

基于广义逆矩阵的BRDF模型参数拟合方法

赵佳乐, 周冰, 王广龙, 应家驹, 王强辉, 邓磊

Parameter fitting method of BRDF model based on generalized inverse matrix

引用本文:

赵佳乐,周冰,王广龙,应家驹,王强辉,邓磊. 基于广义逆矩阵的BRDF模型参数拟合方法[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 407-412.

ZHAO Jiale,ZHOU Bing,WANG Guanglong,YING Jiaju,WANG Qianghui,DENG Lei. Parameter fitting method of BRDF model based on generalized inverse matrix[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(3): 407-412.

您可能感兴趣的其他文章

1. 一种基于吸收峰特征的高光谱曲线匹配方法

引用本文: 石俊峰, 郭宝峰, 沈宏海, 等. 一种基于吸收峰特征的高光谱曲线匹配方法[J]. *激光技术*, 2016, 40(6): 848-852.

2. 基于改进的偏最小二乘法的LIBS钢液成分定量分析

引用本文: 马翠红, 崔金龙. 基于改进的偏最小二乘法的LIBS钢液成分定量分析[J]. *激光技术*, 2016, 40(6): 876-881.

3. 基于热电制冷器温控系统数学建模和参量辨识

引用本文: 王选择, 侯洪洋, 翟中生, 等. 基于热电制冷器温控系统数学建模和参量辨识[J]. *激光技术*, 2015, 39(6): 789-793.

4. 基于光谱梯度角的高光谱影像流形学习降维法

引用本文: 向英杰, 杨桃, 张俭峰, 等. 基于光谱梯度角的高光谱影像流形学习降维法[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 921-926.

5. 基于激光引信的回波仿真及抗干扰研究

引用本文: 黄泽青, 贺伟. 基于激光引信的回波仿真及抗干扰研究[J]. *激光技术*, 2020, 44(6): 716-720.

文章编号: 1001-3806(2023)03-0407-06

基于广义逆矩阵的 BRDF 模型参数拟合方法

赵佳乐¹, 周冰^{1*}, 王广龙^{2*}, 应家驹¹, 王强辉¹, 邓磊¹

(1. 中国人民解放军陆军工程大学 石家庄校区 电子与光学工程系, 石家庄 050003; 2. 中国人民解放军陆军工程大学 石家庄校区 导弹工程系, 石家庄 050003)

摘要: 为了提高二向性反射率分布函数(BRDF)模型参数拟合的效率, 充分了解地物目标的光谱方向特性, 提出了一种基于广义逆矩阵的 BRDF 模型参数拟合方法。首先分析了地物光谱反射的方向特性, 然后使用成像光谱仪测量不同方向条件下目标的光谱反射率, 将实验条件与先验测量数据代入 BRDF 模型中, 建立广义逆矩阵等式并拟合出测量目标的模型参数; 利用拟合的目标 BRDF 模型参数反推任意特定方向条件下的光谱反射率, 并与实测数据作对比, 采用光谱角制图法度量其相似度。结果表明, 草地和迷彩雨衣的拟合光谱曲线与实测光谱曲线的相似度很高, 分别达到了 0.1307 和 0.0896, 证实了该参数拟合方法的有效性, 同时也验证了 BRDF 模型的泛化拟合能力。该方法原理简单、快速有效, 可为其它类型的 BRDF 模型参数拟合与后续地物目标光谱特性研究提供参考。

