

文章编号: 1007-4619(2006)05-0812-08

基于多项式表达模型的多角度覆盖率反演研究

李 静^{1,2}, 刘 强¹, 柳钦火¹, 肖 青¹

(1. 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 冠层光谱的多项式表达模型是理解叶片/土壤系统内的光线散射过程, 描述植被的冠层光谱与组分光谱间非线性关系的一种新的方法。冠层光谱的多项式表达模型用高阶多项式的形式表达了系统内的各组分对入射光的散射过程, 多项式中每一项系数表达了各组分对入射光多次散射的可能性有多少, 这与冠层的结构, 包括作物的覆盖率、叶倾角、垄行结构等有关。因此, 多项式系数具有反演冠层结构参数的潜力。本次研究首先使用 SA ILH 模型得到玉米全生长期的 BRDF 波谱以及模型计算过程的中间变量冠层多角度覆盖率, 建立多项式系数与多角度覆盖率之间的经验关系。最后, 设计了一次野外 BRDF 观测试验, 对经验关系进行验证。

关键词: 多项式表达; 结构参数; 覆盖率; BRDF

中图分类号: TP702 文献标识码: A

Validation of Polynomial Expression Model and Inversion of Crop Cover Rate

LI Jing^{1,2}, LIU Qiang¹, LIU Qin-huo¹, XIAO Qing¹

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The polynomial expression model is a new model to interpret the light scattering process inside leaf/soil system and decipher the non-linear relationship between component spectra and canopy reflectance. It uses high order polynomial to interpret the scattering process inside canopy and each coefficient of the polynomial expression represents the possibility with which the incident light after multi-scattering of the components goes out of the canopy and enters the sensor. This value depends on the canopy structure including crop cover rate, leaf distribution etc. So the polynomial model has the capability to invert the canopy structural parameters. This study is designed to invert the crop cover rate using this model. Firstly the canopy reflectance model SA ILH is used to simulate BRDF spectra and the corresponding cover rates. Then the relationship between the polynomial coefficients from the polynomial expression model and cover rates is built. Finally, an experiment is designed to validate the model inversion.

Key words polynomial expression model; structural parameters; cover rate; BRDF

1 引 言

作物的覆盖率是描述作物生长的一个重要参

数, 由于覆盖率显著的时空分异的特点, 遥感逐渐成为估算覆盖率的一个主要方法。利用遥感资料估算植被覆盖率的方法大致可归纳为以下两种: 经验模型法和植被指数转换法。经验模型法主要是通过建

收稿日期: 2006-04-10; 修订日期: 2006-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 40401042, 40371087), 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (编号: KZCX3-SW-334, KZCX3-SW-338-2), 中国科学院百人计划项目 (编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目 (编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目 (编号: KJ950401)。

作者简介: 李 静 (1978—), 女, 2002年毕业于浙江大学地球科学系, 理学学士学位, 现为中国科学院遥感应用研究所在读博士生。

立实测植被覆盖率与植被指数的经验模型来求取大面积植被覆盖率。植被指数转换法的主要思想是对对各像元中植被类型及分布特征的分析,建立植被指数与植被覆盖率的转换关系来直接估算植被覆盖率^[1]。

近年来,随着多角度遥感技术的不断发展,角度特征与地物反射特性关系的研究越来越受到人们的重视,尤其是植被多角度遥感发展非常迅速。因此,具有角度特性的植被方向覆盖率研究将成为新的研究点^[2]。张仁华等利用 Opengl语言模拟了椭圆形、圆锥形和圆柱形 3种冠层形状的植被,分别呈自由分布、边缘分布、中心分布和南北行分布时,植被覆盖率随观测角度的变化关系^[3]。

本次研究首先使用 SAILH 模型得到玉米全生长期的 BRDF波谱及模型计算过程的中间变量冠层多角度覆盖率,建立多项式系数与多角度覆盖率之间的经验关系。最后,设计了一次野外 BRDF 观测试验,对经验关系进行验证。

