Int. Symp. On Remote Sensing of Environ., Ann Arbor, MI, 1977, 731~755.
- 2 Chavez P S Jr. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sens. Environ.*, 1988, 24: 459~479.
- 3 Slater P N. Remote Sensing-Optics and Optical Systems. Addison-Wesley, Reading, MA, 567~575.
- 4 田庆久. SPOT 地面场定标与星上定标结果的比较分析. *遥感学报*, 1998, 2(1): 13~18.
- 5 Suits G H. The Infrared Handbook. Revised Editioned by Wolfe and Zissis, The Infrared Information Analysis Center, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan. 1985. 99~103.
- 6 Viollier M. Teledetection des concentrations de seston et pigments chlorophylliens contenus dans l'Océan, These de doctotat d'Etat, no 503, 1980. 54.
- 7 Kondratyev K Ya. Radiation in the atmosphere. N. Y, U. S. A: Academic Press, 44~48.
- 8 Kneizys F X, Shette E P. Atmospheric Transmittance/Radiance, Computer Code LOWTRAN7, AFGL Hanscom AFB, Bedford, MA, 1989.
- 9 Anderson G P and Wang J. MODTRAN3: An updata and recent validations against airborne high resolution interferometer measurements. Proceedings of the 5th Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, AVIRIS Workshop Passdena, California, 23~26, January 1995, JPL Publication. 1995, 1(1): 5~8.
- 10 Tanre D, Deroo C, Duhaut P, et al. The Second Simulation of the Satellite in the Solar Spectrum(6S) User Guide. U. S. T. de Lille, 59655 Villeneuve d'aseq, France; Laboratoire d'Optique Atmospherique, 1986.

IMAGE-BASED ATMOSPHERIC RADIATION CORRECTION AND REFLECTANCE RETRIEVAL METHODS

Tian Qingjiu Zheng Lanfen Tong Qingxi

(Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract

The image-based atmospheric radiation correction and reflectance retrieval approach were developed using the SPOT HRY data from La Crau radiant calibration site in July 1995. The approach was based on DOS method to calculate the path radiance with the reasonable dark-object reflectance choice. The atmospheric transmittances, the downwelling atmospheric irradiance and atmospheric attenuation were inferred from several atmospheric radiative transfer codes (Lowtran-7, Modtran-3, 6S) with simulated atmosphere. At last the approach was evaluated by comparing surface reflectances measured from La Crau site with that derived from SPOT data.

Key words: Remote sensing image Radiative calibration Atmospheric radiation correction Reflectance retrieval