

PHI 成像光谱图像反射率转换

刘建贵 吴长山 张 兵 郑兰芬 童庆禧

(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

摘 要 遥感数据的反射率转换基本上可以分为3种:第1类方法利用辐射传输方程建立大气传输模型;第2类基于图像本身,求出相对反射率;第3类是参照已知地物的反射率及反射辐射,求出图像 DN 值与反射率之间的经验关系。通过对几种遥感数据反射率转换方法的分析,采用经验线性法对机载成像光谱仪 PHI 数据进行了反射率转换,并对转换结果进行了分析。

关键词 反射率转换,经验线性法,定标

1 引 言

近年来随着遥感技术的发展,利用遥感数据进行地表物理参数的反演及遥感定量化的趋势越来越明显。成像光谱技术的出现,能够在众多窄波段连续对地物进行成像,使得对地物的直接识别成为可能。人们为研究地表物质的光谱响应行为,长期以来进行了大量的地面光谱测量,建立起了地物标准光谱数据库,使我们有可能通过光谱匹配技术从图像直接识别地物覆盖类型。为此,有必要将遥感器获得的辐射亮度 DN 值转换为反射率值。太阳光线通过大气传播到地面,与其发生作用,又通过大气传播到遥感器,受到大气的影。因此反射率的转换事实上就是通过大气校正来实现定标,定标是定量遥感的基础。大气的影表现在两个方面:程辐射与交叉辐射。程辐射是一个全局效应,对稳定大气条件可以认为是均匀分布叠加于整个图像;交叉辐射是一个局部效应,可以认为主要是临近像元的影响,其结果是图像的边缘变模糊,可以用大气的点扩散函数来近似。点扩散函数的确定主要有蒙特卡罗模拟方法和辐射传输方法^[1,2]。通过分析几种常用的反射率转换方法,结合地面实测光谱数据,利用经验线性法对 PHI 机载成像光谱仪遥感数据进行了反射率转换。通过比较地面实测数据与计算结果,发现这种方法的绝对误差一般小于5%。

2 反射率转换方法

首先,对几种反射率转换方法进行概述,并对它

们进行综合比较。

2.1 利用辐射传输方程进行大气辐射传输校正^[3-5]

大气削弱和散射的乘性和加性效应以及太阳光谱形状等的影响可以利用辐射传输模型来确定。针对不同的成像系统以及条件发展出多种大气校正模型,利用 LOWTRAN 7 进行反射率反演的模型为:

$$R = (L - L_0) / L_X \quad (1)$$

其中, R : 像元某一波段的反射率; L : 相应的 DN 值; L_0, L_X : 由 LOWTRAN 7 所计算的 0 反照度表面的程辐射及 100% 反射的朗伯体表面的反射辐射。这种方法需要知道经纬度坐标,数据获取时间,光学厚度,大气水分含量等参数。

2.2 利用图像本身来做反射率反演

这类方法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

图像 DN 值除以整幅图像波段平均值。

平场域法

在图像中找到一块亮度高而光谱响应曲线变化平缓的区域,图像 DN 值除以该区域的均值光谱响应。

对数残差法

其主要意义是消除光照及地形因子的影响^[6]。

$$\text{设: } DN_{ij} = T_i R_j I_j$$

DN_{ij} : 像元 i , 波段 j 的灰度值; T_i : 像元 i 处表征表面变化的地貌因子,对确定的像元所有波段相同; R_j : 波段 j 中像元 i 的反射率; I_j : 波段 j 的光照因子。

如设: DN_i 表示像元的所有波段几何均值, DN_j 表示波段 j 中所有像元的几何均值, $DN_{..}$ 表示所有波段所有像元的几何均值。

$DN_j/DN_{..}$ 表示 DN_j/DN_i 对一个波段中所有像元的几何平均值。

$$\text{则: } (DN_j/DN_i)/(DN_j/DN_{..}) = Y_{ij} \quad (2)$$

Y_{ij} 消除了地形因子与光照因子的影响。

2.3 借助地面特殊地物的已知光谱反射率来反演地物反射率

混合光谱法

混合光谱法大多是用来进行混合像元的分类。采用线性混合光谱模型以及一些地物的已知反射率响应, 可用来进行反射率反演。设从图像上找到了 C 类纯像元即最终光谱单元类型, 其光谱反射率已知为 R_n (n 表示最终单元序号), 对应的辐射量为 L_n , 则有:

$$b + kL_i = \sum_{n=1}^C f_{n,i} R_n + E_b \quad (3)$$

其中: E_b 为误差; k 和 b 为波段的增益与偏移; L_n 为光谱辐射值; $f_{n,i}$ 为最终单元在像元中的百分比, 满足: $\sum_{n=1}^C f_{n,i} = 1$ 。 $k, b, f_{n,i}$ 未知。选出最初的最终光谱单元, 求出 $f_{n,i}$ 及误差 E_b ; 换选最终光谱单元迭代求解直到 E_b 达到较小的值, 并且 $f_{n,i}$ 的值比较合理。然后可以求出所有像元的光谱反射率。

