

敦煌辐射校正场方向反射特性测量与评价

何积泰 陆亦怀

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 合肥 230031)

摘 要 作为中国遥感卫星辐射校正场项目的前期准备工作,于1994年6月和1996年9月,利用自行研制的智能型野外双向反射特性地面测量系统——VF921对敦煌辐射校正场地面方向反射特性(BRDF)进行了测量。通过对这两次测量数据的处理和分析,对场地的BRDF特性进行了分析和评价。同时,对于整个测量系统和数据获取与处理中还存在的问题进行了讨论。

关键词 敦煌辐射校正场, BRDF特性, 场地测量与评价

1 引 言

场地的方向反射特性的测量与评价是卫星传感器的辐射校正工作中一个重要的组成部分,是提高卫星传感器(特别是大视角、多角度传感器)辐射校正精度的关键要素。定点测量法和不定点测量方法是野外场地方向反射测量中常用的两种方法^[1]。对于野外大面积目标来讲,由于定点测量在设备、物力和时间上很难达到要求,故采用不定点测量法也是可行的。不定点测量所用探测器平台依场地大小和设备条件而定^[2];对于大面积场地(km²量级)常用直升飞机,对于较小的场地(m²量级)一般用测量架作搭载平台。二者相比,直升机作平台对场地的特性测量要比用测量架对目标的影响小,但费用相对要高。我们从经费和设备上考虑采用了测量架,光谱辐射计采用我们自行研制开发的VF921智能型地物光谱辐射计。对场地的测量前后共进行了两次,在仪器性能结构方面第2次测量作了一点改进,具体性能参数见表1。

辐射校正场的测量与评价技术的研究在国外目前已经走向成熟,并且成功地运用于在轨卫星遥感器的同步辐射校正中^[3]。近年来,大视场角(多角度)航天遥感器(如美国的NOAA-AVHRR,法国SPOT等卫星传感器)的出现给野外辐射校正场的测量和评价赋予更重要的意义。中国在这方面的研究工作起步较晚,目前尚处于初期阶段。

2 场地及仪器

2.1 场地情况

敦煌场区位于敦煌市西北20多公里处的党河再生冲积扇上,海拔为1160m。场地面积为25km×25km,地理坐标是N40.04°—40.28°和E94.17°—94.5°。整个冲积扇较为平坦,南北最大高差约为120m,地面分布以砾石为主,砾石分布较均匀,粒径范围大约在0.2—8.0cm之间,以1.0—4.0cm为主,约占80%。颜色主要是黑色、灰色和白色,其中黑色约占40%,灰色、白色约占58%。由北而南,砾径由粗变细,颜色由深变浅;岩石种类包括酸性岩、中性岩和碱性岩¹⁾。中心场位于冲积扇的中部偏南,地势平坦。两次测量区的中心分别为1994年N40°12.001', E94°25.850', 1996年N40°06.845', E94°24.331';场地面积分别为300m×300m和500m×500m。

2.2 测量装置

测量系统如图1,主要由以下几部分组成:

支架部分 用轻型不锈钢管作成稳固的三角形支架,可随时安装和拆卸,便于携带。

扫描部分 由两个步进电机组成二维扫描系统,在计算机的控制下,电机带动辐射计传感器头部运动,实现对地面的二维扫描。

辐射计传感器部分 用CCD阵列器件构成光

1) 中国遥感卫星辐射校正场考察报告汇编,中国遥感卫星辐射校正场专题论证组,中国遥感卫星辐射校正场考察团,1994.10.