关键词: 光谱学; BRDF 模型; 广义逆矩阵; 参数拟合

中图分类号: TP751; O433.1

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.03.019

Parameter fitting method of BRDF model based on generalized inverse matrix

ZHAO Jiale¹, ZHOU Bing¹, WANG Guanglong², YING Jiaju¹, WANG Qianghui¹, DENG Lei¹

(1. Department of Electronic and Optical Engineering, Shijiazhuang Campus, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China; 2. Department of Missile Engineering, Shijiazhuang Campus, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of parameter fitting of binary reflectance distribution function (BRDF) model and understand the spectral direction characteristics of ground object more specifically, a method of parameter fitting of BRDF model based on generalized inverse matrix was proposed. Firstly, the directional characteristics of spectral reflection of ground objects were analyzed, and then the spectral reflectance of targets in different directions was measured by imaging spectrometer. The experimental conditions and a priori measurement data were substituted into BRDF model, the generalized inverse matrix equation was established, and the model parameters of measurement targets were fitted. Using the BRDF model parameters of fitting the push any particular direction under the condition of spectral reflectance and compared with experimental data. Spectral angle mapping method was used to measure its similarity and the results showed that the grass and camouflage raincoat fitting spectrum curve and the measured spectral curve similarity is very high, up to the 0.1307 and 0.0896, confirmed the validity of the parameter fitting method, the ability to verify the generalization of the BRDF model fitting. This method is simple in principle, fast and effective, and provides reference for other types of BRDF model parameter fitting and subsequent research on spectral characteristics of ground objects.

Key words: spectroscopy; binary reflectance distribution function; generalized inverse matrix; parameter fitting

引言

地物对太阳辐射的反射作用具有各向异性, 二向

作者简介: 赵佳乐(1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高光谱图像处理技术。

* 通讯联系人。E-mail: zhbqxc@163.com; glwang2005@163.com

收稿日期: 2022-03-24; 收到修改稿日期: 2022-04-18

性反射率分布函数(binary reflectance distribution function, BRDF)模型常用于描述地表各向异性反射的基本特征^[1]。BRDF 模型同时考虑了地物目标的方向特性与光谱特性, 能够更加全面地描述不同方向条件下地物的光谱特征, 在测量上, 常用二向反射因子(binary reflection factor, BRF)来近似^[2-4]。建立典型地物的 BRDF 模型通常需要大量的不同方向条件下反射率数据, 结合参数拟合的方法能够得到体现地物本身方向

光谱特征的参量。近年来,关于 BRDF 模型的研究取得了长足的进展,其中半经验核驱动模型综合考虑了地物本身的物理因素与经验数据,拟合与反演能力突出。LI 等人通过实验数据证明了半经验核驱动模型的拟合能力以及反演能力,并参考了其它线性模型的想法,提出了使用线性组合来拟合地物的反射特征^[5-6]。同时,为了提高模型分析评估效率,ZHAO 等人提出了一种利用多角度影响计算 BRDF 模型的方法与系统,将建立 BRDF 模型的过程编写到软件中,大大提高了模型分析的速度和精度^[7]。目前,BRDF 已广泛应用于各个领域,ZHANG 等人利用 BRDF 原型和单方向反射率数据精确估算了地表反照率^[8],BRDF 模型在叶面积指数^[9]、聚集指数^[10]等植被结构参数的反演中也起到了关键作用。

广义逆矩阵的概念在 1920 年就被提出,但并没有得到充分的理解与足够的重视。直到 1955 年 PENROSE 定义了 Moore-Penrose (M-P) 广义逆矩阵,广义逆矩阵理论才被广泛应用。通俗地讲,广义逆矩阵是逆矩阵概念的推广,使得每个矩阵甚至是非方块的矩阵都有广义逆并加以应用。XIA 等人提出了利用广义逆矩阵求一般曲线拟合方程的方法,使得问题简单化标准化^[11]。WANG 等人利用 M-P 广义逆的方法,探讨了复矩阵方程的最小二乘 Hermitian 解,推导出了该类方程最小范数约束的最小二乘 Hermitian 解的解析形式^[12]。

本文中首先简要介绍了常用 BRDF 半经验核驱动模型——RossThick-LiSparseR 模型以及广义逆矩阵拟合方法的原理,而后利用地面成像光谱仪测出典型地物在不同方向条件下的光谱曲线,得到目标在特定方向下的二向反射率数据;结合实验结果与方向条件,利用广义逆矩阵的方法拟合出目标地物的 RossThick-LiSparseR 模型参数并进行有效性验证。这项工作对于建立典型地物目标的全方向地面光谱数据库具有重要作用,为依据精细光谱信息进行目标分类与检测提供了数据理论基础,具有重要意义^[13-14]。

1 地物光谱反射的方向特性

通过星载或者机载方式得到的高光谱图像获取目标反射率信息需要经过复杂的预处理过程^[15]。在地面或近地面成像条件下,探测距离相对较短,从光与地物相互作用到探测器获取反射信息的全过程相对简单。遥感方式成像的探测距离远大于目标尺度,对地物的探测近似垂直探测,在地面成像条件下应用时,则

