

文 号: 1007-4619(2000)增-0106-05

卫星遥感影像中角度信息的分析利用

徐建春, 赵英时, 龙 飞

(中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 利用地面实测数据和 NOAA 卫星数据验证了地物的方向性反射和热点效应, 定量分析了 NOAA 数据中包含的角度信息; 利用多角度 NOAA 数据提高了地物识别精度, 研究了角度信息在遥感应用中的有效性; 最后, 分析了常规遥感数据处理过程中太阳高度角纠正对角度信息的影响。

关键词: NOAA 数据; 多角度遥感; 地物识别

中图分类号: TP702 文献标识码: A

1 引 言

通常, 在遥感应用研究中使用多波段、多时相、多传感器的数据来提高遥感对地物的识别能力。近年来, 人们越来越多地注意到角度信息可能在遥感图像识别和分类中所作的贡献。二向性反射模型 BRDF 被提出并得到人们的重视。许多研究人员致力于模型的改善与证明, 期待深入掌握能量传输过程, 以使遥感发挥更大的作用。目前这方面的工作多集中在小尺度的地物辐射传输机理的研究上, 对小尺度上地物的方向性反射、地物结构模型反演和实验模拟等进行了深入的研究, 但在对卫星遥感这种大尺度综合的数据上角度信息的研究和利用还比较薄弱。

P. Bicheron 使用航空 POLDER 测量仪获取的多角度数据, 进行了 BRDF 参数计算和分类, 证实多角度遥感图像对地物识别有更强的能力^[2]。徐希孺等人指出 NOAA-AVHRR 数据在连续若干天内存在大至 30% 的波动变化, 并用混合像元分解及地物反射模型来纠正这些由于非朗伯体效应造成的数据波动, 使之减至 5%—10%^[5]。

多角度传输机理的研究很重要, 是遥感应用的理论基础之一; 但是要真正体现多角度信息在遥感中的贡献, 终须将它应用于卫星遥感数据。本文旨在利用 NOAA-AVHRR 这种廉价、易于获得、更新

迅速的真实数据, 定量分析它是否可以体现多角度信息、是否可以用来进行多角度遥感, 以及常规 NOAA 数据处理可能对多角度信息带来的影响。

研究区选择在内蒙古中西部呼和浩特市以南、约北纬 39.5°—40.5°、东经 110°—111.5° 地区, 地处典型的中温带半干旱地区, 属农牧交错地带、草原荒漠过渡地带。研究区北部为土默川平原, 主要地面类型为农地(水浇地), 南部则以沙地和牧草地为主。由于地面类型分布比较单一, 利于用 NOAA 影像这样分辨率不高的遥感数据进行研究。

2 多角度 NOAA-AVHRR 数据

NOAA 卫星并不是被设计用来获取多角度遥感信息的, 但是由于它的扫描仪角度范围高达土 55.4°, 以及不同时间内卫星轨道的移动(星下点以大约 9.5 天为周期漂移), 对相同地理位置的像元, 从不同的时间可以获得不同观测角度的数据。另外, 不同时间内地面各处的太阳高度角也会变化, 因而通过获取不同时间内相同地区的 NOAA 图像, 人们可以获得不同的太阳入射角、不同的观测角度下的遥感图像。为了进行多角度研究, NOAA 数据的采集要求获取影像的时间区间短并且基本连续, 以保证相同的地面及大气条件, 还要求不同 NOAA 影像间的精密配准。

我们采集了研究区内 1999 年 8 月 7 日至 16 日

收稿日期: 1999-12-15; 修改日期: 2000-08-10

基金项目: 国家“九五”攀登预选项目(95-预-38)和国家重点基础研究发展规划项目(G2000077900)

作者简介: 徐建春(1976—), 男, 1997年毕业于北京大学城市与环境学系。现为中国科学院研究生院硕士研究生, 主要从事遥感和GIS方面的研究工作。

连续 10 天的 NOAA 数据，从中选择了比较清晰的 3 景图像，拍摄时间分别为 9 日 14 时、10 日 14 时、12 日 16 时，以下简称为 A、B、C 图像。根据实际资料可以认为，在这连续数天内，研究区的地面及大气状况基本没有变化。我们利用地面控制点配准法对所有的数据进行了几何精纠正，使像元误差控制到 0.5 个像元以内。选择研究区为 150*100 个像元大小。

