

大气散射对地表双向反射分布函数反演的影响与修正

陈川^{1,2}, 易维宁¹, 崔文煜^{1*}, 黄红莲¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 准确地获取地表双向反射特性是遥感辐射定标和卫星全链路成像仿真的重要基础。在野外条件下通常使用实测的双向反射因子(BRF)反演得到双向反射分布函数(BRDF)。仿真分析显示,大气能见度分别为 23 km 和 15 km 时,同一地表的 BRF 方向性系数相差 19%。野外条件下实测的 BRF 因受大气散射的影响而不能准确表征地表方向反射特性。通过同步测量 2π 空间内的大气散射,提出一种 BRDF 反演方法。该方法将 BRF 实测值与测量模型计算值之间的残差作为反演的代价函数,以消除大气散射的影响,可反演地表真实的 BRDF 模型特征参数。结果证明方向反射特性是地物的固有属性,不随测量环境辐射的变化而变化。

关键词 散射; 双向反射分布函数; 双向反射因子; 大气散射; 双向反射分布函数反演

中图分类号 TP701

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0729001

Influence and Correction of BRDF Retrieval of Surface by Atmospheric Scattering

Chen Chuan^{1,2}, Yi Weining¹, Cui Wenyu¹, Huang Honglian¹

¹Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract Accurate acquisition of the bidirectional reflectance characteristic of surface is essential foundation of radiometric calibration and satellite full-chains imaging simulation. Bidirectional reflectance distribution function (BRDF) is retrieved by measured BRF in field environment. The simulation result shows that the relative difference between the BRF directional coefficients of the same surface is 19% when atmospheric visibility is 15 km and 23 km, respectively. Therefore the true directional reflectance feature can't be characterized by measured BRF in field environment due to the effect of atmospheric scattering. We propose a BRDF retrieval method, by the synchronous measurement of atmospheric scattering radiation in 2π solid angle. In this method, the residual between measured BRF and value calculated by measurement model is used as the cost function in inversion process, the effect of atmospheric scattering is deducted and the true BRDF parameters of surface are retrieved. The bidirectional reflectance characteristic is inherent attribute of surface and does not change with environment radiation.

Key words scattering; bidirectional reflectance distribution function; bidirectional reflectance factor; atmospheric scattering; bidirectional reflectance distribution function retrieval

OCIS codes 290.1483; 010.1285; 200.4560

1 引 言

地物材质的方向反射特性是进行遥感辐射定标和全链路成像仿真的重要基础^[1-4],通常使用双向反

射分布函数(BRDF)来表征,即出射亮度与入射照度的比值,但没有明确的解析表达式^[5]。学者们根据地物的各种特性进行大量的研究,建立了不同的 BRDF 模型^[6-7]。通常地物 BRDF 的研究方法是先对地物进

收稿日期: 2017-12-19; 收到修改稿日期: 2018-01-29

基金项目: 中国科学院创新基金项目(CXJJ-17S004)

作者简介: 陈川(1989—),男,博士研究生,主要从事全链路成像仿真方面的研究。E-mail: chuanch@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 易维宁(1956—),女,研究员,博士生导师,主要从事遥感信息处理方面的研究。E-mail: yiwn@aiofm.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: cuiwenyu@aiofm.ac.cn

行多角度采样测量,得到地物在不同入射和观测姿态下的双向反射因子(BRF)数据,然后根据测得的 BRF 数据反演 BRDF 模型的特征参数。因此,准确获得 BRF 数据是 BRDF 反演的前提与基础。

BRDF 的定义突出“双向”特性,它描述的是出射辐亮度随某入射方向照度的变化,而非入射方向上的入射辐射大小及其分布无关,是一个纯粹描述地物方向反射特性的物理量。因此,进行目标 BRDF 方向反射特性的精确测量时,常在暗室内使用平行光源作为入射光源,同时控制非入射方向的光照为零。自然条件下对地物的方向反射特性进行测量时,无法满足除太阳光以外其他方向的光照为零的理想条件,目标不但受太阳光直接照射,还受到 2π 空间内的大气散射光照射,这就为 BRF 的测量引入了一定的系统误差。因此,常选择大气散射效果较弱、大气能见度高的自然条件,以减少测量 BRF 时大气散射带来的影响,这为地物方向反射特性的测量提出了严苛的天气要求,且后续反演结果仍受大气散射的影响。