收稿日期:1997年3月24日;收到修改稿日期:1997年6月9日

传感器,可实现光、电信号的快速转换。

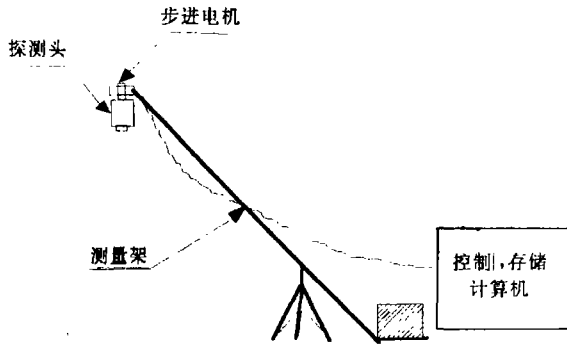


图1 BRDF测量系统示意图

Fig.1 Pattern of BRDF measurement system

控制、存储部分 由便携式计算机完成扫描电机的控制、辐射计的测量以及测量数据的存储。

整个测量系统的性能指标如表 1。

表1 VF921性能指标表

Table 1 The feature indexes of VF921

项目	1994年仪器	1996年仪器
支撑高度/cm	≥3.1	≥5
φ_0 测量范围/ $^\circ$	0—270, $\Delta\varphi=10$	0—360, $\Delta\varphi=10$
θ_0 测量范围/ $^\circ$	0—65, $\Delta\theta=5$, 或10	0—65, $\Delta\theta=5$, 或10
扫描速度/ $^\circ$ /s	>7.2	>7.2
光谱分辨率/nm	3.0	3.0
光谱范围/ μm	0.4—1.1	0.4—1.1
辐射计视场/ $^\circ$	6	6

2.3 测量方法

采用不定点测量法,即探测头到地面被测目标间形成扫描锥体,探头传感器位于扫描锥体的顶部,整个测点分布在锥体的底面上(图2)。测点随

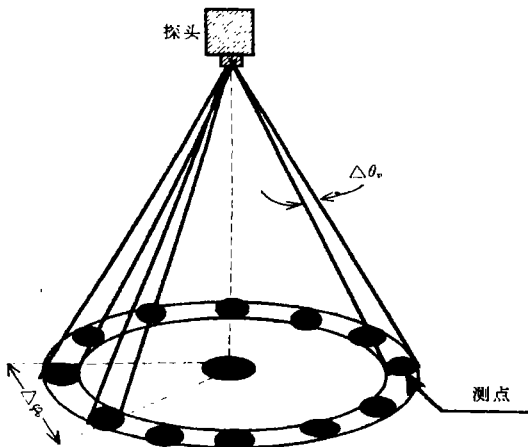


图2 不定点测量示意图

Fig.2 Pattern of multi-point measurement of BRDF

探头的天顶角 θ_0 和方位角 φ_0 的变化而变化。

为保证不定点测量的精度,在测量上应满足以下条件:(1)天气应当晴朗无云,能见度要高,并保证一个测量周期内($\Delta T \leq 15\text{min}$),在 θ_0, φ_0 变化时照明和测试条件基本一致。(2)测量目标区域必须足够大,地面应当平整,表观要均匀。由于要测量的是卫星辐射校正场地,这种场地的选取是以前提条件的;同时采用的仪器测量周期也基本满足时间条件,所以我们采取不定点测量方法。

3 测量及数据处理结果

3.1 测量的理论依据

目标在自然光的照射下会产生反射。这一特性可用双向反射分布函数(BRDF)来描述:

$$BRDF(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v) = \frac{L(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v)}{E(\theta_s, \varphi_s)} \quad (1)$$

其中 $E(\theta_s, \varphi_s)$ 表示光源从 θ_s, φ_s 方向入射到目标表面上的辐照度, $L(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v)$ 表示目标表面受 θ_s, φ_s 方向入射的光照射时,沿 θ_v, φ_v 方向的辐亮度, E 和 L 的几何示意图如图 3 所示。由于 BRDF 的获取较为困难,通常用另一个量——双向反射率因子(BRF)来描述目标的反射特性:

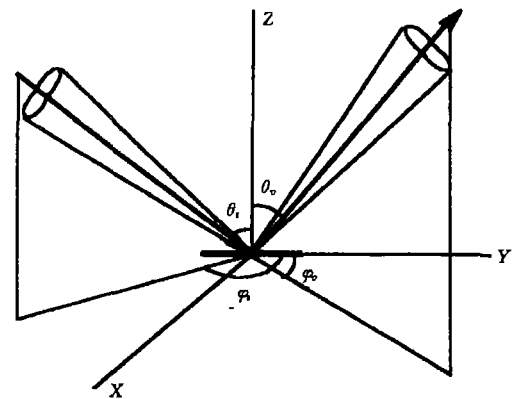


图3 E和L的几何示意图

Fig.3 Geometric map of E and L

$$BRF(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v) = \frac{L_t(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v)}{L_r(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v)} \quad (2)$$

其中 $L_t(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v), L_r(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v)$ 为目标和参考板在光源从 θ_s, φ_s 方向入射时沿 θ_v, φ_v 方向的辐亮度,对(2)式作变换:

$$BRF(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v) = BRF'(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v) \cdot \rho(\theta_s, \varphi_s; 0^\circ, 0^\circ) \quad (3)$$

