

敦煌辐射校正场双向反射分布函数模型构建及应用分析

豆新格¹, 潘军¹, 高海亮^{2*}, 王凯司¹, 孙晗¹, 姜鹏¹

¹吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130012;

²中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

摘要 敦煌校正场是我国最重要的辐射校正场, 地面目标的方向反射特性是影响场地定标精度的重要参数。对于在什么情况下需要校正地表反射率及采用哪种双向反射分布函数(BRDF)进行校正, 尚无明确的研究。由于中等分辨率成像光谱仪(MODIS)精度较高, 对MODIS影像进行了分析。首先利用2020年9月敦煌场地6组不同测量时刻下的无人机多角度观测数据, 分别以6种不同核函数组合方式建立36个不同的BRDF模型, 针对不同观测角度下的MODIS影像, 分别计算BRDF校正前和BRDF校正后的表观反射率; 而后与卫星实测表观反射率进行相对偏差的比较。实验结果表明, 以28°的观测角度为界, 当观测角度大于28°时相对偏差较大, 且BRDF校正对结果的影响较大; 在所建立的BRDF模型中, 采用接近卫星过境时刻测量的多角度观测数据所建立的BRDF模型校正效果更好; 且基于Rossthick-Lidense、Rossthick-LiSparseR和Rossthin-LiSparseR这三种核函数组合方式的BRDF模型所计算的表观反射率与卫星观测值的相对偏差都比较小。

关键词 遥感; 双向反射分布函数模型; 反射率基法; 敦煌辐射校正场; 表观反射率

中图分类号 TP722.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1628005

Construction and Application Analysis of Bidirectional Reflectance Distribution Function Model of Dunhuang Radiation Correction Site

Dou Xinge¹, Pan Jun¹, Gao Hailiang^{2*}, Wang Kaisi¹, Sun Han¹, Jiang Peng¹

¹College of Geospatial Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China;

²The Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract The Dunhuang correction site is the most important radiation correction site in China, and the directional reflection characteristic of the ground target is an important parameter affecting the site calibration accuracy. Until now, there are no clear studies on circumstances that necessitate the ground reflectance correction, and which bidirectional reflectance distribution function (BRDF) is used for correction. Due to the high accuracy of medium-resolution image spectrometer (MODIS), MODIS images are analyzed. First, using six sets of unmanned aerial vehicle multi-angle observation data under different sun zenith angles at the Dunhuang site in September 2020, 36 different BRDF models are established by six different kernel function combinations. For the images under different observation angles, we calculated the apparent reflectance before and after the BRDF correction and compared the relative deviation with the measured apparent reflectance of the satellite. By considering the observation angle of 28° as the boundary, the experimental results show that the relative deviation is greater when the angle is greater than 28°, which is a significant consequence of the BRDF correction. Among the BRDF models established above, the BRDF model established using multi-angle observation data measured close to the time of satellite transit has a better correction effect. Furthermore, the relative deviation between the apparent reflectance calculated by the BRDF model using the kernel function combination of Rossthick-Lidense or Rossthick-LiSparseR or Rossthin-LiSparseR and the satellite observation value are small.

Key words remote sensing; bidirectional reflectance distribution function model; reflectance-based method; Dunhuang radiation correction field; apparent reflectance

收稿日期: 2021-06-28; 修回日期: 2021-07-02; 录用日期: 2021-07-13

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504800, 2018YFB0504803)

通信作者: *gaohl@radi.ac.cn

1 引言

敦煌校正场是我国国家级遥感卫星辐射校正场,位于甘肃省敦煌市,场地反射率基本上位于卫星遥感器动态范围的中间部分,可以满足大多数卫星遥感器的在轨辐射校正^[1]。辐射定标是卫星遥感数据量化应用过程中一个必不可少的重要环节,其目的是为了建立遥感器输入物理量与输出数值之间的定量转换关系^[2]。卫星遥感器在轨绝对辐射定标精度决定着量化应用的广度和深度^[3]。场地双向反射分布函数(BRDF)的测量与分析可以量化地面目标的方向反射特性,对辐射定标精度的提高具有重要意义^[4]。在对大角度卫星进行辐射定标时,若忽略了地表的方向反射特性,则会严重影响定标的精度。

20世纪90年代,中国科学院安徽光学精密机械研究所何积泰等^[5]利用非定点全自动BRDF测量系统对敦煌场进行了测量,初步对敦煌场进行了方向特性的评价。李新等^[6-7]研制出了一种高精度自动化BRDF定点测量系统,并应用该系统对敦煌场进行了测量,获取了自建立敦煌场以来最为全面的方向特性测量数据,但并未对相关数据进行深入分析和研究。之后,余谭其等^[8]利用便携式定点测量装置对敦煌场进行方向反射测量,并利用核驱动模型获得了BRDF参数,构建了场地方向特性定量描述模型。近年来,随着无人机(UAV)的出现与应用,中国资源卫星应用中心也利用改装定制的无人机搭载光谱仪对敦煌场地进行了方向特性测量。赵春艳等^[9]利用无人机测量系统对敦煌辐射校正场进行了地表方向特性测量,并基于RossThick-LiSparseR的核函数组合方式建立了敦煌场高光谱BRDF模型。虽然已有众多学者针对敦煌场开展了BRDF方面的相关研究,但对于敦煌场在什么情况下需要进行BRDF校正的研究较少。许多学者通常表明,在大角度观测的情况下进行BRDF校正,但并没有具体考虑过当卫星观测角度具体为多大时才需要加入BRDF校正因子。并且在需要引入BRDF模型时,对于采用不同方式建立的BRDF模型的精度分析也较少。

为了解决上述问题,本文以敦煌校正场为研究区,利用无人机获得多角度观测数据,针对不同观测角度下的影像,采用反射率基法^[10]在考虑BRDF校正因子的情况下,获得中分辨率成像光谱仪(MODIS)的表观反射率,并与卫星实测表观反射率进行比较。以卫星表观反射率为依据,分析在何种情况下需要进行BRDF校正及应建立何种类型的BRDF校正模型以提高精度。

2 方法原理与数据

本实验组利用无人机搭载光谱仪的方法,测量得到多组不同测量时刻下的多角度反射率数据,并采用

不同组合方式的核函数构建多个BRDF模型,分析不同测量时刻和不同核函数组合方式对BRDF模型的影响。为评价BRDF模型的适用性,利用不同观测角度下的MODIS影像数据,首先采用反射率基法,通过辐射传输模型分别计算出未经BRDF校正的表观反射率(simulated apparent reflectance A)与校正后的表观反射率(simulated apparent reflectance B),再将两者同与卫星观测的表观反射率进行比较,对BRDF模型的进行适用性评价。技术流程如图1所示。