2 冠层光谱的多项式表达模型

20世纪 70年代以来,许多研究者将经典的数学物理理论与遥感实践相结合,发展了许多描述地物目标的二向性反射和目标特征参数之间关系的模型。研究得较为全面深入的是物理模型,主要包括辐射传输模型 RT(Radiative Transfer Model),几何光学模型 GO(Geometric Optical Model)和计算机模拟模型(Computer Simulation Model);经验模型,如 Walthall 模型;半经验模型,如 Roujean 模型、Verstraete模型以及 Wanner的“核”驱动模型。这里所使用的多项式表达模型属于半经验模型,具有一定的物理意义及较简单的表达式。

多项式表达模型是利用高阶多项式来描述光线在冠层中的多次散射过程,分析冠层光谱数据,在线性混合像元分解和复杂的物理模型之外,提供了解释组分光谱和冠层光谱间关系的另一条途径。模型考虑了植被冠层中的主要光线散射体叶片和土壤两个组分,当入射观测的几何关系和冠层的结构关系确定时,冠层的反射波谱是这两个组分波谱,即叶片反射率、透过率和土壤反射率的函数。从数学角度看,任何连续函数都会有一个惟一的多项式表达形式,因此,冠层波谱可以表达为叶片组分波谱与土壤波谱的多项式形式。具体形式如下^[4,5]:

$$R = P_1 + P_2 + \dots + P_{N-1} + P_N + \delta(\rho - \tau) \quad (1)$$

其中:

$$P_1 = a_{1,0}x + a_{0,1}y$$

$$P_2 = a_{2,0}x^2 + a_{1,1}xy + a_{0,2}y^2$$

...

$$P_n = a_{n,0}x^n + \dots + a_{i,j}x^i y^j + \dots + a_{0,n}y^n$$

$$P'_N = P_N / (1 - S)$$

$$S = s_x x + s_y y$$

式中, R代表冠层反射率, x代表叶片总散射率 $\rho + \tau$, y代表土壤反射率 τ , n表示多项式表达中的第 n阶项。多项式模型中的多项式系数包括 $a_{i,j}, s_x, s_y, \delta$ 。

多项式表达模型的物理意义表现在多项式系数上。通过光线跟踪法分析光线在叶片/土壤系统内的散射过程,可以发现,多项式表达中 $x_i y_j$ 项的系数 $a_{i,j}$ 表示的是光线经过 i次叶片散射和 j次土壤散射后进入传感器的概率,即 $a_{1,0}$ 表示光线经过一次叶片散射后进入传感器的概率, $a_{0,1}$ 表示光线经过一次土壤散射后进入传感器的概率, a_{11} 表示光线经过一次叶片散射和一次土壤散射后进入传感器的概率。在多项式表达模型中,假设光线经过 N次散射后是各向同性的,这时, $n+1$ 次与 n次散射的概率比恒定,即 $P_{n+1}/P_n = S(n \geq N)$,则 N次及大于 N次散射后的多次散射项 P'_N 可定义如下: $P'_N = P_N / (1 - S)$ 。S表达了 $n+1$ 次散射光与 n次散射光相比的被消减的程度,被定义为 $S = s_x x + s_y y$, s_x 和 s_y 分别代表了各向同性光在冠层中被叶片和土壤截取的概率。 δ 是叶片的反射率与透射率差异的一阶项的补偿系数。由于差异较小,省略了散射率与透射率差异的高阶项。系数的物理意义的具体分析过程参见颜春燕、刘强等冠层光谱的多项式分析及生化参量反演的文章^[6]。

使用多项式表达模型进行反演时,是在已知冠层波谱、叶片组分波谱及土壤波谱条件下,反演得到多项式系数,通过建立多项式系数与待反演参数间的关系,反演得到目标参数。

3 多角度覆盖率反演方法

根据冠层光谱多项式表达式系数的物理意义, $a_{1,0}$ 表示光线经过一次叶片散射后到达传感器的概率, $a_{0,1}$ 表示光线经过土壤的一次散射后到达传感器的概率。 $a_{1,0}$ 和 $a_{0,1}$ 表达的叶片和土壤是光照叶片和光照土壤。 $a_{1,0}$ 越大,表示视场内光照叶片越多,同样, $a_{0,1}$