需要考虑光源、成像光谱仪与目标地物的相对位置关系。对于地物光谱反射率方向特性的研究,指的是地物目标反射率与探测天顶角、入射光天顶角,以及两者相对方位角之间的关系。自然界中大部分地物都非朗伯体,因此光与地物目标产生的反射大都属于各向异性反射,BRDF 模型常用于描述地表各向异性反射的基本特征。具体指的是入射光线经过某个表面反射后如何在各个出射方向上的分布。通过建立适合的 BRDF 模型,能够研究地物的方向特性。模型示意图如图 1 所示。

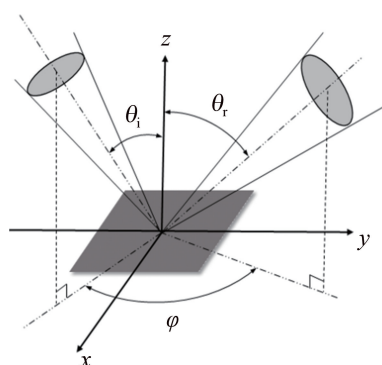


图 1 BRDF 模型图

Fig. 1 BRDF model diagram

2 BRDF 模型与参数拟合方法

2.1 RossThick-LiSparseR 模型

BRDF 的物理意义是:来自方向地表辐照度的微增量与其所引起的方向上反射辐射亮度增量之间的比值^[16],其数学表达式为:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (1)$$

式中, θ_i 与 φ_i 表示入射太阳光的天顶角、方位角; θ_r, φ_r 表示反射光线的天顶角、方位角; $dE_i(\cdot)$ 表示光源在入射点附近面元上的入射辐照度, $dL_r(\cdot)$ 为相应的反射方向上的辐亮度。

直接测量地物的 BRDF 比较困难,因此,通常用 BRF 来代替难以测量的 BRDF 值,BRF 指的是地物方向反射辐射亮度值同条件下理想漫反射体的辐射亮度值的比值,称为双向反射率因子 R:

$$R = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi, \lambda)}{dL_p(\theta_r, \varphi, \lambda)} \quad (2)$$

式中, λ 表示入射光的波长; $dL_r(\cdot)$ 为地物目标在 θ_r, φ_r 方向上的反射辐射亮度值, $dL_p(\cdot)$ 表示同条件下理想的漫反射体在该方向上的反射辐射亮度值, $\varphi = |\varphi_i - \varphi_r|$ 表示光源与探测器的相对方位角。

半经验核驱动模型运用了经验系数的线性组合,拥有简单的表达式和更高的使用范围,不仅仅可以在拍摄数据范围内获得较高的精度,并且外推可以求得任意入射光线和观测角的二向反射,模型结构简单、反演速度快^[17]。RossThick-LiSparseR 模型是一种典型的半经验核驱动模型,描述的 BRDF 比较准确,反演反射率的结果精度比较高。RossThick-LiSparseR 的表达式为:

$$\mathbf{R} = f_{\text{iso}}(\lambda) + f_{\text{vol}}(\lambda) \times \mathbf{K}_{\text{vol}} + f_{\text{geo}}(\lambda) \times \mathbf{K}_{\text{geo}} \quad (3)$$

该模型将二向性反射分解为了 3 个部分的线性组合,其中 \mathbf{R} 代表二向反射率, \mathbf{K}_{vol} 和 \mathbf{K}_{geo} 分别为体散射核和几何光学核,其体散射核是 RossThick 核,几何光学核是 LiSparseR 核,具体表示见参考文献[10]。3 个常系数 $f_{\text{iso}}(\lambda)$, $f_{\text{vol}}(\lambda)$ 和 $f_{\text{geo}}(\lambda)$ 只与波长有关,分别表示均匀散射、体散射和几何光学散射所占比例^[18-19]。

体散射核和几何光学核的值只与成像时的方向条件有关,实验过程中可以通过测量成像光谱仪的探测角、太阳与探测器的相对方位角以及太阳高度角等进行计算得到。在计算二向反射率的时候,由于两个核的积分与波长无关,可以先利用角度信息计算出两个核的值,通过反射率以及两个核的值代入线性拟合中求出 3 个常系数的值,进而可以外推求得任意方向条件下地物的二向反射率。