经验线性法

假定 DN 值与反射率值间存在线性关系

$$DN = kR + b \quad (4)$$

通过已知光谱行为的地物反射率及光谱辐射亮度值, 求出系数 k, b , 得到 DN 值与反射率 r 之间的关系式, 进行像元灰度的反射率转换。

利用图像本身做反射率转换的方法, 如内部平均法, 平场域法, 对数残差法等, 尽管简单, 不需要其它数据, 然而所得到的只是反射率的相对值, 与绝对意义的反射率在概念上是不同的。辐射传输方法理论较为成熟, 但具体使用起来需要知道大气参数及其它有关数据, 比较复杂; 对航空遥感系统来说, 姿态不稳定, 没有实时大气参数测试记录, 难以使用。混合光谱法对最终光谱单元的选择要求严格, 其精度依赖于最终单元的质量, 需要通过选择-检验误差-重选的迭代过程以确定最终光谱单元。在北海市航空遥感成像的同时, 进行了地面同步测量, 有丰富的实测光谱数据作辅助。一方面由于人工因素, 总会存

在地物类型均匀的地块, 另一方面, 空间分辨率高, 在图像上能够精确定位地面测验点, 且像元纯度高, 利用经验线性法十分有利; 而且, 在完成反射率转换以后, 就可以实测地物光谱作为最终单元进行匹配识别, 不需另选训练区。因此采用经验线性法进行反射率转换是可行的, 有效的。

3 数据描述

推帚式成像光谱仪(PHI)可以在可见-近红外波段 244 个通道成像, 光谱分辨率小于 5nm。1997 年 10 月对北海市进行了 16 个波段的飞行扫描, 获得了 17 个条带数据。飞行高度 2km, 地面分辨率约为 2m。与飞行同时, 进行了地面反射率同步测量, 所用仪器为 SE590 野外光谱仪, 其测量范围为 0.4—1.1 μ m, 包括了所有 16 个波段的扫描波长范围, 光谱分辨率高, 利于应用于高光谱分辨率成像光谱遥感图像的处理分析, 且视场角较小, 可减小背景因素的影响。测量地点在北海大道与屋仔村路交汇处, 疏港大道与贵州路交汇处, 北部湾广场, 北海大道以东、南北大道以北、振华公司附近等地。在几个测量点中, 北部湾广场地物类型多而且地物分布较为均匀, 获得的地面实测数据具有较好的可重复性。主要地物类型为: 石灰屋顶、土壤、石英地砖、水泥广场、灰色大理石、马尼拉草、美人蕉、榕树、水体等类型。因此, 利用经验线性法, 以该处作为实验区, 进行反射率转换。

4 利用经验线性法进行反射率转换

PHI 推帚式面阵 CCD 成像光谱仪垂直于地面获取数据, 其总视场角为 21°。为了突出主要问题, 假定地表为近似朗伯反射体, 这种假设在遥感研究中广泛应用。考虑大气效应的存在, 遥感器接受到的 DN 值由下式几部分组成:

$$DN = L_S + L_0 + L_D \quad (5)$$

其中: $L_S = L_g \times t$ = 地面辐射 \times (大气透射率 + 仪器增益参数); L_0 : 程辐射 + 传感器漂移; L_D : 交叉辐射。

4.1 大气交叉辐射影响校正

交叉辐射项是由于大气的散射效应, 临近像元的反射进入目标像元的光路被传感器接受引起的, 其效果是图像变模糊, 目标像元的光谱响应混合了

临域像元的光谱行为。交叉辐射影响具有局部性,通常通过求大气点扩散函数来消除。设点扩散函数为 $h(x, y)$, $g(x, y)$ 为交叉辐射影响下的图像, $f(x, y)$ 为没有交叉辐射影响的理想图像, 则有:

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y)$$

在求得点扩散函数 h 以后, 根据原始图像 g 通过图像恢复手段即可求出 f 。点扩散函数的形式较为复杂。胡宝新等^[1]利用辐射传输近似的方法, 通过分析传感器, 目标像元与临近像元之间的几何关系分别求出在一定的光照条件下, 目标像元与临近像元对传感器所接受的辐射量的贡献, 这样得出的数值图像解作为点扩散函数, 并与蒙特卡罗方法得出的结论进行了比较。结果表明点扩散函数依赖于临近像元和目标像元之间的距离和相对方位以及大气状况等。该文还利用所求出的点扩散函数数值解对交叉辐射的影响进行了消除, 这里不再详细介绍其细节, 直接应用该方法获得了消除交叉辐射影响的图像 DN' 。 DN' 本质上是辐射量, 我们的目的是根据地面同步测量数据将它反演成反射率值。

4.2 反射率转换

消除了交叉辐射影响以后的图像 DN' , 还要对程辐射与仪器漂移等的影响予以校正。对式(5)的前两项有:

$$DN' = L_S + L_0 = L_g \times t + L_0$$

假定地面辐射亮度与反射率之间有线性关系:

$$L_g = KR + b_0$$

综合两式有:

$$DN' = KR + b \quad (6)$$

若已知两种地物的波段光谱响应 DN' 值及反射率 R , 即可求出 K, b 值, 得到 DN' 值与反射率值之间的关系。实际中, 选用了 5 种地物: 灰色大理石、水体、植被、地砖、土壤, 利用最小二乘法来求 K, b , 步骤如下:

(1) 求 DN' 值: 参照实物照片在图像上选定 5 种地物的样区, 求出图像中该类地物的灰度平均值 DN' 。

(2) 对实地测量的反射率光谱曲线, 根据数据获取波段波长及响应函数进行光谱重采样, 获得地物对应于成像波段的地面反射率值。

(3) 利用最小二乘法求出 K, b :

$$K = \frac{N \sum (DN_i R_i) - \sum R_i \sum DN_i}{N \sum R_i^2 - \left(\sum R_i \right)^2} \quad (7)$$

$$b = \frac{\sum DN_i R_i - K \sum R_i^2}{\sum R_i} \quad (8)$$

这样求出的 K, b 对不同的波段有不同的值, 其结果见表 1, 表中的动态范围表示该波段数据最大值与最小值之差。

(4) 对图像数据进行反射率反演。

表 1 线性拟合系数以及 DN 值动态范围

Table 1 Factors of linear regression and the dynamic range of DN values

波段	1	2	3	4	5	6	7	8
K	15.1691	27.0788	31.3903	34.6309	37.6837	40.4143	28.9231	25.8388
b	860.650	1037.15	1189.28	1303.88	1327.45	1370.83	1033.53	981.670
动态范围	1224	2356	2969	3279	3377	3464	3113	2810
波段	9	10	11	12	13	14	15	16
K	20.4993	19.5120	10.8624	13.6253	15.4067	6.65676	2.05756	1.27330
b	946.697	1036.72	845.218	1008.40	1057.69	783.968	680.963	673.013
动态范围	2311	2243	1212	1439	1549	721	254	191

利用前面求出的系数将像元灰度值按(6)式转换为对应的反射率。

为了对反演结果进行评价, 从处理后的图像上选取各种地物对应的测验点, 提取出其反射光谱; 将地面实测光谱曲线按照数据通道响应函数重采样得出标准光谱, 通过比较两者进行误差分析。各个波

段的平均绝对误差见表 2, 绝对误差小于 5%。

图 1 是所选地物的平均灰度值曲线, 图 2 是采用最常用的内部平均法得出的相对反射率光谱曲线。经验线性法得出的这几种地物的反射率曲线见图 3; 图 4 是它们对应的地面实测光谱重采样结果。比较图 3、4, 观察到波形非常相近。