具体流程如下:

- 1) 利用无人机搭载地物光谱仪,获取6组不同测量时刻下的多角度观测数据;
- 2) 分别基于6组多角度观测数据,建立6种不同核函数组合方式的BRDF模型,共获得36个不同的BRDF模型;
- 3) 获取不同观测角度下的影像,提取影像的几何观测参数以及实际观测值;
- 4) 分别采用以上建立的所有BRDF模型依次对地表垂直测量反射率进行校正;
- 5) 一方面将校正前的地表反射率输入辐射传输模型计算出卫星表观反射率(simulated apparent reflectance A),另一方面将校正后的地表反射率输入辐射传输模型以获得卫星表观反射率(simulated apparent reflectance B);
- 6) 分别将未经校正所计算的表观反射率和校正后所得到的表观反射率与卫星实测表观反射率进行比较,计算出相对偏差;
- 7) 对以上得到的所有相对偏差进行分析比较。

2.1 原理

利用无人机测量装置,对敦煌辐射校正场进行地表方向性测量,获得多组不同测量时刻下的观测数据,建立敦煌场多组BRDF模型。本实验组采用的是核驱动模型,即

$$R(\theta_s, \theta_v, \varphi) = f_{\text{iso}} + f_{\text{geo}} K_{\text{geo}}(\theta_s, \theta_v, \varphi) + f_{\text{vol}} K_{\text{vol}}(\theta_s, \theta_v, \varphi), \quad (1)$$

式中: R 为二向反射率; K_{geo} 为几何光学核; K_{vol} 为体散射核; θ_s 为太阳天顶角; θ_v 为卫星观测角; φ 为相对方位角; f_{iso} 、 f_{geo} 、 f_{vol} 分别表示各向均匀散射、几何光学散射、体散射在这三部分中所占的比例(权重)。同时,核驱动模型提供两个核函数:体散射核(RossThin、RossThick)^[11-12]与几何光学核(LiSparseR、LiDense、LiTransit)^[13-14]。

对体散射核与几何光学核进行不同方式的组合,可获得6种(RossThick-LiDense、RossThick-LiSparseR、RossThick-LiTransit、RossThin-LiDense、RossThin-LiSparseR、RossThin-LiTransit)不同核函数组合方式的BRDF模型。

基于上述所建立的BRDF模型,在卫星过境时分

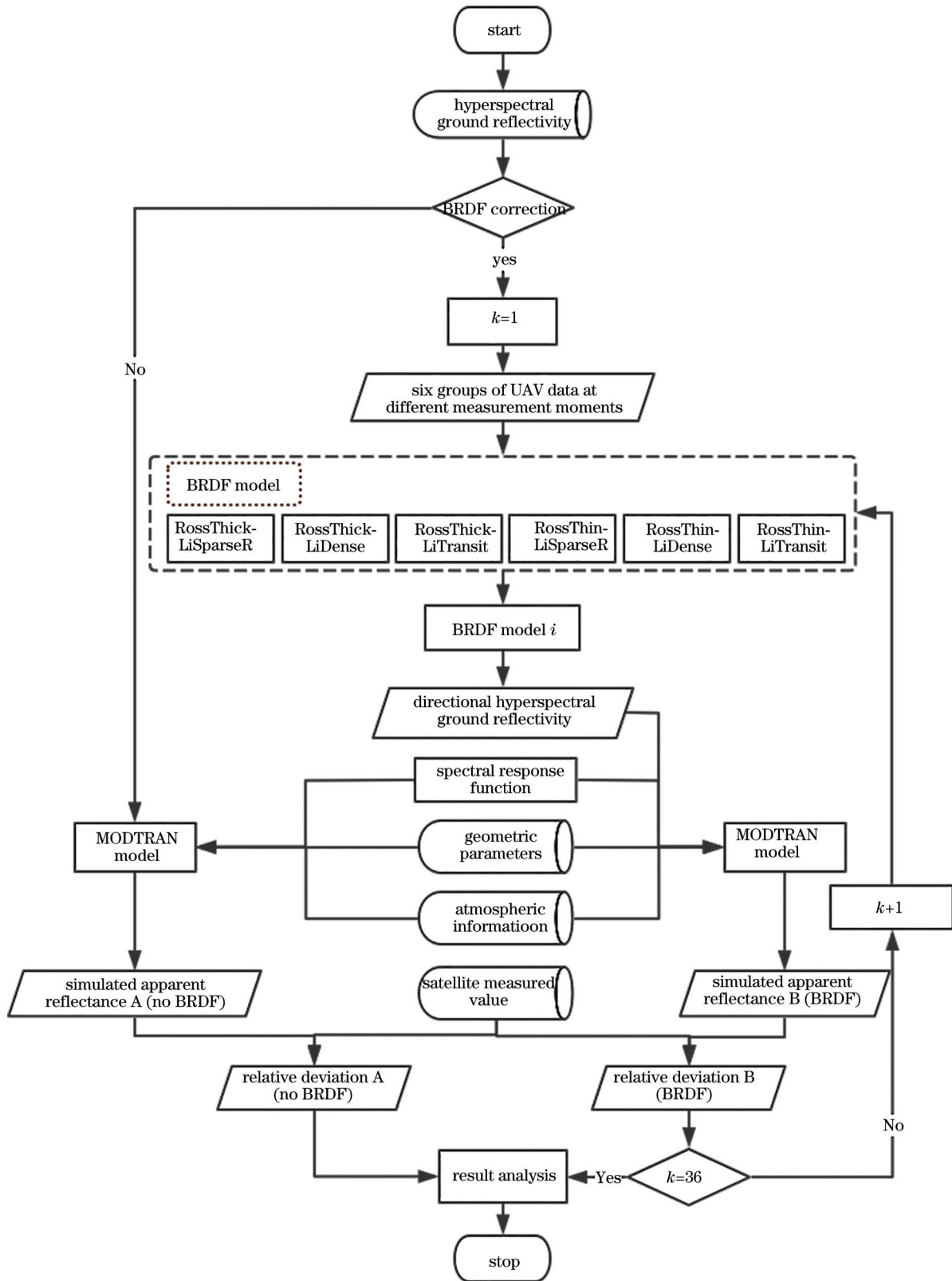


图 1 基于不同 BRDF 模型的表现反射率验证

Fig. 1 Verification of apparent reflectance based on different BRDF models

别模拟出垂直观测条件下以及卫星观测几何条件下的反射率,进而计算出卫星观测几何条件下相对于垂直观测条件下的 BRDF 校正因子,并将校正因子作用于地表垂直观测下的光谱仪采样光谱,从而获得经过