3 热点效应

前人已经发现，地物的非朗伯体反射在入射光方向最强。Hafizur Rahman 等人提出如下的地气耦合模型来描述方向性反射现象：

$$\rho_s(\theta_1, \phi_1; \theta_2, \phi_2) = \rho_0 \frac{\cos^{k-1} \theta_1 \cos^{k-1} \theta_2}{(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)^{1-k}} F(g) [1 + R(G)] \quad (1)$$

其中，用一个类型函数 $[1 + R(G)]$ 来表示热点效应，

$$1 + R(G) = \frac{1 - \rho_0}{1 + G} + 1$$

$$G = [\tan^2 \theta_1 + \tan^2 \theta_2 - 2 \tan \theta_1 \tan \theta_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中， ρ_0 为地表经验参数， G 为几何因子， ϕ_1 为太阳方位角， ϕ_2 为观测方位角， θ_1 为太阳天顶角， θ_2 为观测天顶角，当存在关系 $\theta_1 = \theta_2$ ， $\phi_1 = \phi_2$ 时， $G = 0$ ， $R(G)$ 和反射 ρ_s 达到最大值，此时称为“热点”。

当入射光和观测方向在同一个主平面上时， ϕ_1 和 ϕ_2 之差为 0° 或 180° ，因此式 (2) 中 $\cos(\phi_1 - \phi_2) = 1$ 或 -1 ，对角度我们只需要考虑太阳光入射角和观测角。我们测量数据的太阳天顶角多为 $35^\circ - 60^\circ$ ，据式 (2) 作出当太阳天顶角为 40° ，观测角 $-90^\circ - 90^\circ$ 内（以入射光方向为正方向） $1/(1+G)$ 的图形如图 1。

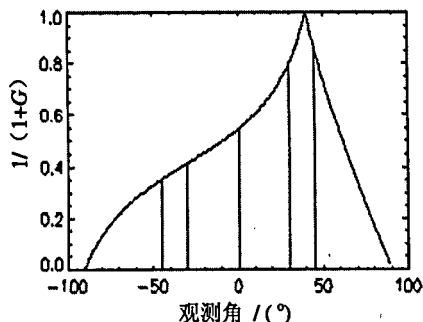


图 1 热点效应项曲线（太阳高度角 40° ）

Fig.1 Hot-spot item value with sun azimuth angle of 40 degree

我们于 1999 年 7 月 6 日至 13 日对研究区进行了地面实况调查，并测定了典型地类多角度反射光谱数据。我们使用野外多光谱测量仪 SE593（光谱范围 $0.4 - 1.1 \mu m$ 、分辨率 $2.5nm$ 、视场角 15° ），选择了完全自然状态的地物——沙地、盐碱裸地、农作物（玉米、向日葵、小麦）、各种草类等进行测量。对每一类地物，分别从迎光方向（ $\theta_1 - \theta_2 > \pi/2$ ）和背光方向（ $\theta_1 - \theta_2 < \pi/2$ ）测量了 45° 和 30° 的反射，也测量了从正上方（ 0° ）的反射值。测量结果如图 2 所示（以太阳天顶角方向为正方向，观测角分别为 -45° 、 -30° 、 0° 、 30° 、 45° ）。