宋芳妮等^[8]使用一种目标与参考板双遮挡的方法在自然条件下测量目标的 BRF,该方法分别测量了入射光来自 2π 空间时和使用遮光板挡住太阳直射光时,目标和参考板的反射辐射亮度,然后使用 2 种光照条件下的测量结果对应相减的方法来消除环境辐射的影响,该方法需要 2 倍的测量工作量,且在散射辐射较强时测量误差较大。

本文提出一种 BRDF 模型参数反演方法,分析

了自然条件下大气散射对 BRF 测量结果的影响,模拟了同种地物在不同大气能见度条件下的 BRF,使用 BRF 测量的实测值与模型值之差作为 BRDF 模型参数反演过程中的代价函数,以扣除大气散射的影响,并论证了该方法的可行性。

2 自然条件下的 BRF 测量模型

实际地物方向反射特性的测量工作中,入射辐照度的测量相对困难,因此通常测量的是目标的 BRF,以此来描述其方向反射特性。BRF 的定义为:相同入射、出射几何条件下,目标的反射辐亮度与标准参考板(朗伯全反射体)反射辐亮度的比值,使用 R 表示,即

$$R(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{L_t(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{L_{\text{ref}}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)} = \frac{L_t(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{E_i(\theta_i, \varphi_i)/\pi} = \pi f(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r), \quad (1)$$

式中: θ, φ 分别表示天顶角和方位角;下标 i, r 分别表示入射和出射;出射亮度 $L_t(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 与入射照度 $E_i(\theta_i, \varphi_i)$ 的比值即为 BRDF,使用 $f(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 来表示。从(1)式可以看出,BRF 是 BRDF 的 π 倍。

在自然条件下进行 BRF 测量时,目标不但受到太阳光的直射照射,还受到来自 2π 空间内的大气散射辐射,即天空光的照射。在某个特定的出射条件下,探测器接收到来自参考板与目标反射的辐射亮度可分别表示为

$$\begin{cases} L_{\text{ref}}(\theta_r, \varphi_r) = \frac{\rho_{\text{ref}}}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\varphi_i \\ L_t(\theta_r, \varphi_r) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_i(\theta_i, \varphi_i) f(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\varphi_i \end{cases}, \quad (2)$$

式中: (θ_r, φ_r) 表示测量仪器的观测天顶角和方位角; $L_{\text{ref}}(\theta_r, \varphi_r)$ 与 $L_t(\theta_r, \varphi_r)$ 分别表示测量仪器在 (θ_r, φ_r) 方向上接收到的参考板与目标反射的辐射亮度; ρ_{ref} 表示参考板的反射率可能不为 1; $f(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 表示目标的 BRDF; $L_i(\theta_i, \varphi_i)$ 表示天顶角为 (θ_i, φ_i) 时的入射辐射。 $L_i(\theta_i, \varphi_i)$ 在非太阳入射方向全部表现为大气散射辐射 $L_i^{\text{diff}}(\theta_i, \varphi_i)$;当 (θ_i, φ_i) 等于太阳入射方向 (θ_s, φ_s) 时, $L_i(\theta_i, \varphi_i)$ 由太阳直射辐射[照度为 $E_{\text{sun}}(\theta_s, \varphi_s)$]和大气散射辐射 $L_i^{\text{diff}}(\theta_s, \varphi_s)$ 两部分组成。此时(2)式可表示为

$$\begin{cases} L_{\text{ref}}(\theta_r, \varphi_r) = \frac{\rho_{\text{ref}}}{\pi} \left[E_{\text{sun}}(\theta_s, \varphi_s) + \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_i^{\text{diff}}(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\varphi_i \right] \\ L_t(\theta_r, \varphi_r) = f(\theta_s, \varphi_s; \theta_r, \varphi_r) E_{\text{sun}}(\theta_s, \varphi_s) + \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_i^{\text{diff}}(\theta_i, \varphi_i) f(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\varphi_i \end{cases}, \quad (3)$$

则自然条件下 BRF 的测量模型可表示为

$$R(\theta_s, \varphi_s; \theta_r, \varphi_r) = \frac{\pi}{\rho_{\text{ref}}} \frac{f(\theta_s, \varphi_s; \theta_r, \varphi_r) E_{\text{sun}}(\theta_s, \varphi_s) + \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_i^{\text{diff}}(\theta_i, \varphi_i) f(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\varphi_i}{E_{\text{sun}}(\theta_s, \varphi_s) + \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_i^{\text{diff}}(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\varphi_i}, \quad (4)$$