BRDF 校正的地表反射率。

$$\rho_{\text{directional}} = \frac{\rho_{\text{model}}(\theta_s, \theta_v, \varphi)}{\rho_{\text{model}}(\theta_s, 0, 0)} \rho_{\text{vertical}}, \quad (2)$$

式中： $\rho_{\text{directional}}$ 表示经 BRDF 校正的地表方向反射率； ρ_{vertical} 表示地表垂直观测反射率； ρ_{model} 表示核驱动模型模拟出的反射率。

采用 MODTRAN 模型^[15] 进行大气辐射传输过程模拟，将卫星过境时刻的几何角度、大气参数、地表测量反射率及卫星的光谱响应函数输入大气辐射传输模型，得到卫星遥感器的表观反射率^[16]，其中大气廓线类型采用的是美国标准大气廓线，气溶胶类型采用的是沙漠型气溶胶，气溶胶光学厚度、水汽含量等参数通过 CE318T 太阳光度计实测获得。大气层顶的表观反射率 ρ^* 的计算公式如下：

$$\rho^* = \frac{\pi d^2 L(\mu_v)}{E_{0\lambda} \mu_s}, \quad (3)$$

$$L(\mu_v) = L_p(\mu_v) + \rho_s / (1 - \rho_s S) \mu_s F_0 \tau(\mu_s) \tau(\mu_v), \quad (4)$$

$$\rho_s = \frac{\int \overline{\rho_g(\lambda)} R_i(\lambda) d\lambda}{\int R_i(\lambda) d\lambda}, \quad (5)$$

式中： $L_p(\mu_v)$ 为大气程辐射； ρ_s 为地表反射率； S 为大气层底向下的大气半球反射率； F_0 为大气顶层的辐射通量密度； $\tau(\mu)$ 为从地表到传感器或太阳的大气透过

率； μ_s 、 μ_v 分别为太阳天顶角和卫星观测天顶角的余弦； $E_{0\lambda}$ 表示等效太阳辐照度； d^2 表示平均日地距离修正因子； $\overline{\rho_g}$ 为场地平均反射光谱曲线； R_i 为遥感器第 i 波段的光谱响应函数。

2.2 卫星数据

MODIS 是 TERRA 和 AQUA 卫星上搭载的主要传感器之一，MODIS 传感器配置了完善的星上定标系统，其数据质量较高，绝对辐射定标精度达到了 5%，相对精度达到了 1%^[17]。由于 AQUA/MODIS 辐射性能优于 TERRA/MODIS^[18]，本实验组以 AQUA/MODIS 波段 1~4 及 7 为基准，开展敦煌场地 BRDF 模型适用性的研究，其中 MYD021KM 和 MYD03 定位信息从美国国家航空航天局下载获取，根据研究区经纬度和定标系数计算得到敦煌场地 MODIS 影像的表观反射率，作为参考真值。

2020 年 9 月 17 日—2020 年 10 月 2 日，在敦煌场地开展地表反射率与大气参数的测量实验，获取相应日期的 MODIS 影像，提取到的卫星过境时的观测几何参数和大气参数如表 1 所示，其中 Transit time 表示卫星过境时间，SZA 为太阳天顶角，SAA 为太阳方位角，VZA 为卫星观测角，VAA 为卫星方位角，AOD(550) 为波长在 550 nm 处的气溶胶光学厚度。

表 1 卫星过境时的观测几何参数和大气参数

Table 1 Geometric and atmospheric parameters during satellite time

Date	09-17	09-22	09-23	9-25	09-26	09-30	10-02
Transit time	14:45	15:05	14:10	13:55	14:40	14:15	14:05
SZA / (°)	41.36	45.09	41.25	41.580	44.41	44.36	44.58
SAA / (°)	-152.45	-146.74	-166.01	-170.49	-155.21	-163.74	-167.97
VZA / (°)	4.36	28.38	53.94	62.32	15.47	48.50	58.34
VAA / (°)	85.46	261.97	73.30	71.06	79.78	74.13	71.50
AOD (550)	0.075	0.716	0.213	0.246	0.388	0.404	0.358
Water vapor / (g·cm ²)	0.350	0.684	0.605	0.506	0.656	0.797	0.487

2.3 基于无人机的场地 BRDF 实验与模型建立

敦煌辐射校正场位于甘肃省敦煌市西部，在敦煌城西约 17 km 处，平均海拔高度大于 1 km，场地面积大于 30 km × 30 km，如图 2 所示。该场地具有地表开阔、地表均一、地势平坦等优势，大气气溶胶类型介于沙漠型和大陆型之间，接近沙漠型^[19]。地表主要由沙子、多种岩石碎屑及少量黏土组成，颜色主要是黑色和土黄色。场地边缘分布有少数稀疏骆驼刺，中心位置无植被覆盖^[20]。

2020 年 9 月，在敦煌辐射校正场利用无人机测量系统进行了地表方向特性测量实验，获得了无人机多角度数据，如图 3 所示。无人机所搭载的光谱仪是 SR-8800 便携式多功能地物光谱仪，光谱范围为 350~2500 nm，采样间隔每隔 1 nm 输出一个数据，共 2151 个光谱通道。多角度光谱测量时，无人机的飞行高度为 50 m，其代表的像元大小约为 24 m，可忽略地



图 2 敦煌国家场

Fig. 2 Dunhuang national site

表小尺度的差异，观测模式是定点测量，即对定点进行不同方位角和天顶角的观测。首先通过飞行前测量



图 3 多旋翼无人机 BRDF 观测系统

Fig. 3 BRDF observation system of multi rotor UAV

参考板对光谱仪进行标定,然后直接测量不同角度下的地表反射率,最后在完成飞行任务后再对地物光谱仪进行白板测量。观测方位角范围为 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$, 角度间隔为 30° ;观测天顶角范围为 $0^{\circ}\sim 50^{\circ}$, 角度间

隔为 10° ;太阳角度覆盖范围为 $40.275^{\circ}\sim 67.690^{\circ}$ 。9 月 22 日和 9 月 23 日分别获取 3 组 BRDF 多角度数据信息,如表 2 所示。