其中 $\rho(\theta_s, \varphi_s; 0^\circ, 0^\circ)$ 为参考板的反射率因子。而 BRF' 表示为:

$$BRF'(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v) = \frac{L_r(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v)}{L_r(\theta_s, \varphi_s; 0^\circ, 0^\circ)} \quad (4)$$

只要测出 L_r, L_v 并利用参考板的 $\rho(\theta_s, \varphi_s; 0^\circ, 0^\circ)$ 值便可确定目标的 BRF 值。

3.2 测量

1994年6月22—24日和1996年9月4—8日前

后2次对敦煌校正场进行了实地测量,除所选场地不同外,第2次的仪器和第1次相比有所改进(表1)。人工选好场地,支好测量架后,整个测量、数据采集存储等过程基本上由计算机控制自动完成。

3.3 数据处理结果及分析

对2次测量的数据经数制转换、选取波段(以下

表2 1994年6月敦煌场某些测点BRF数据的均值(相对偏差及方差)

Table 2 Value of mean, relative error and root mean square error of Dunhuang flat datum measured in Jun. 1994

测量序号	波长(nm)	太阳天顶角(°)	北京时间	BRF平均值	相对偏差(%)	方差
1	570	44.24	10:30	0.99	10.5	0.104
2	570	39.94	10:53	0.96	9.1	0.091
3	660	34.97	11:20	1.01	9.1	0.091
4	660	30.33	11:45	0.87	8.0	0.080

注:表中所列数据均为相对值,即没有对比标准参考板数据

表3 1996年9月敦煌场某些测点BRF数据的均值(相对偏差及方差)

Table 3 Value of mean, relative error and root mean square error of Dunhuang flat datum measured in Sept. 1996

测量序号	波长(nm)	太阳天顶角(°)	北京时间	BRF平均值	相对偏差(%)	方差
1	570	42.74	11:43	1.10	11.4	0.125
2	570	35.92	12:42	1.07	10.1	0.109
3	660	33.39	13:03	1.03	9.8	0.101
4	660	33.68	14:10	1.01	9.3	0.094