从(4)式中可以看出来:自然条件下测量得到的BRF严重依赖于 2π 空间内大气散射辐射 L_i^{diff} ,而与BRF的理论定义值之间存在差异。当不存在大气散射时,即除太阳直射外其他方向散射辐射全为零时($L^{\text{diff}}=0$), (4)式就简化为在实验室内进行BRF测量的情况,此时测量得到的BRF值等于理论BRF值,即

$$R(\theta_s, \varphi_s; \theta_r, \varphi_r | L^{\text{diff}}=0) = \pi \times f(\theta_s, \varphi_s; \theta_r, \varphi_r) / \rho_{\text{ref}}. \quad (5)$$

3 大气散射对 BRF 测量的影响

为说明大气散射对自然条件下 BRF 测量结果的影响,使用辐射传输软件 MODTRAN 模拟了晴天条件下大气能见度(VIS, X_{VIS})分别为 23, 15, 5 km 时和阴天时(云类型卷云、云底高 2.4 km, 云顶高 3 km)的太阳直射照度和 2π 空间内的大气散

射辐射。MODTRAN 其他参数设置为:中纬度夏季大气模式、城市型气溶胶、第 150 d、太阳天顶角 30° 、目标海拔 0 m、波长 400~700 nm。表 1 和图 1 分别给出了 4 种天气情况下太阳直射照度和 2π 空间内大气散射辐射在极坐标内的分布。图 1 中以太阳所在的方向为 0° 方位角,顺时针为正。为了能显示大气散射更多的空间分布细节,Z 轴表示为以 e 为底的对数坐标。

表 1 MODTRAN 模拟的太阳直射照度

Table 1 Solar irradiation simulated by MODTRAN

Weather condition	X_{VIS}/km	Solar irradiation / ($\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)
Sunny	23	3.856×10^{-2}
Sunny	15	2.727×10^{-2}
Sunny	5	1.934×10^{-2}
Cloudy		0

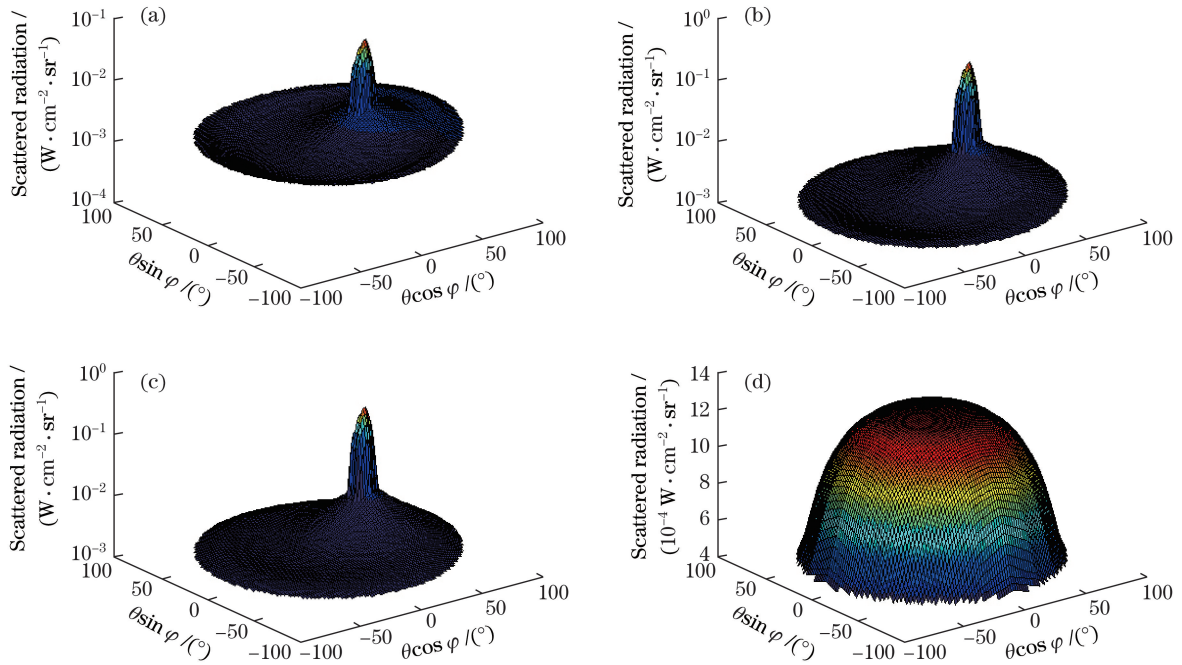


图 1 大气散射辐射在半球空间内不同天气条件下的分布。(a)能见度 23 km;(b)能见度 15 km;(c)能见度 5 km;(d)阴天

Fig. 1 Distributions of atmospheric scattered radiation under different weather conditions in hemisphere.