表 2 无人机测量系统测量信息

Table 2 Measurement information of UAV measurement system

Date	Time	Solar zenith /($^{\circ}$)	Solar azimuth /($^{\circ}$)
2020-09-22	13:20	40.275	174.242
	14:44	43.135	205.761
	16:30	55.551	236.041
2020-09-23	09:35	67.690	110.764
	11:10	52.165	131.700
	12:00	45.874	146.052

利用 RossThick- LiSparseR 的核驱动 BRDF 模型分别对 2020 年 9 月 22 日和 23 日实测的 6 组 BRDF 多角度数据进行拟合,得到 350~2500 nm 范围内,间隔为 1 nm 的 BRDF 模型各项核系数^[21],典型波长的 BRDF 模型的 $f_{iso} \sqrt{f_{geo}} \sqrt{f_{vol}}$ 如表 3 所示。

表 3 典型波长的 BRDF 模型参数
Table 3 BRDF parameters of typical bands

Wavelength / nm	BRDF parameter	2020-9-22			2020-9-23		
		First set of data	Second set of data	Third set of data	First set of data	Second set of data	Third set of data
645	f_{iso}	0.2872	0.3055	0.2753	0.2785	0.2544	0.2658
	f_{vol}	0.1218	0.0052	0.0868	0.1947	0.2294	0.1743
	f_{geo}	0.0166	0.0401	0.0208	0.0188	0.0078	0.0177
856	f_{iso}	0.2896	0.3094	0.2678	0.2631	0.2503	0.2617
	f_{vol}	0.1105	-0.0062	0.0882	0.1895	0.2261	0.1627
	f_{geo}	0.0179	0.0413	0.0181	0.0158	0.0066	0.0175
466	f_{iso}	0.2027	0.2143	0.1984	0.2001	0.1801	0.1887
	f_{vol}	0.1071	0.0270	0.0717	0.1581	0.1807	0.1455
	f_{geo}	0.0080	0.0245	0.0131	0.0075	0.0009	0.0079
553	f_{iso}	0.2562	0.2717	0.2484	0.2532	0.2284	0.2384
	f_{vol}	0.1205	0.0182	0.0827	0.1854	0.2284	0.1681
	f_{geo}	0.0129	0.0337	0.0182	0.0150	0.0053	0.0139
2113	f_{iso}	0.4018	0.4297	0.3583	0.3311	0.3388	0.3650
	f_{vol}	0.1103	-0.0369	0.1090	0.2660	0.2711	0.1738
	f_{geo}	0.0224	0.0519	0.0141	0.0035	-0.0003	0.0211

为验证所建立的 BRDF 模型对原始数据的拟合优度,将每个波段的核系数代入式(1)计算不同观测几何角度下的方向反射率。选取相同的角度信息,将模型计算得到的方向反射率与实验测量的方向反射率进行线性回归,并求出修正决定系数。图 4 分别为基于上述 6 组无人机数据建立的 BRDF 模型所计算的方向反射率与实际测量值的线性回归图,其中横坐标为敦煌场地实测方向反射率(Measured reflectance),纵坐标为模型计算的方向反射率(Calculated reflectance)。修正决

定系数分别为 0.9631、0.9610、0.8893、0.7489、0.9406 和 0.9813,表明所建立的模型具有良好的拟合优度。

2.4 地表反射率 BRDF 校正

基于敦煌场地无人机多角度观测数据,根据式(1)拟合得到 350~2500 nm 范围内间隔为 1 nm 的核系数 $f_{iso} \sqrt{f_{geo}} \sqrt{f_{vol}}$ 。然后,通过外推求出 MODIS 观测条件下敦煌场地的二向反射率。以 9 月 23 日的数据为例,在 53.940° 的观测天顶角和 73.30° 的观测方位角条件下的地表实测反射率与校正后的地表反射率如图 5 所示。