2.2 广义逆矩阵拟合方法

对于可逆方阵 $\mathbf{A}_{n \times n}$ 而言,其逆矩阵可以通过公式法或初等变换的方法求得;而对于一般矩阵 $\mathbf{A}_{m \times n}$ 来说,求其逆矩阵需要利用广义逆矩阵方法。设 $\mathbf{A} \in \mathbf{C}^{m \times n}$ ($\mathbf{C}^{m \times n}$ 为 $m \times n$ 维度的复矩阵),若存在 $\mathbf{X} \in \mathbf{C}^{n \times m}$ ($\mathbf{C}^{n \times m}$ 为 $n \times m$ 维度的复矩阵)满足以下条件: $\mathbf{AXA} = \mathbf{A}$ 、 $\mathbf{XAX} = \mathbf{X}$ 、 $(\mathbf{XA})^H = \mathbf{XA}$ 、 $(\mathbf{AX})^H = \mathbf{AX}$ (其中上标 H 代表求矩阵的共轭矩阵),则称矩阵 \mathbf{X} 是 \mathbf{A} 的 M-P 广义逆矩阵,也称为伪逆矩阵,将 \mathbf{X} 记为 \mathbf{A}^+ ,以便与常见的逆矩阵加以区分。

在进行参数拟合时,为了得到更加准确可靠的地物 BRDF 模型参数,需要的先验数据组数远大于参数个数,很容易导致形成的线性方程组为矛盾方程组,而矛盾方程组 $\mathbf{A}_{m \times n} \mathbf{X}_{n \times k} = \mathbf{b}_{m \times k}$ 的极小最小二乘解存在且唯一,解即为 $\mathbf{X}_{n \times k} = \mathbf{A}_{n \times m}^+ \mathbf{b}_{m \times k}$ 。其中 $(\mathbf{AA}^+ \mathbf{b})_{m \times k}$ 的值即为总体接近矩阵 $\mathbf{b}_{m \times k}$ 的最优值,而 $\mathbf{A}_{n \times m}^+$ 的值可以通过计算直接得到。

相比于传统的最小二乘法线性拟合等方法,广义逆矩阵拟合方法具有快速简单、针对性强的特点。多

维光谱数据的处理,实质上是对多维矩阵的运算处理,由于获取的光谱数据具有信息量大、相关性高等特点,因此,广义逆矩阵拟合方法在光谱矩阵数据处理中具有广泛的应用之处。

3 实验验证与分析

3.1 实验数据的获取

实验选择在河北省石家庄市某地进行,其经纬度为北纬 38°27',东经 114°30',海拔为 78 m。分别在 4 个不同的时间进行了 4 组地物目标光谱反射率测量实验。具体条件、太阳高度角、探测天顶角、相对方位角等数据如表 1 所示,在不同条件下共得到 4 组数据。

表 1 实验测量条件

Table 1 Experimental measurement conditions

group count	time	illuminate zenith angle/(°)	view zenith angle/(°)	relative azimuth angle/(°)
1	t_1	38.5	20	59
2	t_2	24.3	90	59
3	t_3	24.6	94	59
4	t_4	27.0	120	59

根据上述测量条件,代入到模型公式中,可以得到 \mathbf{K}_{vol} 和 \mathbf{K}_{geo} 相应的常数值,如表 2 所示。

表 2 不同条件下 \mathbf{K}_{vol} 和 \mathbf{K}_{geo} 的值

Table 2 Values of \mathbf{K}_{vol} and \mathbf{K}_{geo} under different conditions

group count	\mathbf{K}_{vol}	\mathbf{K}_{geo}
1	-1.0722	-0.0341
2	-1.6957	-1.2451
3	-1.7198	-1.2875
4	-1.8558	-1.5532

数据获取所使用的是野外地面成像光谱仪,成像波段集中在可见光波段,具体为 449 nm~801 nm,为了得到更为精确的目标光谱曲线,设置的光谱分辨率为 4 nm,因此,可以得到 89 个波谱图像,每一幅图像都记录了视场内地物在不同波长下的辐射亮度值。实验中,可以将标准白板放到目标地物附近,由于探测距离远大于白板与地物之间的距离,因此,可以近似认为两者的各角度条件一致。图 2 为实验原理示意图,图 3 为拍摄场景灰度图。选取的 2 种典型地物目标为草地、迷彩雨衣。