(a) $X_{\text{VIS}}=23 \text{ km}$; (b) $X_{\text{VIS}}=15 \text{ km}$; (c) $X_{\text{VIS}}=5 \text{ km}$; (d) cloudy

从图 1 中可以看出,1)对于晴天,大气能见度对大气散射具有较大的影响,能见度越低,散射作用越强;2)大气散射的入射方向与太阳入射方向夹角越

小,辐射越强;3)大气散射在 2π 空间内,太阳主平面中太阳入射方向与天顶方向构成的平面呈对称分布;4)在与太阳关于天顶呈对称的反日点($\theta=\theta_s$,

$\varphi = 180^\circ$)处天空散射存在极小值,在反日点同侧,当天顶角逐渐增大时散射辐射又增强,这是由于天顶角越大,光程越长,后向散射效果越强,天空亮度逐渐增大;5)在阴天,由于云层遮挡,天空光的空间分布与太阳光入射方向和观测的方位角无关,并在天顶方向取得最大值。

Roujean 模型^[9]是一种通用的描述目标 BRDF 特性的半经验线性核驱动模型,模型仅包含三个特征参数(k_0, k_1, k_2),具有形式简单、可快速反演的优点,已作为一种标准的 BRDF 模型集成到 MODTRAN 中。假设某种地物表面的方向反射特性分布符合 Roujean 模型,特征参数分别为: $k_0 = 8.690, k_1 = 1.655, k_2 = 8.563$,则在理想条件下(除入射方向外的 2π 空间内无入射辐射)的 BRF 可根据模型直接计算得到。当入射天顶角为 30° 时,该地物的 BRF 空间分布如图 2 所示。

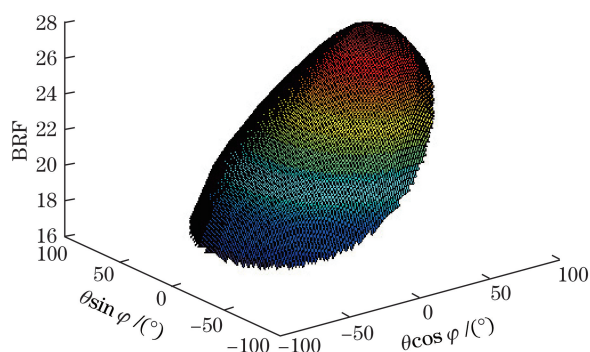


图 2 Roujean 模型计算的 BRF 空间分布
Fig. 2 Distribution of BRF calculated by Roujean

根据(4)式描述的自然条件下 BRF 的测量模型和不同天气条件下的大气散射,模拟了地物在 4 种天气条件下的 BRF 空间分布,其结果如图 3 所示。图 4 描述了不同天气条件下太阳主平面内 BRF 的分布。