注:表中所列数据均为相对值,即没有对比标准参考板数据

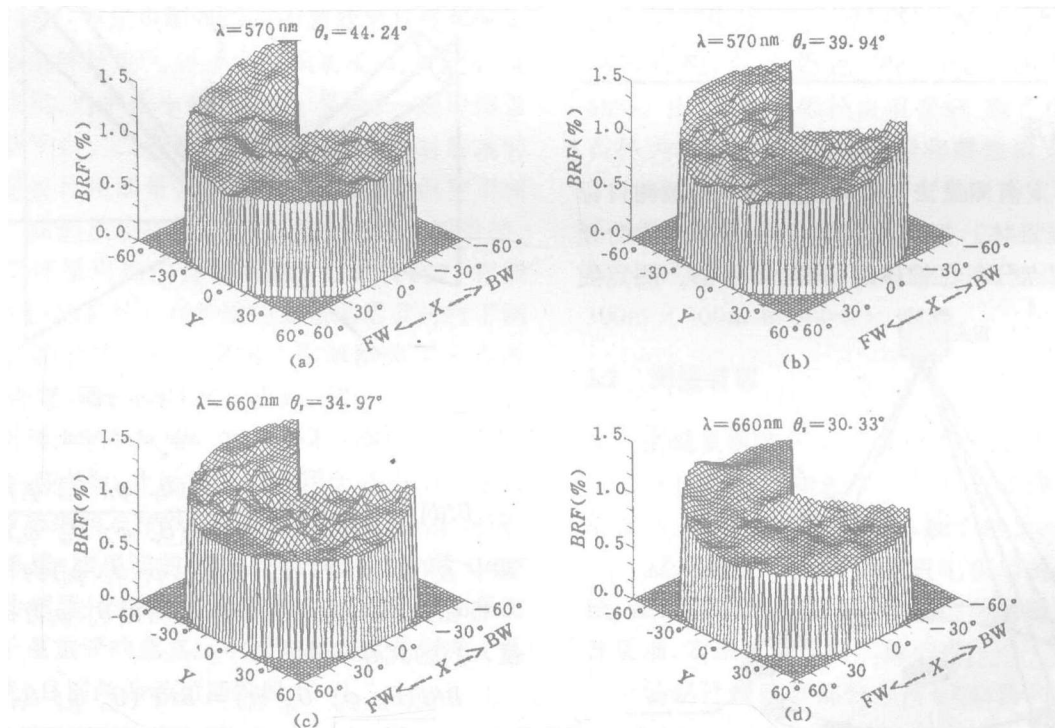


图4 1994年敦煌场BRF分布图

其中编号对应表1的测量点序号, X轴的FW, BW为前、后向标识

Fig.4 BRF distribution surface of Dunhuang flat in 1994

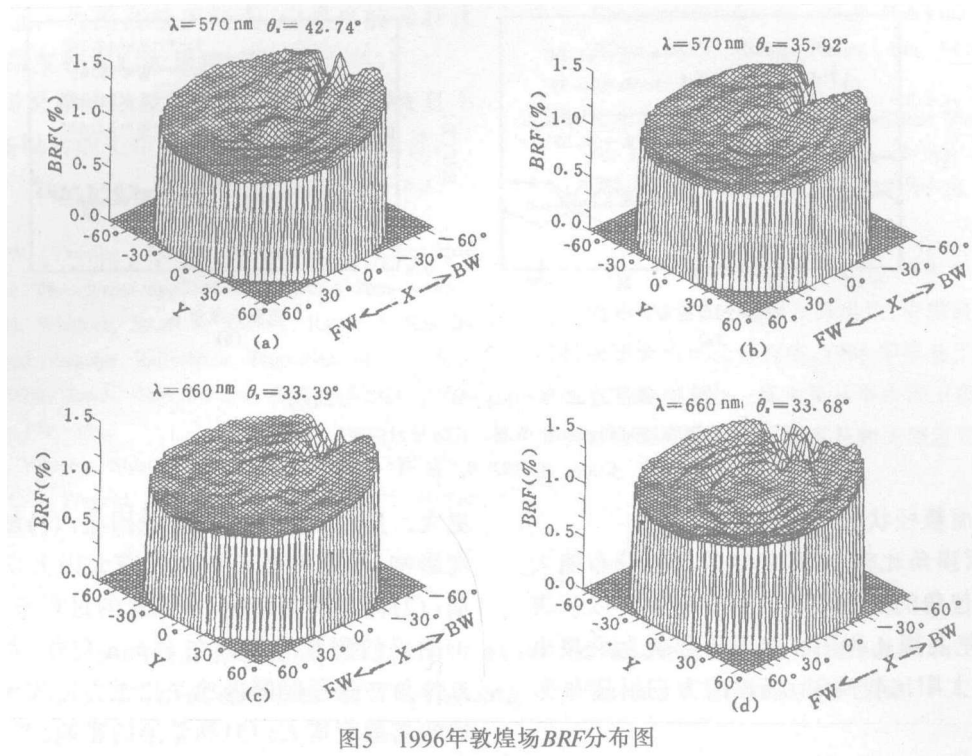


图5 1996年敦煌场BRF分布图

其中编号对应表2的测量点序号, X轴的FW, BW为前、后向标识

Fig.5 BRF distribution surface of Dunhuang flat in 1996

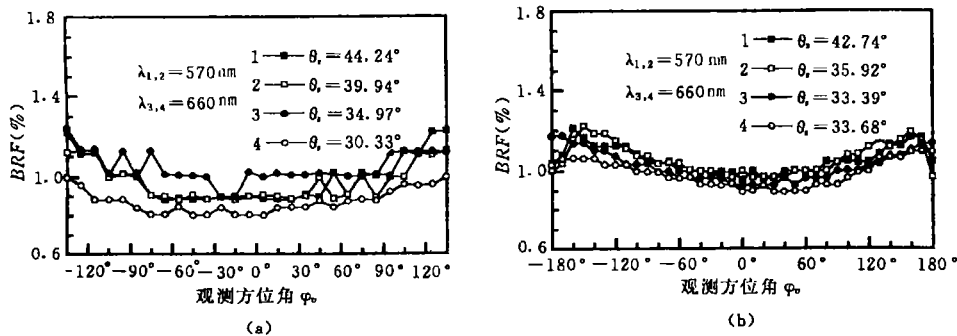


图6 BRF随φ_v分布(θ_v=30°)曲线

(a), (b)分别为1994、1996年所测, 其编号分别对应表2、4的测点序号

Fig.6 Curve of BRF-φ_v (θ_v=30°)