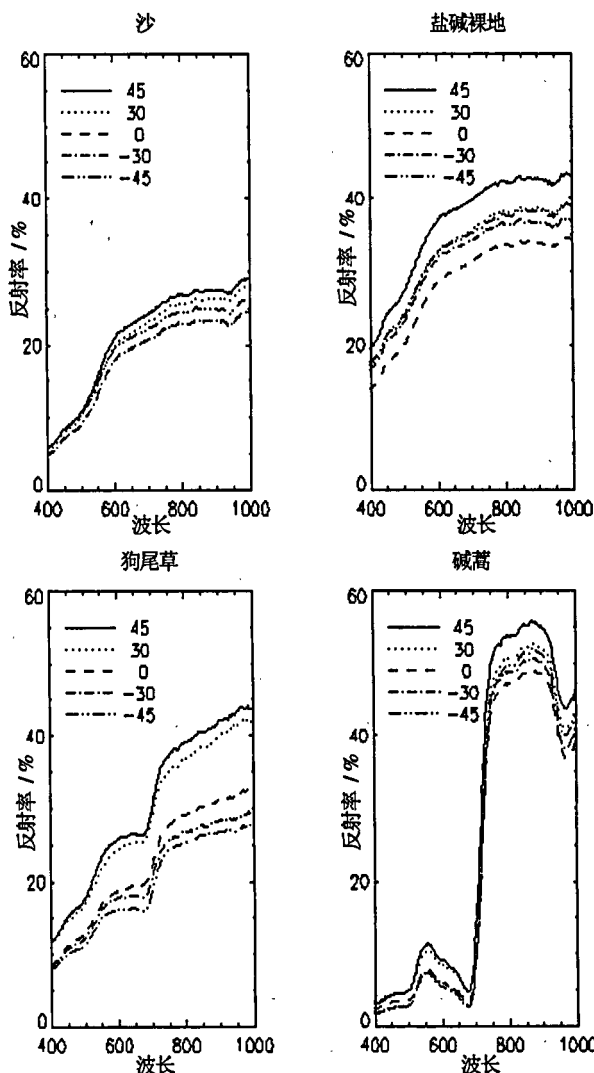


图 2 典型地类多角度反射

Fig.2 Directional reflectance of typical ground objects

由图 2 可见，在波长区间 368 至 $1039 \mu m$ 内，地物均表现出热点效应，越靠近太阳光入射方向，观测的反射值越大，几种地物基本上都是 45° 反射值最大， 30° 次之，迎光面（ -45° 、 -30° ）反射值较小，这和根据 Hafizur Rahman 地气耦合模型绘制的

图 1 刚好吻合。另外注意到我们测量的多角度反射中很多地物类型在垂直方向 (0°) 的反射值是最小的, 而图 1 的曲线并不是这样, 原因是图 1 没有考虑模型中其它与角度有关的项 (见式(1)), 所以并不能完整地反映热点效应。根据龙飞等对模型的详细计算, 以及 Wolfgang Wanner、倪文革、李小文等人的研究, 的确有很多地物类型的方向性反射在垂直方向比较小, 这和我们的测量值是一致的。另外我们看到, 不同观测角下反射值的大小关系并不是一个简单的倍数关系, 不同的地物、不同的波长下差别不一。这和非朗伯体反射及热点效应理论非常吻合。

那么, 对于一个像素对应地面 1km² 的 NOAA 影像, 是否也能反映这种不同角度带来的影响呢? 从卫星数据中我们可以计算出影像上研究区中心点观测角。我们查阅当日太阳赤纬, 利用公式

$$\alpha = \arccos(\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos h) \quad (3)$$

(式中, α 、 δ 、 ϕ 、 h 分别表示太阳天顶角、太阳赤纬、地理纬度、相对太阳时角^[7]) 计算出研究区中心点太阳天顶角。A、B、C 3 幅图像的角度关系如图 3 所示。我们对 3 幅图像的两个波段 (可见光和近红外) 进行统计, 结果见表 1。

表 1 3 幅图像各波段及典型地类平均反射值

Table 1 Average reflectance of various bands and typical ground objects

波段	全图	水浇地	草地	裸地	沙漠
A1	8.888389	7.403594	8.803247	9.277943	11.87288
B1	8.613717	7.065834	8.327647	8.976943	11.9352
C1	12.67017	10.48955	13.67527	12.79813	13.6785
A2	12.41329	13.41626	11.27691	12.84411	14.38174
B2	12.08809	13.03604	10.75719	12.48276	14.43629
C2	14.93867	14.82422	15.07654	15.0162	14.65909

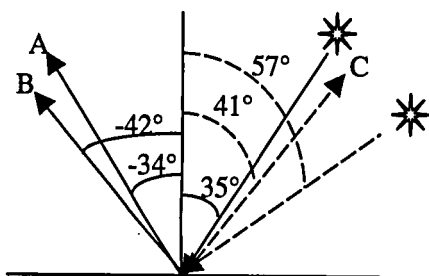


图 3 3 幅图像角度图

Figure 3 Directions of 3 images

比较图 3、表 1 可见, C 图像观测角和太阳入射光夹角最小, 处于热点效应区, 两个波段 (红波段、近红外波段) 反射平均值均最大; A 图像观测角和太阳入射光夹角较 B 图像小, 对应在图像上, A 图像平均值在两个波段上都比 B 图像大。这些差异和图 1 显示的热点效应曲线也是非常一致的。各类典型地物也存在同样的差别。总体看来, NOAA 影像明显地反映出方向性反射引起的差异, 并且和热点效应现象吻合得很好。

由此可见, 小尺度的实地观测中表现的方向性反射特性, 在 NOAA 数据 1km 分辨率的尺度下也得到了很好的表现, 这说明 NOAA-AVHRR 数据的确包含着方向性反射所带来的影响。传统的遥感应用并未考虑这种影响, 认为地物的反射没有方向性 (各向同性)。事实已证明, 地物的反射具有明显的方向性 (各向异性), 那么, 是否可以利用 NOAA 数据中的角度信息呢?