测得草地的反射率数据用 $\mathbf{R}_{11}, \mathbf{R}_{12}, \mathbf{R}_{13}, \mathbf{R}_{14}$ 表示,迷彩雨衣的反射率数据用 $\mathbf{R}_{21}, \mathbf{R}_{22}, \mathbf{R}_{23}, \mathbf{R}_{24}$ 表示。测量数据如表 3、表 4 所示。

利用每种地物的前 3 组数据作为拟合 BRDF 参数所需的原始数据,利用最后一组反射率数据与拟合参

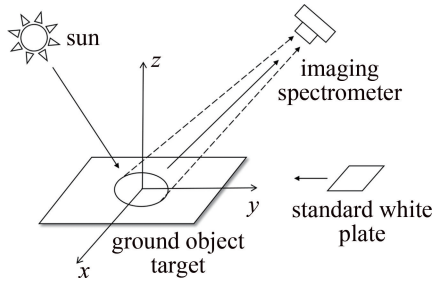


图2 实验原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental principle

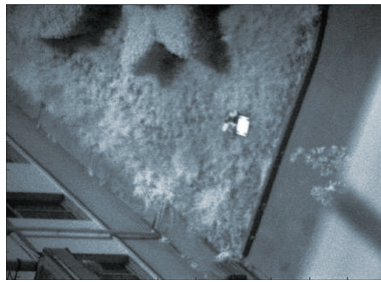


图3 拍摄场景灰度图

Fig. 3 Take grayscale image of the scene

表3 草地的光谱反射率数据

Table 3 Spectral reflectance data of grassland

band	R_{11}	R_{12}	R_{13}	R_{14}
1	0.062	0.008	0.017	0.011
2	0.056	0.002	0.035	0.002
3	0.040	0.001	0.020	0.014
...
...
87	0.519	0.415	0.292	0.283
88	0.508	0.408	0.278	0.285
89	0.512	0.406	0.299	0.280

表4 迷彩雨衣的光谱反射率数据

Table 4 Spectral reflectance data of camouflage raincoat

band	R_{21}	R_{22}	R_{23}	R_{24}
1	0.103	0.094	0.076	0.067
2	0.100	0.092	0.095	0.078
3	0.108	0.083	0.081	0.072
...
...
87	0.693	0.643	0.645	0.642
88	0.685	0.666	0.633	0.661
89	0.697	0.643	0.632	0.660

数后计算得到的数据作对比。

3.2 广义逆矩阵参数拟合

将上述 RossThick-LiSparseR 模型公式(3)式写成矩阵形式,即为:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & K_{vol} & K_{geo} \end{pmatrix} \times \begin{bmatrix} f_{iso}(\lambda) \\ f_{vol}(\lambda) \\ f_{geo}(\lambda) \end{bmatrix} \quad (4)$$

如果是利用3组数据拟合,根据前3组数据获取的实验条件用下标区分为 $K_{vol,1}$ 与 $K_{geo,1}$ 、 $K_{vol,2}$ 与 $K_{geo,2}$ 、 $K_{vol,3}$ 与 $K_{geo,3}$ 。以草地的反射率数据为例代入,即:

$$\begin{bmatrix} 1 & K_{vol,1} & K_{geo,1} \\ 1 & K_{vol,2} & K_{geo,2} \\ 1 & K_{vol,3} & K_{geo,3} \end{bmatrix}_{3 \times 3} \times \begin{bmatrix} f_{iso}(\lambda) \\ f_{vol}(\lambda) \\ f_{geo}(\lambda) \end{bmatrix}_{3 \times 89} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \end{pmatrix}_{3 \times 89}^T \quad (5)$$

那么只需要输入相应的核常数矩阵以及各波段反射率数值矩阵,便可以利用广义逆矩阵的方法快速拟合出 RossThick-LiSparseR 模型中草地对应的3个参数 $f_{iso}(\lambda)$ 、 $f_{vol}(\lambda)$ 和 $f_{geo}(\lambda)$ 的数值,即最佳解的表达式为:

$$\begin{bmatrix} f_{iso}(\lambda) \\ f_{vol}(\lambda) \\ f_{geo}(\lambda) \end{bmatrix}_{3 \times 89} = \begin{bmatrix} 1 & K_{vol,1} & K_{geo,1} \\ 1 & K_{vol,2} & K_{geo,2} \\ 1 & K_{vol,3} & K_{geo,3} \end{bmatrix}_{3 \times 3}^+ \times \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \end{pmatrix}_{3 \times 89}^T \quad (6)$$