越大,表示视场内的光照土壤越多。 $a_{10}/(a_{10}+a_{01})$ 表达了视场内光照叶片与光照土壤的比例关系。但是,计算覆盖率的绿色植被面积包括光照叶片和阴影叶片两部分,因此,只有当光线照射和观测在同一方向时, $a_{10}/(a_{10}+a_{01})$ 计算得到的才是覆盖率。在其他条件下, $a_{10}/(a_{10}+a_{01})$ 的值能够在一定程度上反映覆盖率的大小,但却不是准确的覆盖率。根据多项式系数 s_1 和 s_2 的物理意义, s_1 和 s_2 分别代表发生多次散射时,各向同性光在冠层中被叶片和土壤截取的概率。 s_1 越大,表示光线被叶片截取的越多; s_2 越大,表示光线被土壤截取的越多。 $s_1/(s_1+s_2)$ 表达了冠层内叶片与土壤的比例关系,在一定程度上表达了覆盖率。但是, s_1 与 s_2 不仅和叶片与土壤在视场内的面积多少有关,还和冠层的几何结构密切相关,因此,它不能完全表达覆盖率。而且它们作为多项式表达模型中的高阶项,为不敏感参数,在反演中受噪声影响比较大。

以上试图通过多项式表达模型的系数的物理意义,计算得到覆盖率。但还无法准确地计算出覆盖率。经验法是一种常用而有效的方法。下面使用经验法,建立多项式系数与多角度覆盖率之间的经验关系,反演得到作物的多角度覆盖率。首先使用 SA ILH 模型模拟得到建立经验关系所需要的、不同冠层波谱的多项式系数及对应的多角度覆盖率的配套数据,建立经验关系,得到经验系数。并使用模拟波谱对经验系数进行验证。同时,比较计算式 $a_{10}/(a_{10}+a_{01})$ 和 $s_1/(s_1+s_2)$ 的计算值与用经验系数得到的覆盖率。

3.1 波谱模拟

波谱模拟时所使用的冠层散射率模型是 SA ILH 模型。SA ILH 模型是 Kuusk 在 Verhoef (1984) 的 SA IL 模型的基础上,考虑了热点效应和冠层中的多次散射现象发展而来的^[7,8]。与其他一些冠层散射率模型相比,SA ILH 模型需要的输入参数更少,模拟能力相同^[9]。SA ILH 模型假设冠层是由具有朗伯特特性的叶片组成的均匀的半无限的媒介层。叶片的特性用叶片的散射率和透过率来表达。冠层的结构特征用叶面积指数 (LAD) 和平均叶倾角 (ALA) 来表达。叶片方位角呈随机分布,叶倾角呈椭球体分布。热点效应的参数描述用叶片大小与冠层高度的比值来表达的^[10]。模型的主要输入参数包括叶片的散射率、透射率、叶面积指数 (LAI)、平均叶倾角 (LAD)、土壤散射率以及太阳观测的几何关系描

述参数。

以玉米为例,使用从“中国典型地物标准波谱数据库”中得到的,在北京小汤山测量的组分波谱及土壤波谱。为了使样本数据能够覆盖各种几何结构特征下的波谱,本文模拟了 16 个生长状态的 BRDF 波谱。其中,叶面积指数从 0.3 到 2.7,平均叶倾角是从 40° 到 70°,太阳天顶角是从 40° 到 50°。每个生长状态模拟了主平面和垂直主平面,每个平面模拟了天顶角从 -50° 到 50° 以 10° 为间隔的 BRDF 数据。在模拟 BRDF 波谱的同时,计算得到了与之相对应的多角度覆盖率。