4 多角度 NOAA 数据分类

为了说明 NOAA 数据中的角度信息也是可以利用的, 本文并未利用 BRDF 模型进行参数反演来计算各个角度的图像, 而直接使用原始图像所隐含的方向信息来试验。首先, 我们按常规方法对 A、B、C 3 景图像分别进行最大似然法非监督分类, 将影像分为 4 类: 水浇地、草地、裸地、沙漠, 并利用研究区 1: 50 万土地利用图和区内 TM 图像来进行精度评价。同时, 利用混淆矩阵计算出各种地物类别的识别精度 (混淆矩阵主对角线上的数值为识别正确的样本数, 用识别正确的样本数除以该类型总样本数即得到该类型的识别精度)。然后, 我们对这 3 景不同角度的图像进行多角度、多波段数据 (3 * 2 维) 的合成分类, 同时也进行多角度、单波段组合的分类。我们同样用最大似然法非监督分类, 将影像分为 4 类并进行精度评价。结果如表 2。

表 2 非监督分类精度表

Table 2 Evaluation of unsupervised classification (%)

	Kappa 指数	总精度	水浇地	草地	裸地	沙漠
多角度, 多波段	0.6098	72.3601	78.62	76.92	53.61	67.1
A	0.5221	65.378	75.08	60.28	57.68	63.23
B	0.5827	70.3405	77.49	70.64	56.43	69.03
C	0.375	54.1258	81.67	43.8	30.72	34.19
多角度, 波段 1	0.3918	55.6838	67.04	41.44	53.61	72.9
多角度, 波段 2	0.3367	51.5291	55.63	52.75	31.35	71.61

分析这几种分类的结果可知,

(1)采用多角度、多波段的数据分类,识别精度比常规单角度、多波段分类提高了2%—18%。

(2)由多角度、单波段数据分类精度比较低(比其它的低10%—20%)也可以说明,采用多波段数据在多角度遥感中仍然十分重要。

(3)不同角度的数据,对不同地物类别的识别率不一,例如C图像对裸地、沙漠识别率只有30%左右,但对水浇地识别率高达80%;B图像对草地的识别率比A、C分别高10%、27%。这些数据进一步说明了图像中角度信息的影响不可忽略。

(4)我们注意到,C图像采用非监督分类,其识别精度比其它的低10%左右。分析其原因,C图像摄于12日下午4时,虽然观测角与A、B相差不大,但太阳高度角比9、10日均小不少,另外热点效应可能也对图像造成了影响。在前文中我们也已经发现,C图像亮度值比A、B图像均高一些。这些数据都说明了角度因素可能对数据造成相当大的影响;某些影响如果使用常规的遥感方法,可能会有很大的副作用,如上所述C图像分类精度比A、B低10%—15%左右。但是考虑这些影响,利用角度信息,则能够提高遥感数据的识别能力。

这些数据都证明,多角度、多波段的遥感数据更完整地反映了地物特征,因而能够提高地物的识别能力。虽然我们并没有进行BRDF反演,来精确的计算多角度的遥感图像,仅仅利用NOAA数据中比较粗略地角度信息直接用来进行遥感分类,就使分类精度有了2%—18%的提高。

5 常规处理对数据的影响

在确证NOAA数据角度信息可以被利用并能够提高数据识别地物能力后,我们进一步对数据做太阳高度角纠正,并比较纠正后的结果。

气象卫星地面站所提供的常规NOAA-AVHRR数据(1B数据)均进行了太阳高度角的纠正,即把不同太阳高度角所形成的像元亮度值均调整到太阳垂直照射时的亮度值。其纠正过程为:

$$E = E_0 / \cos \alpha \quad (4)$$

其中 α 为太阳天顶角, E_0 和 E 分别是原始反射值和纠正后反射值。这个公式包含两个假设:(1)朗伯反射,认为地物各向反射同性;(2)纠正过程与波长无关。从这两个假设我们可以看出,要使用多角度数据,是不能进行这样的太阳高度角纠正的,这种方法和非朗伯反射不符。

我们利用式(3)计算所有像元的太阳天顶角,并依式(4)作太阳高度角纠正,对纠正后的图像进行统计分析,结果证明,方向性反射的影响并没有因为这种太阳高度角的“纠正”而丢失。对进行了纠正的图像采用同样的分类和精度判别方法,结果见表3。我们发现,太阳高度角纠正基本没有影响分类精度,既没有使常规单角度数据的识别能力有任何提高,也没有降低多角度数据的识别能力。相反,多角度、多波段数据的分类精度还有少许提高(2%),从这2%的差别中也许不能得出结论,但可能是由于一方面这种太阳高度角纠正是一种常规辐射定标的过程,调整了像元灰度值,另一方面可能是这种运算在某种程度上减小了同一图像内部不同像元之间存在的太阳高度角的微小差别,因而使多角度分类精度提高。我们可以预见如果用更精确的算法消除同一图像内部像元之间的太阳高度角、观测角的微小差别,例如进行BRDF参数计算和图像反演,可能会使分类精度得到更大的提高。