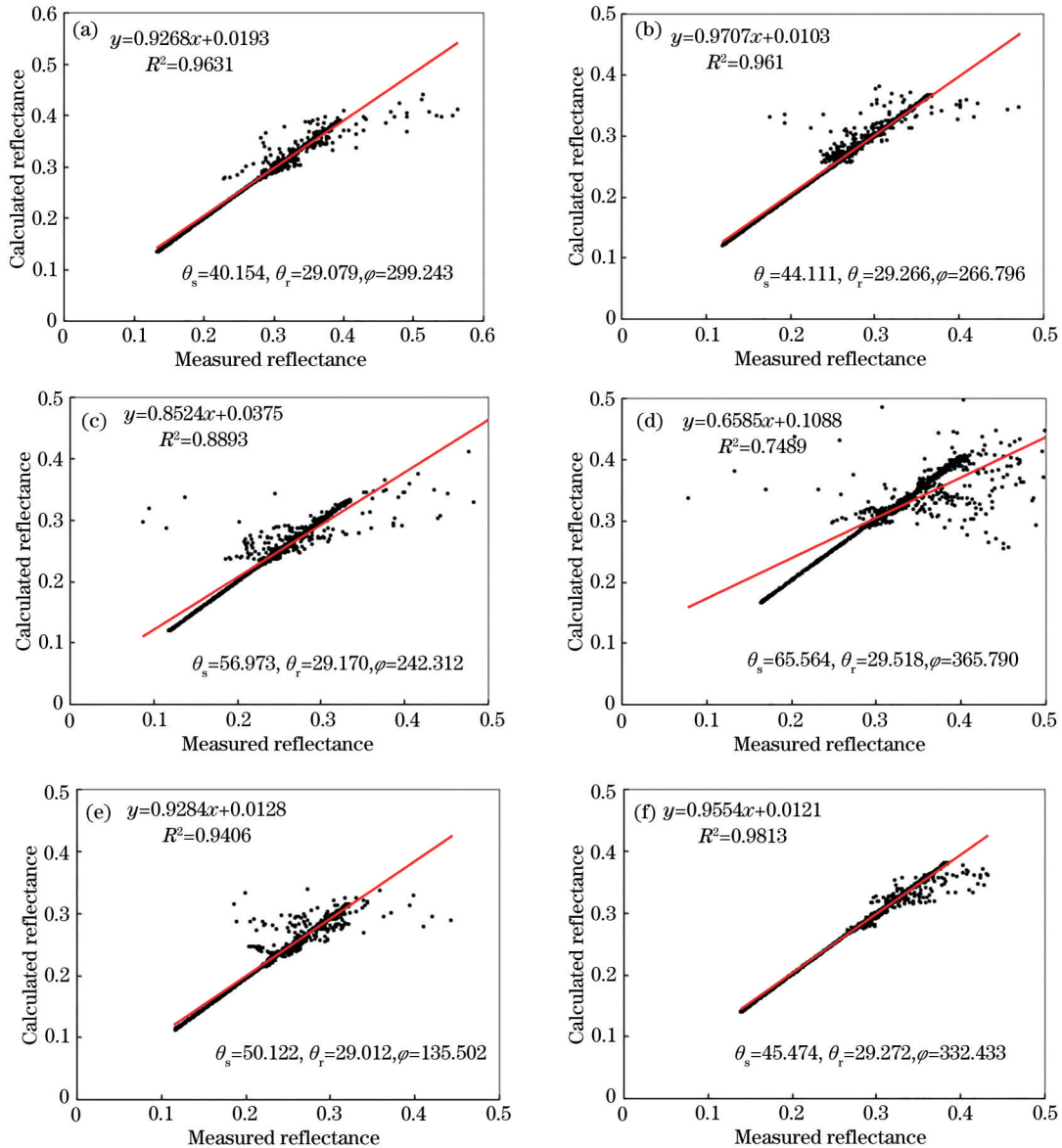


图 4 多组数据所建立的 BRDF 模型拟合优度。(a) 9 月 22 日第 1 组数据;(b) 9 月 22 日第 2 组数据;(c) 9 月 22 日第 3 组数据;
(d) 9 月 23 日第 1 组数据;(e) 9 月 23 日第 2 组数据;(f) 9 月 23 日第 3 组数据

Fig. 4 Goodness-of-fit for BRDF model established by multiple sets of data. (a) First set of data on September 22; (b) second set of data on September 22; (c) third set of data on September 22; (d) first set of data on September 23; (e) second set of data on September 23; (f) third set of data on September 23

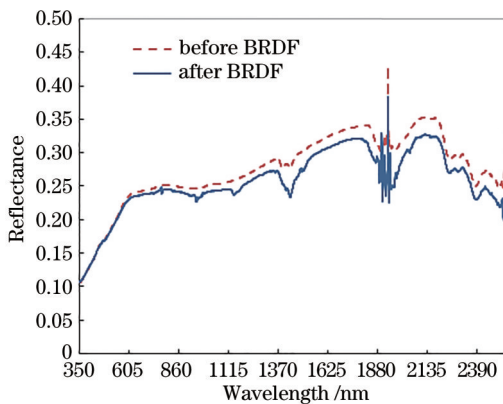


图 5 地物反射率的 BRDF 校正

Fig. 5 BRDF correction of surface reflectance

从图 5 中可以看出:在波长小于 605 nm 的情况下,地面光谱实际测量值与 BRDF 修正后的地表方向反射率基本一致;当波长大于 605 nm 时,两者会出现明显的偏差。

3 结果分析

为了定量分析卫星观测角度多大时,地表反射率需要进行 BRDF 校正,本实验组获得了 2020 年 9 月 17 日—2020 年 10 月 2 日敦煌场的地面测量光谱数据以及 MODIS 影像数据,并利用在敦煌场获得的无人机多角度数据构建 BRDF 模型,实现地表反射率的 BRDF 校正。然后,针对不同观测角度下的 MODIS 影像,分别将 BRDF 校正前和 BRDF 校正后的地表反射

率输入辐射传输模型,模拟出 MODIS 过境时刻波段 1~4 及波段 7 的表观反射率,与 MODIS 影像观测的表观反射率进行比较,获得两者的相对偏差(relative deviation)。最后,求出多个波段相对偏差的平均值(mean),结果如图 6 所示。

图 6 表示在不同波段下卫星观测值与模型计算表观反射率的相对偏差。从图中可以看出:Band 1

(645 nm) 的偏差在 0.35%~33.62% 之间;Band 2 (856 nm) 的偏差在 0.09%~26.60% 之间;Band 3 (466 nm) 的偏差在 1.92%~50.57% 之间;Band 4 (553 nm) 的偏差在 1.12%~38.03% 之间;Band 7 (2113 nm) 的偏差在 4.62%~20.16% 之间。短波段的相对偏差比长波段大,Band 3 和 Band 4 的相对偏差较大,Band 1、Band 2 和 Band 7 的相对偏差较小。