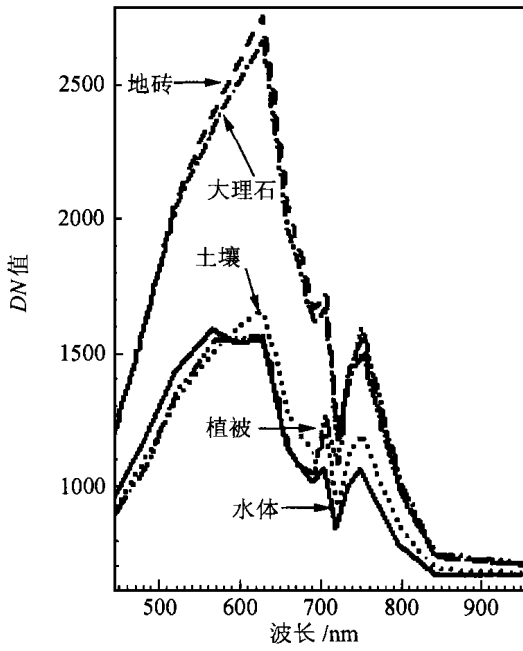


图 1 几种地物的测量反射辐射 DN 值

Fig. 1 DN values of several land cover type measured

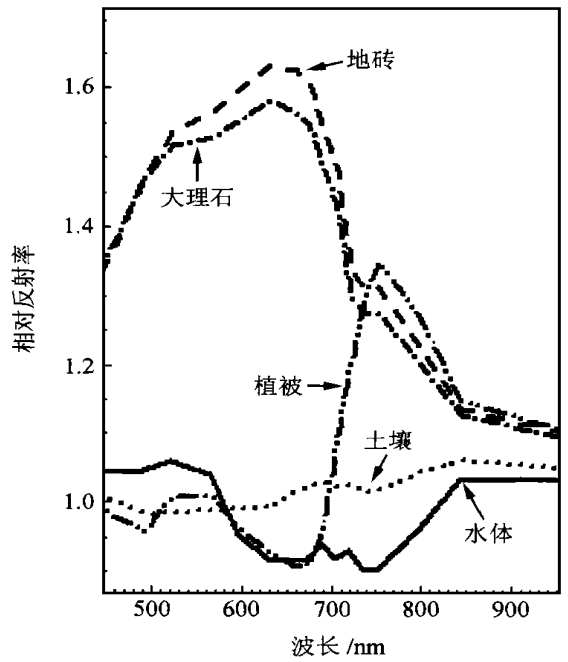


图 2 内部平均法得出的相对反射率

Fig. 2 Acquired relative reflectance by IAR

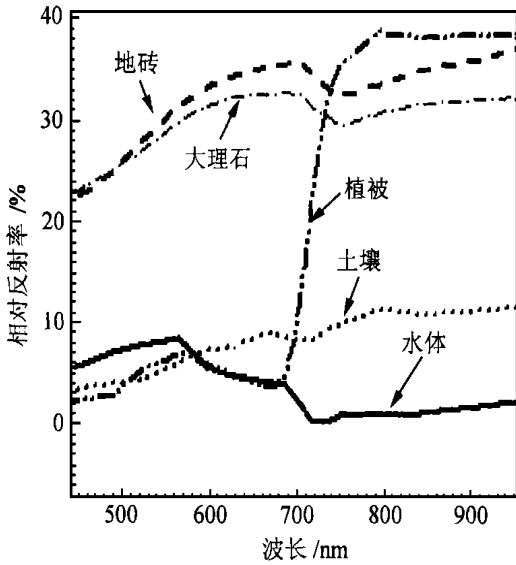


图 3 经验线性法得出的反射率值

Fig. 3 Acquired relative reflectance by empirical linear

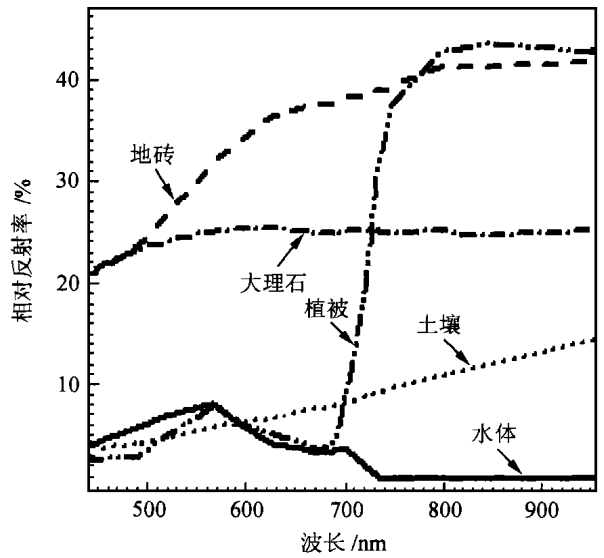


图 4 实地测量反射率光谱重采样

Fig. 4 Field measured spectral reflectance resampled according to response functions of PHI

表 2 经验线性拟和结果与野外测量值的比较: 绝对误差

Table 2 Reflectance comparison as difference between empirical linear method and field measurement