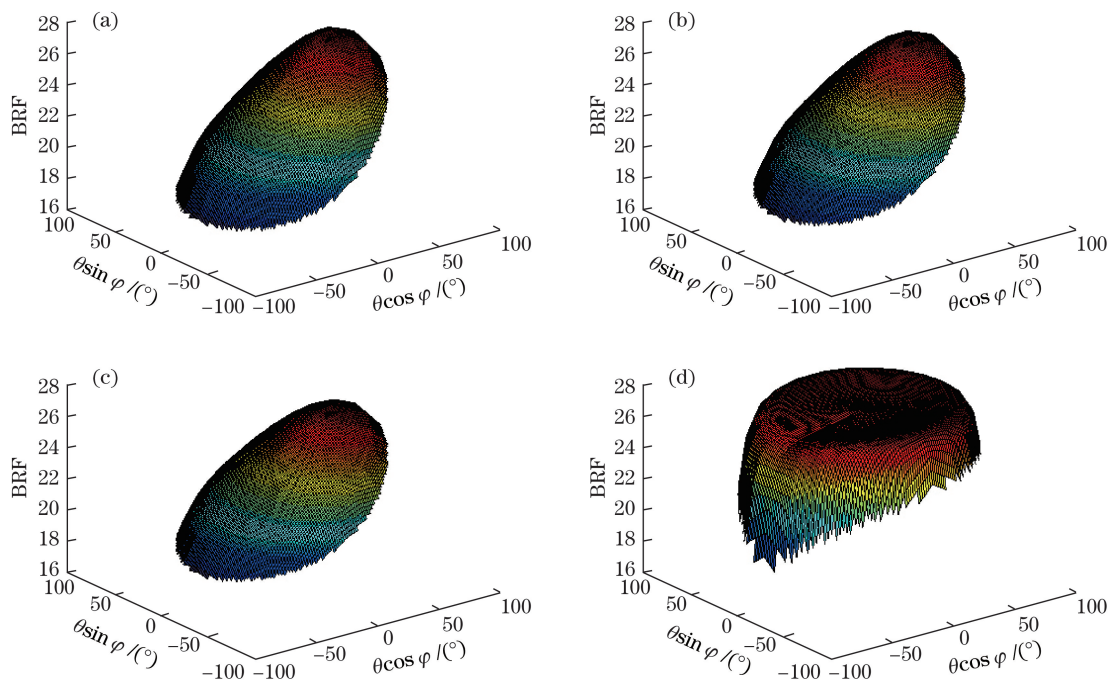


图 3 模拟不同天气条件下 BRF 空间分布。(a)能见度 23 km;(b)能见度 15 km;(c)能见度 5 km;(d)阴天
Fig. 3 Distributions of simulated BRF under different weather conditions. (a) $X_{vis} = 23$ km; (b) $X_{vis} = 15$ km; (c) $X_{vis} = 5$ km; (d) cloudy

使用不同观测角度下 BRF 数据的方差来衡量地物方向反射特性的强弱,则上述 5 种 BRF 结果(Roujean 模型计算理论值和 4 种不同天气条件下的测量值)的方向反射特性强弱如表 2 所示。

模拟结果表明,1)在晴天,该地物反射分布具有较强的方向性,模拟的 BRF 在观测方向与太阳入射方向相同(即 $\theta_s = \theta_r, \varphi_s = \varphi_r$)时有最大值,该现象称为热点效应,这是因为此时传感器视场内观测到的

区域全部被太阳照射,不存在因遮挡产生的阴影;2)当能见度分别为 23 km 和 15 km 时,同一地物的方向反射特性相差达 19%,在阴天,模拟结果的方差最小,即地物的方向性最弱;3)模拟的 BRF 分布与环境辐射具有很大的依赖关系,当大气能见度逐渐升高时,大气散射效果逐渐减弱,模拟数据的方差逐渐增大,方向性越来越明显,并逐渐向 BRDF 模型计算的结果靠近。

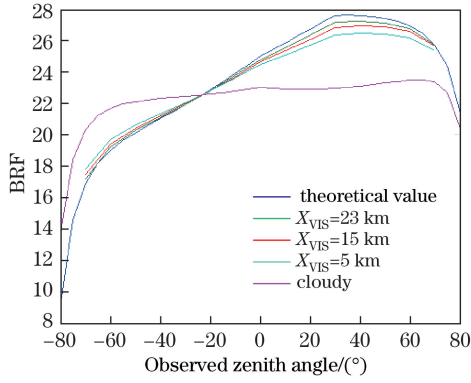


图 4 太阳主平面内的模拟 BRDF 分布

Fig. 4 Simulated BRDF in solar principal plane

表 2 BRDF 结果的方向反射特性强弱

Table 2 Magnitude of directional reflectance characteristic of the BRDF results

Weather condition	X_{VIS}/km	Variance
Theoretical condition		14.170
Sunny	23	12.665
Sunny	15	10.266
Sunny	5	4.470
Cloudy		1.685

4 扣除大气影响的 BRDF 反演与验证

BRDF 模型特征参数的反演方法是:通过选用恰当的代价函数 E ,使用最优化方法求解 BRDF 模型的特征参数,使代价函数具有最小值,此时表现为 BRDF 模型计算的数据与测量得到的数据具有最优拟合。以下 BRDF 模型若未作特殊说明均以 Roujean 模型为例进行论述。