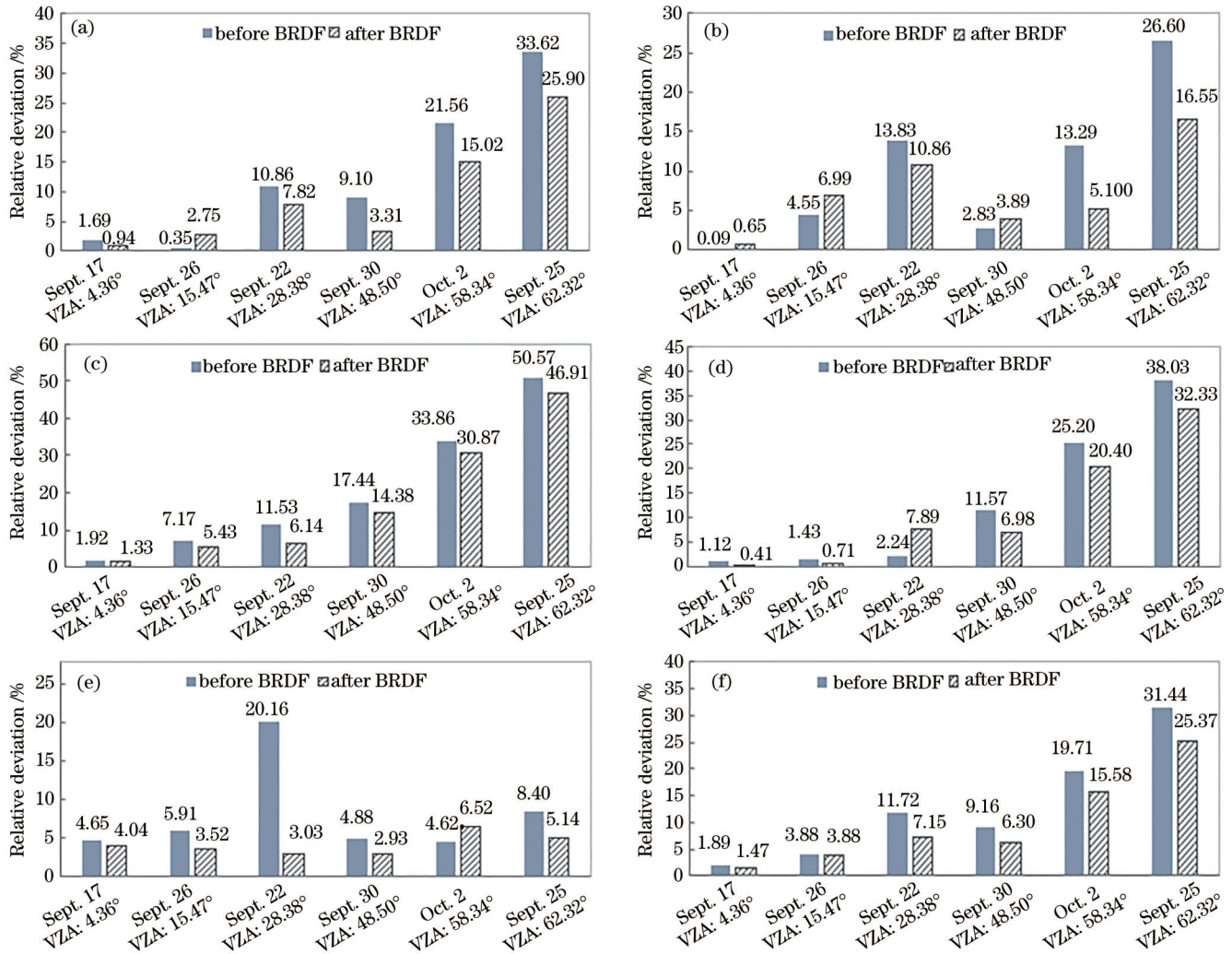


图 6 不同观测天顶角下 AQUA MODIS 模拟表观反射率与卫星观测值的相对偏差。(a) Band 1 (645 nm); (b) Band 2 (856 nm); (c) Band 3 (466 nm); (d) Band 4 (553 nm); (e) Band 7 (2113 nm); (f) 所有波段的均值

Fig. 6 Relative deviation between the simulated apparent reflectance of AQUA MODIS and its observations at different VZAs. (a) Band 1 (645 nm); (b) Band 2 (856 nm); (c) Band 3 (466 nm); (d) Band 4 (553 nm); (e) Band 7 (2113 nm); (f) average of all bands

[图 6(f)] 表示所有波段的平均相对偏差,当观测天顶角为 4.36° 时, BRDF 校正前的偏差不到 2%, 当观测天顶角为 15.47° 时, BRDF 校正前的偏差不到 5%; 当观测天顶角大于 28.38° 时, BRDF 校正前的偏差都在 9% 以上, 偏差较大。

由 [图 6(a)~(e)] 可知: 当观测天顶角为 4.36° 和 15.47° 时, BRDF 校正后的相对偏差与 BRDF 校正前的差异不大, 甚至在某些波段出现了 BRDF 校正后的偏差比 BRDF 校正前增大的情况 (比如当观测天顶角为 15.47° 时的 Band 1 和 Band 2); 当观测天顶角大于

28.38° 时, 各波段 BRDF 校正后的偏差比 BRDF 校正前有明显的降低, 各个波段的偏差降低约在 2%~17% 之间。

从 [图 6(f)] 可以看出: 当观测天顶角为 4.36° 和 15.47° 时, BRDF 校正后的平均偏差比校正前降低不到 0.5 个百分点; 但当观测天顶角大于 28.38° 时, BRDF 修正后的偏差比 BRDF 修正前有明显的降低, 校正后的平均偏差分别比校正前降低了 4.57 个百分点, 2.86 个百分点, 4.13 个百分点, 6.07 个百分点。

实验结果表明: 在敦煌场实验场, 当卫星观测天顶

角小于 15° 左右时, 相对偏差较小, 且 BRDF 校正对结果的影响不明显; 当卫星观测天顶角大于 28° 左右时, 相对偏差较大, BRDF 校正对结果的影响较大。

4 讨 论

在需要引入 BRDF 模型时, 利用无人机在不同测量时刻下获得的多角度观测数据所建立的 BRDF 模型是否有所差异? 以及在采用不同核函数组合方式的 BRDF 模型时, 哪一种组合方式的 BRDF 模型更好? 本实验组针对这两个方面的问题展开了讨论。

4.1 无人机不同测量时刻下 BRDF 模型的精度分析

实验获得了 2020 年 9 月 22 日和 9 月 23 日共 6 组

表 4 9 月 23 日 AQUA MODIS 模拟表观反射率与卫星观测值的相对偏差(BRDF 校正前与 6 组不同测量时刻下 BRDF 模型校正后)
Table 4 Relative deviation between AQUA MODIS simulated apparent reflectance and satellite observations on September 23 (before BRDF correction and after BRDF model correction with six sets of data at different measuring moment) unit: %

Band	Before BRDF	2020-9-22			2020-9-23		
		First set of data	Second set of data	Third set of data	First set of data	Second set of data	Third set of data
Band 1(645 nm)	9.85	7.11	1.99	5.92	6.81	9.19	6.81
Band 2(856 nm)	5.58	2.15	3.63	1.69	2.73	5.29	2.15
Band 3(466 nm)	16.12	15.16	12.08	14.10	15.39	16.67	15.25
Band 4(553 nm)	11.25	9.38	5.09	8.08	9.20	11.16	9.20
Band 7(2113 nm)	10.80	6.73	0.25	8.10	11.31	12.24	6.73
Mean	10.72	8.11	4.61	7.58	9.08	10.91	8.03

表 5 10 月 2 日 AQUA MODIS 模拟表观反射率与卫星观测值的相对偏差(BRDF 校正前与 6 组不同测量时刻下 BRDF 模型校正后)
Table 5 Relative deviation between AQUA MODIS simulated apparent reflectance and satellite observations on October 2 (before BRDF correction and after BRDF model correction with six sets of data at different measuringmoment) unit: %

Band	Before BRDF	2020-9-22			2020-9-23		
		First set of data	Second set of data	Third set of data	First set of data	Second set of data	Third set of data
Band 1(645 nm)	21.56	20.62	15.02	19.30	21.32	23.91	21.15
Band 2(856 nm)	13.29	11.79	5.10	11.17	13.68	16.54	12.75
Band 3(466 nm)	33.86	34.07	30.87	32.90	34.73	36.10	34.56
Band 4(553 nm)	25.20	24.95	20.40	23.53	25.50	27.61	25.46
Band 7(2113 nm)	4.62	2.10	6.52	3.55	9.49	10.35	3.24
Mean	19.71	18.70	15.58	18.09	20.94	22.90	19.43