波段	1	2	3	4	5	6	7	8
误差	1.00995	0.661816	1.09362	2.06543	2.46171	3.08026	3.30363	3.29302
波段	9	10	11	12	13	14	15	16
误差	3.40529	3.425490	3.69053	3.67178	4.05931	4.76613	4.94126	4.70106

5 分析和结论

本文总结和比较了几类遥感图像反射率转换方法,在此基础上,提出利用地面同步测量的反射光谱,进行 PHI 成像光谱数据反射率转换。通过比较图 2,3,4 可以看出,经验线性法反演出的反射率值与实际的反射率值相当吻合,误差比较小,跟内部平均法得出的光谱曲线相比较,能更贴切地反映地物的光谱响应行为。

所选地面实验点位于北部湾广场,图斑大而且均匀,产生误差的可能来源是:仪器的系统误差,点扩散函数计算中的近似,野外光谱仪与遥感器的视场不统一,图像上的像元不是纯像元等。

利用两点线性拟合,所选地物实际光谱响应曲线应该平缓,一个对应亮体,一个对应暗体。当某个波段亮暗地物反射率差别较小时,其误差很大,这是应该注意的。

由(6)式,当 $R=0$ 时, DN 值即为 b , 所以 b 代表了程辐射及遥感器的暗电流;而 K 代表大气传输系数以及仪器响应。分析表 1, 系数 K 随动态范围单调递增,所以,根据 K 可以估计波段的动态范围。

为使图像中选取的点具有较好的代表性及光谱均匀性,选择地面实测点时,对应地物地块应该足够大,以保证图像像元的纯度。在线性回归时,必须进行光谱重采样获得对应于传感器波段的实际光谱反射率值。野外光谱仪的光谱分辨率高达 2nm , 而遥感器的光谱分辨率一般较低,所以应根据每个波段

的响应函数进行光谱重采样。

参 考 文 献 (References)

- 1 Hu Baoxin, Li Xiaowen et al. Approximate simulation study of atmospheric point spread function in optical remote sensing under big slant viewing angle. *Chinese Journal of Image and Graphical*, 1996, 1(1): 19-28. (In Chinese) [胡宝新, 李小文等. 大倾角光学遥感中大气点扩散函数的近似模拟. 中国图像图形学报, 1996, 1(1): 19-28.]
- 2 Niu Zheng, Zhu Chongguang, Wang Changyao. Analysis of atmospheric cross radiation in a slant viewing angle. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(2): 88-93. (In Chinese) [牛 铮, 朱重光, 王长耀. 斜视角度下大气交叉辐射影响分析. 遥感学报, 1997, 1(2): 88-93.]
- 3 R.S. Fraser, R.A. Ferrare et al. Algorithm for atmospheric correction of aircraft and satellite imagery. *Int. J. Remote Sensing*, 1992, 13(3): 541-557.
- 4 William H. Farrand, Robert B. Singer, Erzsebet Merenyi. Retrieval of apparent surface reflectance from AVIRIS data: A Comparison of empirical line, radiative transfer, and spectral mixture methods. *Remote Sensing Environment*, 1994, 47: 311-321.
- 5 Yoram J. Kaufman, Claudia Sendra. Algorithm for Automatic Atmospheric Corrections to Visible and Near-IR Satellite Imagery. *Int. J. Remote Sensing*, 1988, 9(8): 1357-1381.
- 6 Satoshi Tsuchida, Takayuki Odajima et al. Spectral pattern analysis for geobotanical discrimination of rock types. The Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, San Antonio, Texas, May 1994, 9-12.

作 者 简 介

刘建贵,男,生于 1967 年 10 月。1990 年毕业于清华大学电子工程系,现为中国科学院遥感应用研究所在读博士生,主要从事高光谱遥感,图像处理等方面的研究。

Spectral Reflectance Retrieval of Image Data by Imaging Spectrometer PHI

LIU Jian-Gui WU Chang-Shan ZHANG Bing ZHENG Lan-Fen TONG Qing-Xi

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

Abstract The reflectance retrieval of remote sensing data can be classified into three kinds. The first one use radiative transfer model. The second one is base upon image itself to get relative reflectance. The third method is to get empirical relationship between image DN values and reflectance of the objects by using the reflectance and radiation of the known objects. This paper first analyses these methods, and then transform the data of airborne imaging spectrometer PHI to reflectance using the empirical line method. The accuracy of the result is also presented.

Key words Reflectance retrieval, Empirical line, Calibration