取 LANDSAT 卫星 TM 传感器的 2,3 波段为例进行说明)、坐标旋转和归一化等方法进行处理后,2 次测量的均值及误差结果见表 2、表 3;图 4、图 5 给出的是以太阳平面为 0°方位角的 BRF-X-Y 三维分布曲面图(图 4 中缺少的 90°方位是第 1 次测量时考虑到测量架的影响未测到的部分);将 BRF 值随 φ_v 和 θ_v 的分布绘制成 BRF-φ_v 曲线和 BRF-θ_v 曲线,其结果如图 6、图 7。具体分析如下:

1) 场地的地面双向反射比分布以太阳平面(即 φ_v = 0°平面)对称。目标在自然条件下方向反射分布的对称性可用下式来描述^[4]:

$$BRF(\theta_v, \varphi_v) = BRF(\theta_v, -\varphi_v) \quad (5)$$

对于均匀的目标来说,对称性是其方向反射分布的重要特征之一。场地越均匀,其对称性越明显。图 6 的 BRF-φ_v 曲线和图 4、图 5 的 BRF-X-Y 三维曲面图都突出的反映出这一点。依据这一特点可推断场地的均匀程度,同时也可判断我们的测量是否有误。

2) 场地的后向反射分布比前向大,即存在“热点”效应^[4]。这一点可以从图 7 的 BRF-θ_v 曲线和图 4,5 的 BRF-X-Y 三维曲面图中反映出来。“热点”效应也是方向反射的另一重要特征。出现此效应的实质是由于目标有一定的线度分布,沿后向看场地时的阴影面积要比沿前向看时要小,尤其在太阳偏低的情况下此效应更加明显。通过“热点”效应可以初

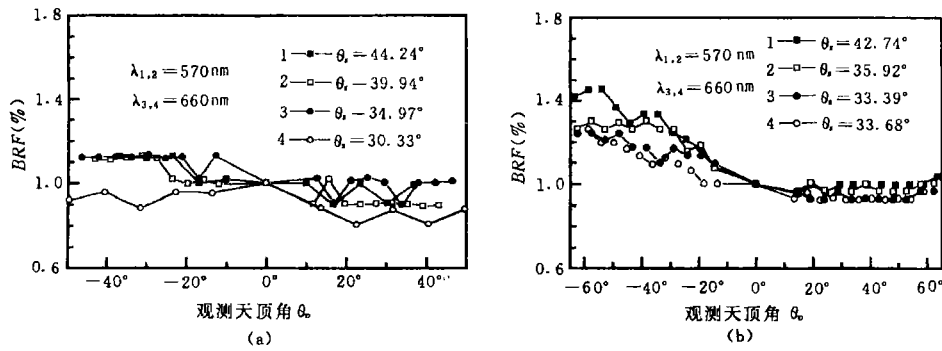


图7 BRF随 θ_0 分布($\varphi_0=0^\circ, 180^\circ$)曲线
 (a), (b)分别为1994和1996年所测, 其编号对应表2, 4测点序号

Fig.7 Curve of $BRF-\theta_0, \varphi_0=1^\circ, 180^\circ$

步判断场地地面粒径状况。

3) 太阳天顶角比较小时,场地的反射分布随太阳天顶角和方位角的变化较小。这一结果可以从表2和表3的方差及图4和图5曲面的起伏上反映出来。这说明当太阳比较高时,场地的方向反射分布较均匀。

4) 从表2和表3中的数据来看, BRF 数据的方差对于太阳天顶角的变化比较明显(1994年为0.024, 1996年为0.031), 尤其当太阳天顶角变大时, 其变化更明显。这反映出了地面 BRF 特性对太阳天顶角的变化是敏感的。这一结果完全符合非朗伯(Non-Lambertian)面方向反射对光源入射天顶角依赖的特点。为了提高辐射校正精度, 要求校正选择1天内太阳天顶角最小且变化最小的最佳时机, 即当地的中午时分进行。

5) 比较1996年和1994年的测量结果, 存在着以下不同: (1) 1996年 BRF 平均值要比1994年大。其主要原因是1994年测量是在雨后地面未完全干的情况下进行的, 1996年地面要干燥一些, 而地面湿度对其反射率的影响是很大的, 所以出现了这种情况(对其定量化的研究在以后的工作中要展开); (2) 数据的离散度1996年比1994年大。这主要是仪器测量架的影响造成的。由于1996年采用改进后的仪器, 其扫描范围由1994年的 270° 增加到 360° , 原来没测到的 90° 范围的地面就可测到, 这样测量架对天空光的遮挡, 尤其是近地面部分, 其影响作用不可忽视。这使得被挡部分地面反射能量降低, 仪器的测量数据减小, 数据的离散度变大了。这也是图5沿后向出现小凹陷的原因。所以仪器的结构还有待于进一步改进。