从表 4、表 5 可以看出: 由 9 月 22 日第 1 组、第 2 组、第 3 组和 9 月 23 日第 3 组 BRDF 数据建立的 BRDF 模型可以使各波段的偏差相对于校正前有所降低; 由 9 月 23 日的第 1 组和第 2 组 BRDF 数据建立的 BRDF 模型反而使偏差有所增加。9 月 22 日第 1 组、第 2 组、第 3 组和 9 月 23 日第 3 组数据的测量时间分别为当天的 13:20、14:44、16:30 和 12:00; 9 月 23 日的第 1 组和第 2 组数据的测量时间分别为当天的 09:35 和 11:10。

这表明在建立 BRDF 模型时, 要考虑获取 BRDF 数据的测量时间, 若建立的 BRDF 模型不合适, 可能会增加误差而非减小误差。从上述 6 组 BRDF 模型的结果可以看出, 利用 12:00 之后的无人机多角度数据所

建立的 BRDF 模型优于 12:00 之前所建立的 BRDF 模型。并且在 6 组 BRDF 模型中, 由最接近卫星过境时刻所测量的 9 月 22 日第 2 组多角度观测数据得到的 BRDF 模型校正效果最好, 9 月 23 日和 10 月 2 日的两景 MODIS 影像均可验证。

无人机多角度观测数据, 每组数据均在不同的时刻开展测量工作。为了分析不同测量时刻下建立的 BRDF 模型精度差异, 基于 RossThick- LiSparseR 的核函数组合方式, 分别建立了 6 个不同测量时刻下的 BRDF 模型, 然后基于这 6 个 BRDF 模型分别计算 9 月 23 日(卫星过境时间为 14:10)和 10 月 2 日(卫星过境时间为 14:05)AQUA MODIS 大气顶层表观反射率。最后分别将 BRDF 校正前所计算的表观反射率和校正后所得到的表观反射率与卫星实测表观反射率进行比较, 并计算出相对偏差, 结果如表 4、表 5 所示。

4.2 不同核函数组合方式的 BRDF 模型精度分析

为开展敦煌场地 6 种不同核函数组合方式的 BRDF 模型适用性分析, 基于 9 月 22 日第 2 组多角度观测数据, 构建了 6 种不同组合方式的核驱动模型, 分别对 9 月 22 日(观测角度为 28.38°)、9 月 23 日(观测角度为 53.94°)、9 月 30 日(观测角度为 48.50°)和 10 月 2 日(观测角度为 58.34°)AQUA MODIS 影像进行分

析。将 BRDF 校正前所计算的表观反射率和校正后所得到的表观反射率分别与卫星实测表观反射率进行比

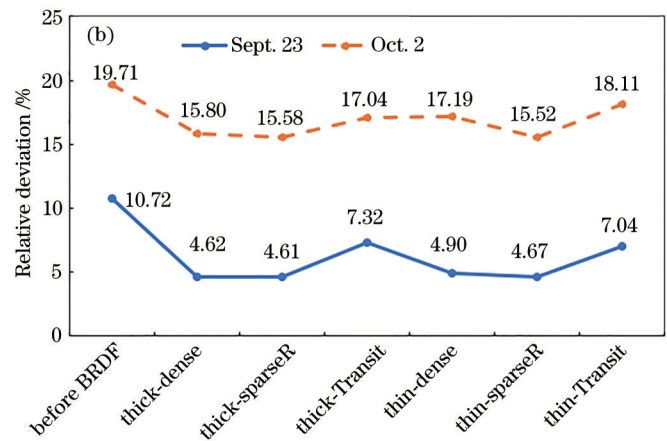
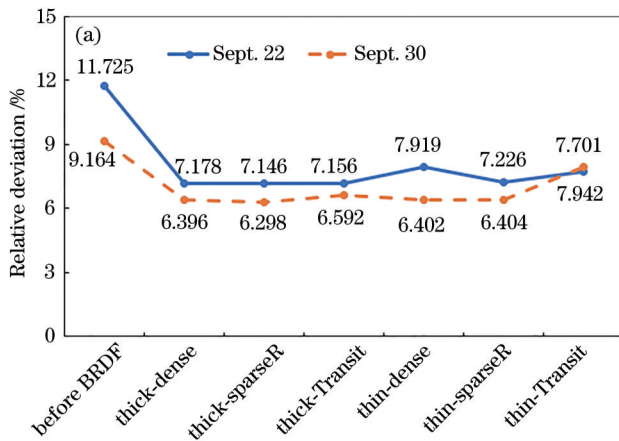


图 7 AQUA MODIS 模拟表观反射率与卫星观测反射率的相对偏差(BRDF 校正前与 6 种不同核函数组合下的 BRDF 模型校正后);(a) 9 月 22 日和 9 月 30 日; (b) 9 月 23 日和 10 月 2 日

Fig. 7 Relative deviation between simulated apparent reflectance of AQUA MODIS and its observations (before BRDF correction and after BRDF model correction under Six combinations of different kernel functions). (a) Sept. 22 and Sept. 30; (b) Sept. 23 and Oct. 2

从图 7 可以看出:无论采用哪种核函数组合方式的 BRDF 模型, BRDF 校正后的相对偏差均比 BRDF 校正前的相对偏差有所减小;且不同核函数组合方式的 BRDF 模型校正结果是有差异的。采用 thick-dense、thick-sparseR 和 thin-sparseR 这三种核函数组合方式所构建的 BRDF 模型计算的相对偏差都较小。

5 结 论

以 MODIS 影像的实测表观反射率作为参考,通过定量比较不同情况下模拟表观反射率和实测表观反射率的相对偏差,进行 BRDF 模型适用性研究。

研究结果表明,在敦煌场地,当卫星观测天顶角小于 15.47° 时,未经 BRDF 校正时偏差在 5% 以下,且校正后的平均偏差比校正前降低最高不到 0.5 个百分点, BRDF 校正的效果不明显,并且当模型使用不当时反而会增加误差。当卫星观测天顶角大于 28.38° 时,未经 BRDF 校正时偏差达到 9% 以上,偏差较大,且此时校正后的偏差可比较校正前降低 2.5 个百分点以上。此外,考虑了影响 BRDF 模型精度的一些因素,实验结果表明:采用不同测量时刻下的无人机多角度观测数据所建立的 BRDF 模型,其校正效果差异较大,采用接近卫星过境时刻测量的多角度观测数据所建立的 BRDF 模型最优。对于构建 BRDF 模型所采用的核函数组合方式,相对来说采用 Rossthick-Lidense、RossThick-LiSparseR 和 Rossthin-LiSparseR 这三种核函数组合方式所构建的 BRDF 模型对敦煌场的校正效果最好。