经典反演方法认为实测的 BRDF 应满足 Roujean 模型所描述的空间分布,选择将实测 BRDF 数据与 Roujean 模型计算的 BRDF 数据之间的残差作为代价函数,即

$$E(k) = \sum_{\theta_r} \sum_{\varphi_r} [R_{\text{mea}}(\theta_s, \varphi_s, \theta_r, \varphi_r) - \pi \times f_{\text{Roujean}}(\theta_s, \varphi_s, \theta_r, \varphi_r, \hat{k}_0, \hat{k}_1, \hat{k}_2)]^2, \quad (6)$$

式中: $R_{\text{mea}}(\theta_s, \varphi_s, \theta_r, \varphi_r)$ 表示实际测得的 BRDF 值; $f_{\text{Roujean}}(\theta_s, \varphi_s, \theta_r, \varphi_r, \hat{k}_0, \hat{k}_1, \hat{k}_2)$ 表示 Roujean 模型的解析表达式;对于线性的 Roujean 模型使用最小二乘法即可反演得到 3 个特征参数 \hat{k}_0, \hat{k}_1 和 \hat{k}_2 。

与经典反演方法不同,实验充分考虑了 2π 空间内大气散射对实测 BRDF 值的影响,即 $R_{\text{mea}}(\theta_s, \varphi_s, \theta_r, \varphi_r)$ 应满足(4)式所描述的分布而不是 Roujean 模型。

为扣除大气散射对 BRDF 测量结果的影响,使用实测 BRDF 数据 $R_{\text{mea}}(\theta_s, \varphi_s, \theta_r, \varphi_r)$ 与(4)式所描述的 BRDF 测量模型之间的残差作为反演的代价函数,即

$$E(k) = \sum_{\theta_r} \sum_{\varphi_r} [R_{\text{mea}}(\theta_s, \varphi_s, \theta_r, \varphi_r) - R_{\text{Roujean}}(\theta_s, \varphi_s, \theta_r, \varphi_r, \hat{k}_0, \hat{k}_1, \hat{k}_2)]^2, \quad (7)$$

式中: $R_{\text{Roujean}}(\theta_s, \varphi_s, \theta_r, \varphi_r, \hat{k}_0, \hat{k}_1, \hat{k}_2)$ 表示地物的 BRDF 满足 Roujean 模型时的 BRDF 测量模型。 2π 空间内不同方向上的大气散射辐射 $L_i^{\text{diff}}(\theta_i, \varphi_i)$ 可使用天空亮度计对半球天空扫描测量得到,也可通过同步测量大气光学参数后使用辐射传输软件(如 MODTRAN)计算得到。

通过同步获得 2π 空间内的大气散射辐射,选择(7)式作为反演的代价函数,能扣除在自然条件下大气散射对实测 BRDF 的影响,反演得到目标真实的 BRDF 模型特征参数。

为验证上述反演方法扣除大气散射影响的可行性,分别使用经典反演方法和实验方法对不同天气条件下模拟的 BRDF 数据进行 Roujean 模型特征参数的反演,其结果如表 3 所示。

表 3 基于模拟 BRDF 数据反演的 BRDF 模型特征参数

Table 3 Retrieved BRDF parameters based on simulated BRDF

Weather condition	X_{VIS}/km	Classical method			Proposed method		
		k_0	k_1	k_2	k_0	k_1	k_2
Sunny	23	8.608	1.566	8.390	8.690	1.655	8.563
Sunny	15	8.467	1.407	7.240	8.690	1.655	8.563
Sunny	5	8.360	1.256	7.059	8.690	1.655	8.563
Cloudy		7.615	0.452	0.469	8.690	1.655	8.563

从表 3 的反演结果中可以看出,在不同的天气条件下,实验的反演方法均能准确获得目标真实的模型特征参数;而经典反演方法获得的模型特征参数受天气条件的影响大,且与真实值之间存在一定的误差。对于经典反演方法,随着大气能见度的降低,大气散射效果逐渐增强,代表几何阴影作用强弱的 k_1 参数逐渐减小;主要依赖于方位角的 k_2 在阴天时明显小于晴天,表明观测方位角对方向性的影响在阴天时远小于晴天。

5 BRDF 反演实验

为验证方法对实际地物 BRDF 特征参数的反演能力,分别于 2017 年 10 月 23 日和 2017 年 10 月 28 日在安徽省合肥市科学岛(东经 117.22° , 北纬