3.2 反演方法

使用多项式表达模型,计算这 16 组共 352 条 BRDF 模拟波谱的多项式系数。计算中,多项式的最高阶设为 4,则每条波谱对应 17 个系数,即分别描述入射光经过一次散射、二次散射、三次散射及四次散射后进入传感器的概率 $a_{01}, a_{10}, a_{20}, a_{11}, a_{02}, a_{30}, a_{21}, a_{12}, a_{03}, a_{40}, a_{31}, a_{22}, a_{13}$ 和 a_{04} , 补偿系数 δ 以及描述叶片和土壤对多次散射光的截取概率的 s_1 和 s_2 。由于光线经过多次散射后,进入到传感器的比例已经很少,因此,在使用多项式系数表达冠层结构特征时,只选用了一次散射和二次散射系数 $a_{01}, a_{10}, a_{20}, a_{11}, a_{02}, \delta$ 和 s_1, s_2 共 8 个参数。

使用这 352 组数据,建立多项式系数与多角度覆盖率之间的经验关系,如公式 (2) 所示:

$$\text{Polycoef} \times \text{Coef} = \text{Cover} \quad (2)$$

式中, Polycoef 是 352×8 的矩阵,对应 352 条 BRDF 波谱的 8 个多项式系数; Cover 是 352×1 的列向量,对应每一条波谱的覆盖率; Coef 即是多项式系数与多角度覆盖率间的经验系数。

为了提高反演精度,在 Polycoef 项中增加了系数,加入了更多的信息量。一种方式是在原 8 个多项式系数后,增加 $a_{10}/(a_{10}+a_{01})$ 和 $s_1/(s_1+s_2)$ 两项,构建得到 352×10 大小的 Polycoef₁, 回归得到经验系数 Coef₁。由以上的分析可知,这两个比值从两个不同的角度,反映了冠层中叶片和土壤的比值关系。另一种方式是在原 8 个多项式系数后,增加了它们的平方项,构建得到 352×16 大小的 Polycoef₂, 回归得到经验系数 Coef₂。计算三种方式下回归的 RMSE, 如表 1 所示。可见,用原系数加原系数的平方项的 Polycoef₂ 回归 Coef₂ 的 RMSE 最小,精度最高。以下反演覆盖率时,都将使用此系数。

表 1 三个 Polycoef 回归经验系数的 RM SE

Table 1 Comparison of RM SE computed with Polycoef built by three different methods

	Polycoef	Polycoef_1	Polycoef_2
RMSE	0.0076	0.0067	0.0056

计算式与经验关系法估算的覆盖率。使用的波谱数据为独立模拟的验证数据。三者反演的 RMSE 分别为 0.0653, 0.0838 和 0.0056。可见, $a_{10} / (a_{10} + a_{01})$ 和 $s_1 / (s_1 + s_2)$ 与覆盖率有很好的线性相关, 但经验法残差最小, 相对最优。图 2 画出了分别在主平面和垂直主平面上, 使用经验系数反演的覆盖率与真实覆盖率。反演的覆盖率很好地反映了随着观测角增加覆盖率增大的规律。