值得说明的是,本实验组只利用 2020 年 9 月和 10 月的多景 MODIS 影像进行分析,结果表明:当卫星

较,计算出相对偏差,以分析敦煌场地更适用于何种核函数组合方式的 BRDF 模型,结果如图 7 所示。

观测天顶角在大于 28° 时, BRDF 校正对结果的影响较大;当观测天顶角小于 15° 时, BRDF 校正对结果的影响不明显,后续可进一步继续对 $15^\circ \sim 28^\circ$ 之间的影像进行定量分析。并且需要指出的是,这个 28° 并不是严格推导出来的,而是在现有测量情况下分析出来的,因此对于具体情况需要进行进一步的深入研究。

参 考 文 献

- [1] 王志民. 中国资源卫星绝对辐射校正场[J]. 国土资源遥感, 1999, 11(3): 40-46.
Wang Z M. Ground test sites for absolute radiometric calibration of China resources satellite[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1999, 11(3): 40-46.
- [2] 许和鱼, 张黎明, 黄文薪, 等. 基于 HY-1C SCS 太阳漫反射板的星上绝对辐射定标与验证[J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0928002.
Xu H Y, Zhang L M, Huang W X, et al. On-board absolute radiometric calibration and validation based on solar diffuser of HY-1C SCS[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0928002.
- [3] 包诗薇, 陈洪耀, 张黎明, 等. 基于灰阶靶标的光学遥感器绝对辐射定标及反射率反演验证[J]. 光学学报, 2021, 41(4): 0428001.
Bao S W, Chen H Y, Zhang L M, et al. Absolute radiometric calibration of optical remote sensor based on gray-scale targets method and reflectance inversion validation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(4): 0428001.
- [4] 余谭其. BRDF 测量系统控制软件设计与敦煌场地实测数据处理及分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018: 1-2.
Yu T Q. Control software design of BRDF measurement system and processing and analyzing measured data of Dunhuang site data[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018: 1-2.

- [5] 何积泰, 陆亦怀. 敦煌辐射校正场方向反射特性测量与评价[J]. 遥感学报, 1997, 1(4): 246-251.
He J T, Lu Y H. The measurement and evaluation of bidirectional reflectance characteristics of Dunhuang radiative calibration site[J]. Journal of Remote Sensing, 1997, 1(4): 246-251.
- [6] 李新, 郑小兵, 寻丽娜, 等. 多角度测量系统实现室外 BRDF 测量[J]. 光电工程, 2008, 35(1): 66-70.
Li X, Zheng X B, Xun L N, et al. Realization of field BRDF acquisition by multiangular measurement system [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(1): 66-70.
- [7] 李新, 郑小兵, 寻丽娜, 等. 室外高光谱 BRDF 自动测量系统的设计[J]. 光学技术, 2008, 34(2): 262-264, 268.
Li X, Zheng X B, Xun L N, et al. Design of automated field hyperspectral BRDF measurement system[J]. Optical Technique, 2008, 34(2): 262-264, 268.
- [8] 余谭其, 韦玮, 张艳娜, 等. 敦煌辐射校正场春季 BRDF 特性分析[J]. 光子学报, 2018, 47(6): 0612004.
Yu T Q, Wei W, Zhang Y N, et al. Analysis of the BRDF characteristics of Dunhuang radiometric calibration site in the spring[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(6): 0612004.
- [9] 赵春艳, 张艳娜, 韦玮, 等. 基于场地高光谱 BRDF 模型的绝对辐射定标方法[J]. 光子学报, 2019, 48(5): 0528001.
Zhao C Y, Zhang Y N, Wei W, et al. Absolute radiometric calibration method based on surface hyperspectral BRDF model[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(5): 0528001.
- [10] 顾行发, 田国良, 余涛. 航天光学传感器辐射定标原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
Gu X F, Tian G L, Yu T. Principles and methods of radiation calibration for aerospace optical remote sensors [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [11] Wanner W, Li X, Strahler A H. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1995, 100(D10): 21077-21089.
- [12] Roujean J L, Leroy M, Deschamps P Y. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, 97(D18): 20455-20468.
- [13] Lucht W, Schaaf C B, Strahler A H. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(2): 977-998.
- [14] 李小文, 高峰, 刘强, 等. 新几何光学核的验证以及用核驱动模型反演地表反照率(之二)[J]. 遥感学报, 2000, 4(S1): 8-15.
Li X W, Gao F, Liu Q, et al. Validation of a new GO kernel and inversion of land surface albedo by kernel driven model (2)[J]. Journal of Remote Sensing, 2000, 4(S1): 8-15.
- [15] Berk A, Adler-Golden S M, Ratkowski A J, et al. Exploiting MODTRAN radiation transport for atmospheric correction: the FLASSH algorithm[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion (FUSION 2002), July 8-11, 2002, Annapolis, MD, USA. New York: IEEE Press, 2002: 798-803.
- [16] 张孟, 韦玮, 张艳娜, 等. Hyperion 高光谱遥感器的在轨自动化定标[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0528002.
Zhang M, Wei W, Zhang Y N, et al. On-orbit automated calibration of Hyperion hyperspectral remote sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0528002.
- [17] 何兴伟, 韩琦, 冯小虎, 等. FY-3B 卫星 MERSI 可见光近红外波段定标精度评估[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1828001.
He X W, Han Q, Feng X H, et al. Calibration accuracy evaluation of visible and near-infrared bands of FY-3B MERIS[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1828001.
- [18] Xiong X X, Chiang K F, Wu A S, et al. Multiyear on-orbit calibration and performance of terra MODIS thermal emissive bands[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(6): 1790-1803.
- [19] 高海亮, 顾行发, 余涛, 等. CCD 卫星相机时间序列定标: 以 CBERS02B 为例[J]. 测绘学报, 2011, 40(2): 180-187, 193.
Gao H L, Gu X F, Yu T, et al. Time-series calibration for CCD camera: taking CBERS02B satellite as an example[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(2): 180-187, 193.
- [20] Gao H L, Gu X F, Yu T, et al. Cross-calibration of GF-1 PMS sensor with Landsat 8 OLI and terra MODIS[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(8): 4847-4854.
- [21] 赵春艳, 韦玮, 张艳娜, 等. 基于场地高光谱 BRDF 模型的 Suomi-NPP VIIRS 长时序定标[J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0828001.
Zhao C Y, Wei W, Zhang Y N, et al. Long time series radiometric calibration of Suomi-NPP VIIRS based on surface hyperspectral BRDF model[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0828001.