31.85°)对铺设在沙土上的土黄色涂层织物进行2次自然条件下的BRF测量实验。其中10月23日为阴天,可认为太阳直射辐射为零;10月28日为晴天,无云,测量时太阳天顶角约为45°。使用BRDF测量架搭载SVC光谱仪和ASD光谱仪分别对目标织物和天空进行多角度的采样测量,其中SVC光谱仪的光纤朝向始终对准织物,而ASD光谱仪的光纤与SVC的光纤平行但测量方向相反,以完成对半球天空的测量。测量时观测天顶角采样范围为0°~70°,间隔10°;观测相对方位角为0°~330°,间隔30°,共计96组数据。采样测量完成后使用ASD光谱仪对太阳入射方向附近进行了单独测量,整个测量时间约用时15min,2次测量的大气散射和BRF分别如图5、图6所示。

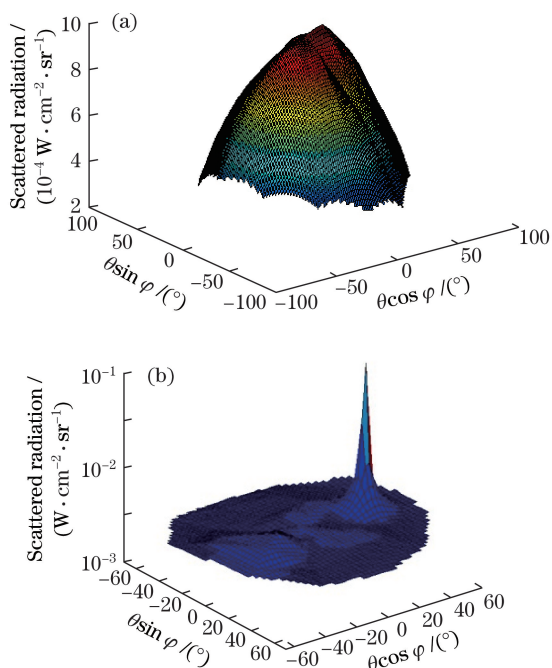


图5 实测的大气散射辐射空间分布。(a)阴天;(b)晴天
Fig. 5 Distributions of measured atmospheric scattered radiation. (a) Cloudy; (b) sunny

从图6中可以看出,目标织物的方向反射特性在晴天时明显强于阴天。使用经典方法和实验方法分别对2次BRF测量结果进行特征参数反演,其结果如表4所示。

表4 基于实测BRF反演的BRDF特征参数

Table 4 Retrieved BRDF parameters based on measured BRF

Weather condition	Classical method			Proposed method		
	k_0	k_1	k_2	k_0	k_1	k_2
Cloudy	7.547	0.711	5.524	8.379	1.270	17.911
Sunny	8.347	1.354	19.984	8.833	1.487	20.422

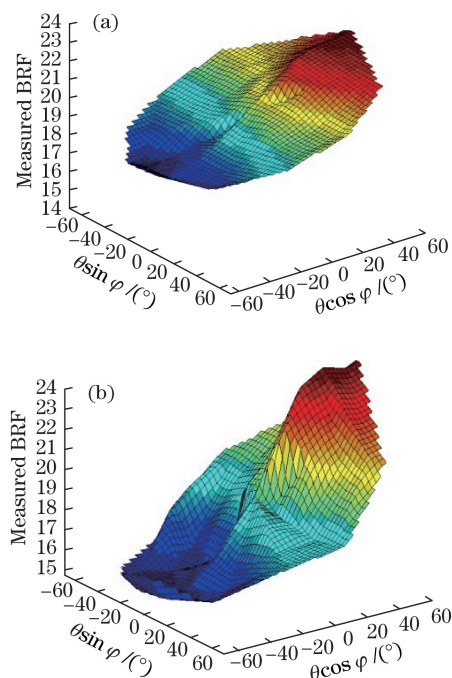


图6 实测的BRF空间分布。(a)阴天;(b)晴天
Fig. 6 Distributions of measured BRF. (a) Cloudy; (b) sunny

从表4可以看出,使用经典方法反演得到的不同天气条件下BRDF参数有较大的差异, k_1 、 k_2 在阴天时的数值明显小于晴天,说明同一地物在阴天的方向反射效果较弱;而使用实验方法在不同天气条件下反演得到的BRDF参数比较接近,极大地缩小了 k_1 、 k_2 在不同天气条件下的差距。