同理,也可以得到迷彩雨衣对应的3个参数的数值,拟合出草地的3组参数可以用 $f_{iso,1}(\lambda)$ 、 $f_{vol,1}(\lambda)$ 和 $f_{geo,1}(\lambda)$ 来表示,如图4所示。迷彩雨衣的模型参数值用 $f_{iso,2}(\lambda)$ 、 $f_{vol,2}(\lambda)$ 和 $f_{geo,2}(\lambda)$ 表示,如图5所示。

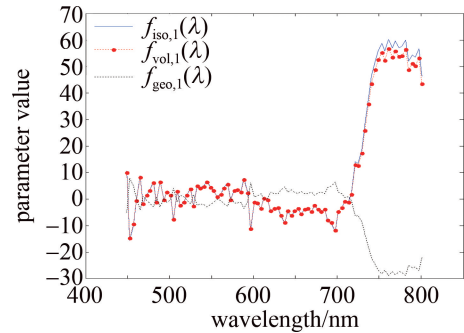


图4 草地的BRDF模型参数

Fig. 4 BRDF model parameters of grassland

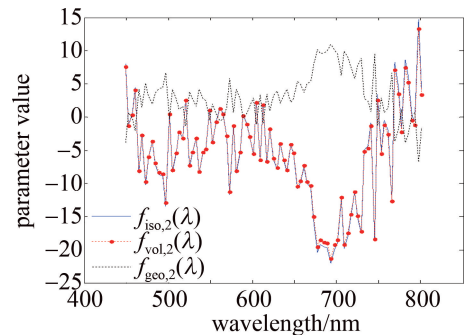


图5 迷彩雨衣的BRDF模型参数

Fig. 5 BRDF model parameters of camouflage raincoat

3.3 验证与评价

采用广义逆矩阵拟合方法对3组实验数据进行运

算分别得到了草地和迷彩雨衣的 RossThick-LiSparseR 模型的均匀散射、体散射和几何光学散射的参数值。第 4 组实验条件下 K_{vol} 与 K_{geo} 的值为 $K_{vol,4}$ 、 $K_{geo,4}$ ，以草地为例，利用以下公式可以拟合出在第 4 组实验条件下的光谱反射率 $R_{14}'(\lambda)$ ，即：

$$R_{14}'(\lambda) = f_{iso,1}(\lambda) + f_{vol,1}(\lambda) \times K_{vol,4} + f_{geo,1}(\lambda) \times K_{geo,4} \quad (7)$$

以草地为例拟合出的光谱反射率曲线数值与第 4 组实验测得的反射率数值，结果如图 6 所示。同理，也可以得到迷彩雨衣的拟合光谱反射率曲线与实测光谱反射率曲线，如图 7 所示。