以上的事实可以说明,即使采用经常规太阳高度角“纠正”了的1B数据,保留多观测角信息,还是能使遥感识别精度有所提高。

表3 经太阳高度角纠正后的分类精度

Table 3 Evaluation of classification with azimuth

	Kappa 指数	总精度	angle correction				%
			水浇地	草地	裸地	沙漠	
多角度	0.6373	74.4374	91.16	70.02	53.61	68.39	
A	0.5202	65.2048	74.76	60.13	57.68	63.23	
B	0.5818	70.2827	77.33	71.27	55.17	69.03	
C	0.379	54.472	81.99	44.43	30.72	34.19	

6 讨论与结论

从上面的分析可以认为:

(1)大尺度的卫星影像数据与小尺度的野外实测数据,同样能充分反映方向性反射的影响和热点效应。这种方向信息,应予以重视。

(2)应用多角度信息能够提高遥感数据对地物的识别能力。在目前多角度卫星数据缺乏的情况下,不通过BRDF模型的复杂计算,仅用原始NOAA图像所隐含的方向信息,也能够提高遥感数据对地物的识别能力。这种方法简单易行,仅需采集单星连续数天的数据,不需做太阳高度角纠正(做了也可以使用),注意数据的空间配准,便可使地物识别、分类精度有大至2%—18%的提高。这种方法可

以在目前的作物估产等遥感应用中发挥作用。随着多角度遥感卫星的升空和BRDF模型反演的进一步深入,多角度遥感信息的提取与应用效果会更好。

太阳高度角、大气纠正等遥感数据处理方法,对角度信息的影响还需要进一步研究。去除其它非角度因素的影响,更精确的角度信息有可能对遥感应用做出更大的贡献。

参 考 文 献 (References)

- [1] Hafizur Rahman, Bernard Pinty, Michel M. Verstraete. Coupled Surface-Atmosphere Reflectance (CSAR) Model, 2. Semiempirical Surface Model Usable With NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer Data [J]. *Journal of Geographical Research*, 1993, 98(D11): 20779—20789.
- [2] P. Bicheron, M. Leroy, O. Hautecoeur. Enhanced Discrimination of Boreal Forest Covers Using Directional Signatures Measured by the Airborne POLDER Instrument [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1 Suppl.
- [3] Wenge Ni, Xiaowen Li, Curtis E. Woodcock, Alan Strahler. Parameterization of Spectral Component Signatures for Geometric Optical Canopy Reflectance Modeling [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1 Suppl.
- [4] Wolfgang Wanner *et al.* Global BRDF and Albedo from the EOS MODIS and MISR Sensors [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1 Suppl.
- [5] Xiru Xu *et al.* The non-Lambertian Problem in the Dynamic Monitoring of Vegetation by NOAA-AVHRR [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1 Suppl. [徐希儒等: NOAA-AVHRR 在植被动态监测中的非朗伯体问题[J]. 遥感学报, 1997, 增刊]
- [6] Shupeng Chen, Yingshi Zhao. Geo-science Analysis of Remote Sensing [M]. The Publishing House of Surveying and Mapping, 1990. [陈述彭、赵英时, 遥感地学分析[M]. 测绘出版社, 1990]
- [7] Jiabing Sun, *et al.* Principle, Method and Application of Remote Sensing [M]. The Publishing House of Surveying and Mapping, 1997. [孙家柄等, 遥感原理、方法和应用[M]. 测绘出版社, 1997]

Analysis and Application of Directional Reflectance in Satellite Remotely Sensed Data

XU Jian-chun, ZHAO Ying-shi, LONG Fei

(Graduate School, Chinese Academia Sinica)

Abstract: This paper proves the directional reflectance phenomena of ground objects and hot-spot effect by using field data and NOAA satellite data. This further proves that NOAA data has directional reflectance information. The precision of unsupervised classification is improved by using multi-directional NOAA data, which indicates that the directional information can be applied to Remote Sensing. Finally, this paper analyzes the effect of traditional remotely sensed data processing method on directional information, especially that of the sun zenith angle calibration.

Key words: NOAA, multi-directional remote sensing, classification