为说明实验方法的反演精度,2018年1月12日夜晩对织物进行了第3次方向反射率的测量。测量时来自 2π 空间内的大气散射为零,织物只受天顶角为45°(与2017年10月28日晴天测量时天顶角相同)人造直射光的照射,测量仪器与入射光的相对方位角为15°,观测天顶角从-45°~45°,间隔15°。使用Roujean模型根据表4反演的不同模型特征参数计算相同观测角度下的BRF值,结果如图7所示。

使用实测BRF值与BRDF模型计算的BRF值之间相对误差的最大值来衡量反演方法的反演精度,结果如表5所示。

表5 经典方法与实验方法在不同天气条件下的反演精度比较

Table 5 Comparison of the retrieval precision between the classical and proposed methods under different weather conditions

Weather condition	Classical method	Proposed method	%
Cloudy	25.70	9.71	
Sunny	9.53	6.21	

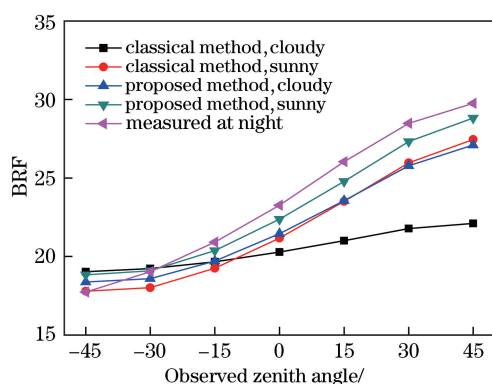


图 7 实测 BRF 值与不同特征参数计算的 BRF 值对比

Fig. 7 Comparison between actual measured BRF at night and BRF calculated by different parameters

从表 5 可以看出,天气晴好时,即使在强散射条件下进行地物 BRF 测量与反演,使用实验方法反演的精度也与经典方法反演的精度相当,说明实验方法能有效扣除大气散射的影响。

6 结 论

通过描述自然条件下 BRF 的测量模型,分析了不同天气条件下大气散射对 BRF 测量结果的影响,提出了一种基于自然条件下测量 BRF 数据并准确反演地物 BRDF 的方法。实验使用 BRF 测量模型取代经典反演方法使用的 BRDF 模型作为反演的代价函数中的标称值,较好地扣除了大气散射影响,从而得到目标真实的 BRDF 模型特征参数,极大地提高了模型参数反演精度,结果证明方向反射特性是地物的固有属性,不随测量环境辐射的变化而变化。实验方法能有效扣除大气散射对 BRF 测量结果的影响,使得自然条件下的 BRF 测量工作不再受能见度、漫总比等严苛气象条件的限制,在低能见度、强散射条件也可以开展地物 BRF 测量与 BRDF 模型特征参数反演工作。

参 考 文 献

[1] Schott J R. Remote sensing: the image chain

approach[M]. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2007: 121-124.

- [2] Schaepman-Strub G, Schaepman M E, Painter T H, *et al.* Reflectance quantities in optical remote sensing—definitions and case studies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103(1): 27-42.
- [3] Li J L, Zhang L M, Chen H Y, *et al.* Development of BRDF absolute measuring device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0528002.
李俊麟, 张黎明, 陈洪耀, 等. 双向反射分布函数绝对测量装置研制[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0528002.
- [4] Zheng X B. Some respects for development of radiometric calibration techniques for optical remote sensing satellites[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, 9(1): 2-8.
郑小兵. 发展光学遥感卫星辐射定标技术的几点思考[J]. *大气与环境光学学报*, 2014, 9(1): 2-8.
- [5] Nicodemus F E, Richmond J C, Hsia J J, *et al.* Geometric considerations and nomenclature for reflectance[J]. *National Bureau of Standards Monograph*, 1977, 160: 1-52.
- [6] Zhang X Z, Du P P, He Y, *et al.* Review of research and application for vegetation BRDF[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(3): 829-835.
张徐洲, 杜朋朋, 何勇, 等. 植物 BRDF 研究及应用进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(3): 829-835.
- [7] Huang X, Bai L, Wu Z S. BRDF model of bare surface over rugged terrain[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0129001.
黄珣, 白璐, 吴振森. 裸露起伏地表的 BRDF 模型[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0129001.
- [8] Song F N, Fan W J, Liu Q, *et al.* A method of acquiring BRDF of objects in the field[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(3): 296-302.
宋芳妮, 范闻捷, 刘强, 等. 一种获取野外实测目标物 BRDF 的方法[J]. *遥感学报*, 2007, 11(3): 296-302.
- [9] 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*, 1992, 97(18): 20455.