6) 纵观整个数据, 其方差和相对偏差的变化都偏大, 尤其在太阳天顶角较大时方差和相对偏差值

更大。造成该情况的主要原因是: (1) 场地表面粗糙度影响, 场地表面石块阴影随太阳天顶角变大而增加; (2) 测量周期影响, 从测量的过程来看, 虽然每一个测点的测量时间都在15min左右, 太阳天顶角和方位角在这段时间内的变化也会造成地面相对反射比的离散度增大; (3) 测量架的影响, 如前所述, 测量架对地面的影响是不可忽视的; (4) 大气的作用, 不同季节, 时间以及气候状况下大气的吸收、散射作用是不同的, 大气的这些作用在数据处理时没有顾及, 这在数据处理模型上需要修正。

4 结 论

通过以上的分析结果, 可以得出以下结论:

1) 我们所采用的测量系统是一种智能型野外方向反射特性测量系统。它具有测量时间短、测量精度比较高和操作灵活方便等特点, 能够满足卫星传感器辐射校正场地面方向反射特性同步测量的需要, 并为将来开展面向大视角、多角度遥感器进行校正测量奠定了初步的基础。

2) 场地方向反射特性比较好, 分布均匀。在太阳天顶角变化比较小或短时间内(如卫星过顶时间)场地的 BRF 特性可视为稳定, 可满足卫星传感器辐射校正场地面 BRF 特性的要求; 特别是在未来开展多角度航天遥感器的定标工作方面, 场地均匀的 BRF 特性在可见光及近红外波段将会有一定的应用价值。

3) 在后继的卫星传感器辐射校正工作中, 场地的测量数据既可用于对在轨卫星对地同步测量数据的订正, 又可进一步用于新型大视角航空、航天遥感器对地观测的标定。

4) 场地的 BRF 值随地面湿度和太阳天顶角的

变化比较明显。为提高校正精度, 应尽可能选择比较小的地面湿度和太阳天顶角。

另外, 测量系统以及数据处理的模型都有其不完全之处, 在以后的工作中还要不断地加以完善。

参 考 文 献

- [1] Donald W. Deering. Field measurement of bidirectional reflectance. *Theory and Application of Optical Remote Sens.*
- [2] Charles H. Whitlock, Stuart R. LeCory, Robert J. Wheeler. Narrowband Angular Reflectance Properties of the Alaki Flats at White Sands, New Mexico, *Remote Sens. Environ.* 1994, 50: 171—181.
- [3] Robert J. Wheeler, Stuart R. LeCroy, Charles H. Whitlock, Gerald C. Purgold, Jeffery S. Swanson. Surface

Characteristics for the Alkali Flats and Dunes Regions at White Sands Missile Range, New Mexico, *Remote Sens Environ.* 1994, 48: 181—190.

- [4] S.A.W. Gerstl, C. Simmer. Radiation Physics and Modelling for Off-Nadir Satellite-Sensing of Non-Lambertian Surface. *Remote Sens. Environ.*, 1986, 20: 1—29.

作 者 简 介

何积泰, 男, 1970年9月出生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所硕士研究生, 1995年毕业于兰州西北师范大学物理系物理专业。现主要从事中国卫星辐射校正场方向反射特性的测量与评价研究及相关测量仪器的开发研制工作。

The Measurement and Evaluation of Bidirectional Reflectance Characteristics of Dunhuang Radiative Calibration Site

He Jitai Lu Yihuai

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract As a preliminary step in the program of radiative calibration site of remote sensing satellite of China, we measured the bidirectional reflectance distribution features (BRDF) of Dunhuang Site's surface twice in June, 1994 and September, 1996 by using an intelligent instrument-VF921, a system made by ourselves for measuring the bidirectional reflectant properties. Through the datum processing and analyzing of these measurements, this paper evaluated the BRDF of the Site. Meanwhile, the paper also analyzed and discussed the problems within the measurement system and the datum processing methods.

Key words Dunhuang radiation calibrating site, Bidirectional reflectance distribution factor, Field measuring and evaluating