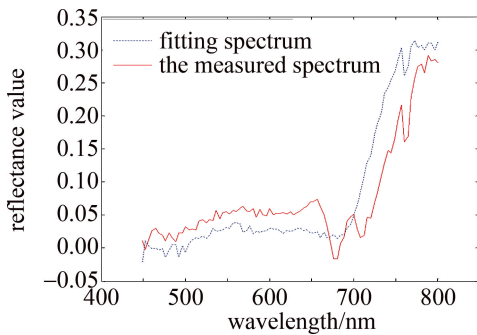


图 6 拟合与实测的草地光谱反射率曲线

Fig. 6 Fitting and measured spectral reflectance curves of grassland

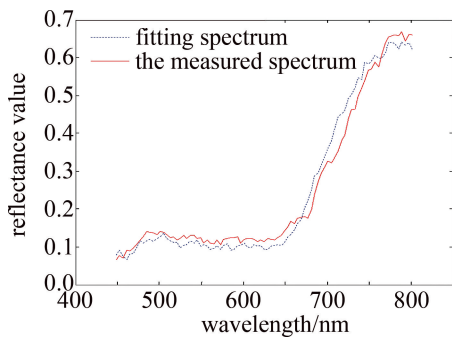


图 7 拟合与实测的迷彩雨衣光谱反射率曲线

Fig. 7 Fitting and measured spectral reflectance curves of camouflage raincoat

从图中可以看出，利用实验数据拟合出草地与迷彩雨衣的光谱反射率曲线与实测的反射率具有较高的相似性。光谱角制图法 (spectral angle mapping, SAM) 是通过计算两光谱曲线的矢量角度来衡量两者的光谱相似度，该方法取值结果一般为 0~1，取值越小，证明两曲线的相似度越高^[20]。利用 SAM 度量拟合与实测的目标光谱反射率的相似度，得到结果如表 5 所示。光谱反射率在不同条件下的反演能力与使用的 BRDF 模型和拟合方式都有关系。实验不仅说明了广义逆矩阵拟合方法的简单有效，也从侧面体现出了 Ross-Thick-LiSparseR 模型的反演适应能力较强。

表 5 拟合与实测目标光谱反射率曲线的相似度

Table 5 Similarity between fitting and measured target spectral reflectance curve

	grassland	camouflage raincoat
SAM	0.1307	0.0896

4 结 论

研究典型地物目标的光谱特性是准确识别地物的前提，通过建立 BRDF 模型，可以得到能够同时描述地物光谱特性与方向特性的参数，进一步可以利用得到的这些模型系数来反演不同方向条件下的光谱反射率。因此，在大量先验数据中快速准确地拟合出典型目标的 BRDF 模型参数显得尤为重要。通过实验获取的光谱维反射率信息一般利用矩阵表示，而广义逆矩阵拟合方法原理简单且更适用于多维数据处理。广义逆矩阵拟合方法不受数据维度与矩阵类型的限制，原理简单、处理高效，将广义逆矩阵方法引入到多维光谱数据处理与拟合中，能够方便快速地得到模型参数。

参 考 文 献

- [1] DING A X, JIAO Z T, DONG Y D, *et al.* BRDF model integration and case analysis based on linear kernel driven model[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(3):545-554 (in Chinese).
丁安心,焦子锦,董亚冬,等.基于线性核驱动模型的 BRDF 模型集成与案例分析[J].遥感技术与应用,2018,33(3):545-554.
- [2] WANG J, XIAO A P, JIAO Z D. Design and analysis of vegetation multi angle spectral information acquisition system[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 53(9):2165-2170(in Chinese).
王捷,肖爱平,焦子锦.植被多角度光谱信息采集系统的设计与分析[J].湖北农业科学,2014,53(9):2165-2170.
- [3] SANDMEIER S R. Acquisition of bidirectional reflectance factor data with field goniometers[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 73(1):257-259.
- [4] SANDMEIER S R, SANDMEIER W, ITTEN K I, *et al.* A field goniometer system (FIGOS) for acquisition of hyperspectral BRDF data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(2):978-986.
- [5] CHENG Ch, YANG Sh Zh, CUI Sh Ch, *et al.* Nuclear drive Ross-Thick-LiSparseR BRDF model with RossThick-LiTransitN analysis [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2016, 11(3):211-216(in Chinese).
程晨,杨世植,崔生成,等.核驱动 BRDF 模型 RossThick-LiSparseR 与 RossThick-LiTransitN 的分析[J].大气与环境光学学报,2016,11(3):211-216.
- [6] XIE F F, SUN L, LIN Z J, *et al.* Based on the Ross Thick-LiSparseR and RossThick-LiTransit nuclear drive BRDF calculation and evaluation [J]. Remote Sensing Information, 2011, 26(4):3-6(in Chinese).
解斐斐,孙林,林宗坚,等.基于 Ross Thick-LiSparseR 及 Ross Thick-LiTransit 的核驱动 BRDF 计算与评价[J].遥感信息,2011,

- 26(4):3-6.
- [7] ZHAO Y, XIE D H, DENG L, *et al.* Method and system realization of BRDF calculation using multi-angle image [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(4):741-749(in Chinese).
赵云,谢东海,邓磊,等.利用多角度影像计算 BRDF 的方法与系统实现[J].*遥感技术与应用*,2018,33(4):741-749.
- [8] ZHANG H, JIAO Z T, DONG Y D, *et al.* Albedo rethleved from BRDF archetype and surface directional reflectance [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(3):355-367(in Chinese).
张虎,焦子铤,董亚冬,等.利用 BRDF 原型和单方向反射率数据估算地表反照率[J].*遥感学报*,2015,19(3):355-367.
- [9] HE W, YANG H. Winter wheat leaf area index retrieval with Multi-angle and multispectral Terra/Aqua MODIS data [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(4):204-212(in Chinese).
何维,杨华.联合 Terra/Aqua MODIS 多角度多光谱数据反演冬小麦叶面积指数[J].*农业工程学报*,2013,29(4):204-212.
- [10] MA Q M, LI J, LIU Q, *et al.* Calculation of clumping index of mixed pixel and scale analysis [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(5):895-908(in Chinese).
麻庆苗,李静,刘强,等.混合像元聚集指数研究及尺度分析[J].*遥感学报*,2012,16(5):895-908.
- [11] XIA Y Ch, YI N. Using generalized inverse matrix to find the fitting equation of general curve [J]. *Journal of Hunan University (Natural Science Editaion)*, 1999, 26(s1):36-40(in Chinese).
夏云超,易娜.用广义逆矩阵求一般曲线的拟合方程式[J].*湖南大学学报(自然科学版)*,1999,26(s1):36-40.
- [12] WANG P, CHEN J B. Least squares Hermite solution of complex matrix equation $AXB=C$ [J]. *Pure Mathematics*, 2016, 6(1):42-49(in Chinese).
王鹏,陈剑波.复矩阵方程 $AXB=C$ 的最小二乘 Hermite 解[J].*理论数学*, 2016, 6(1): 42-49.
- [13] JIAO Z T, WANG J D, XIE D O, *et al.* Initial validation of MCDIS albedo product by using field measurements and airborne multiangular remote sensing observations [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(1):64-72(in Chinese).
焦子铤,王锦地,谢旦欧,等.地面和机载多角度观测数据的反照率反演及对 MODIS 反照率产品的初步验证[J].*遥感学报*, 2005, 9(1):64-72.
- [14] WANG Q H, HUA W Sh, HUANG F Y, *et al.* Based on the spectral angle background purification of hyperspectral anomaly detection algorithm [J]. *Laser Technology*, 2020, 44(5): 623-627(in Chinese).
王强辉,华文深,黄富瑜,等.基于光谱角背景纯化的高光谱异常检测算法[J].*激光技术*, 2020, 44(5): 623-627.
- [15] YANG L H, XU J, JIANG Sh P. Vacuum cryogenic environment reflector spectrum reflectance in situ measurement techniques [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(4):559-565(in Chinese).
杨林华,许杰,蒋山平.真空低温环境反射镜光谱反射率原位测量技术[J].*应用光学*,2015,36(4):559-565.
- [16] ZHANG B Sh, LIU W Q, WEI Q N, *et al.* The BRDF of typical target model validation and measurement in laboratory [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, 23(4): 533-536(in Chinese).
张百顺,刘文清,魏庆农,等.典型目标的 BRDF 实验室测量与模型验证[J].*量子电子学报*,2006,23(4):533-536.
- [17] YAN G J, WU J, WANG J D, *et al.* Spectral prior knowledge in the application of remote sensing inversion of vegetation structure [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(1):1-6(in Chinese).
阎广建,吴均,王锦地,等.光谱先验知识在植被结构遥感反演中的应用[J].*遥感学报*,2002,6(1):1-6.
- [18] LIU S H, LIU Q, LIU Q H, *et al.* Band from different points of kernel function and its application in the BRDF research [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition)*, 2007, 43(3): 309-313(in Chinese).
刘思含,刘强,柳钦火,等.多角度多波段的核函数及其在 BRDF 研究中的应用[J].*北京师范大学学报(自然科学版)*,2007,43(3):309-313.
- [19] ZHOU B, LI B X, HE X, *et al.* Analysis of influence factors of typical ground objects and camouflage spectra under land-based conditions [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(9):2956-2961(in Chinese).
周冰,李秉璇,贺宣,等.陆基条件下典型地物和伪装光谱影响因子分析[J].*光谱学与光谱分析*,2021,41(9):2956-2961.
- [20] LIU N L, GUO Y X, JIANG H M, *et al.* Gastric cancer diagnosis using hyperspectral imaging with principal component analysis and spectral angle mapper [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2020, 25(6):1-9.