图 1 比较了使用 $a_{10} / (a_{10} + a_{01})$ 和 $s_1 / (s_1 + s_2)$

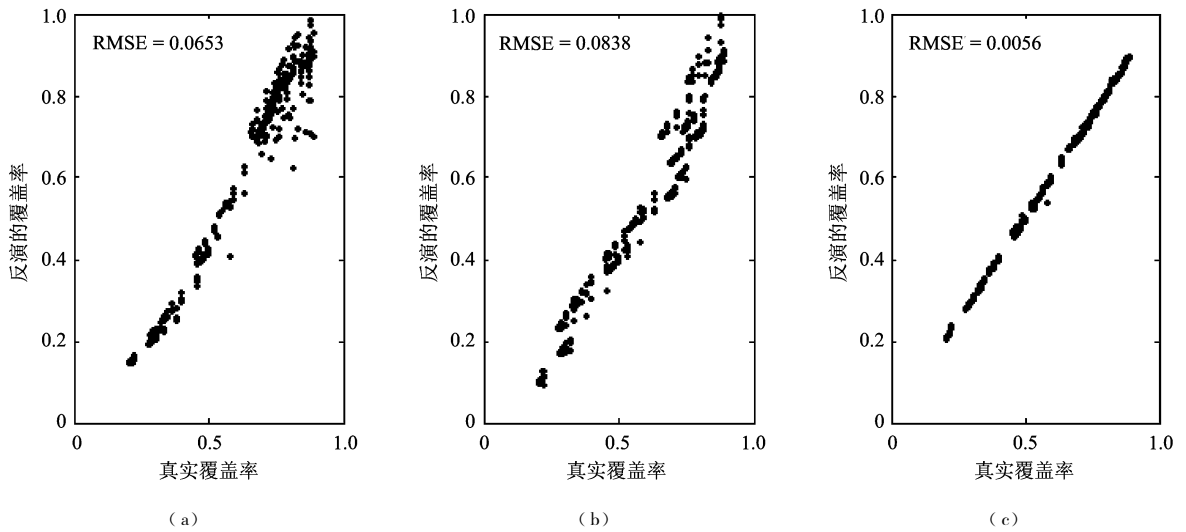


图 1 分别使用 $a_{10} / (a_{10} + a_{01})$ 和 $s_1 / (s_1 + s_2)$ 计算式与经验关系法估算的覆盖率 (a) $a_{10} / (a_{10} + a_{01})$; (b) $s_1 / (s_1 + s_2)$; (c) 经验关系法

Fig 1 Comparison of cover rates estimated respectively by $a_{10} / (a_{10} + a_{01})$ equation $s_1 / (s_1 + s_2)$ equation and experiential relationship method

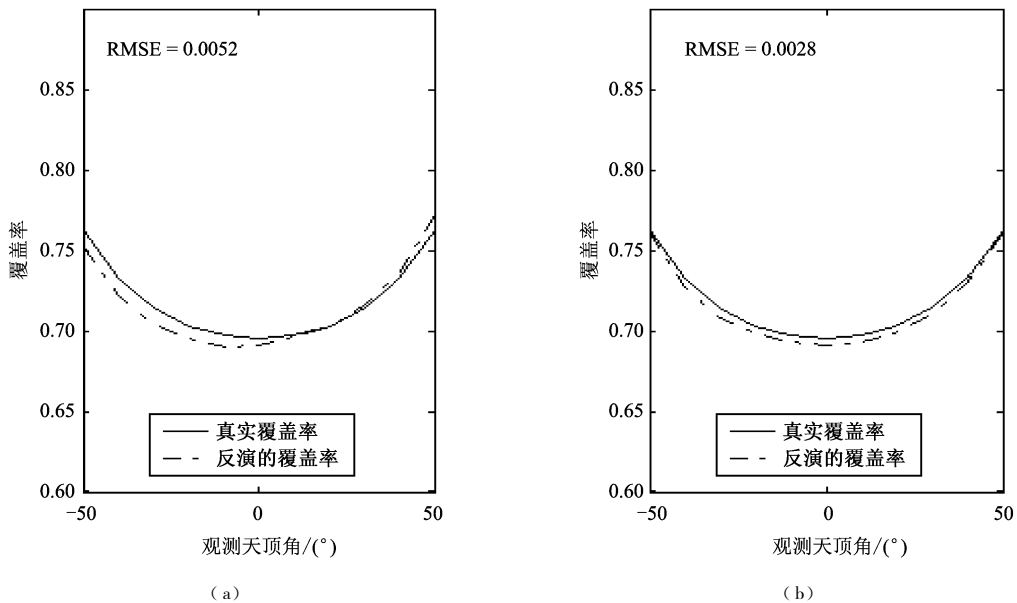


图 2 主平面与垂直主平面上经验系数反演的覆盖率与真实覆盖率 (a) 主平面; (b) 垂直主平面

Fig 2 Cover rates estimated respectively in the principle plane and the vertical principle plane. (a) Sun principle plane; (b) Cross sun principle plane

4 实验观测

实验的主要目的是获取 BRDF 波谱及对应的覆盖率。为了能够获得与 BRDF 波谱测量同步观测到的覆盖率数据,将具有拍照功能的摄像头和 ASD 光谱仪的探头固定在一起,编写程序,使光谱仪每获得一条波谱的同时,摄像头同步获取一张同视场的数字像片,从数字像片上计算得到同步覆盖率。但由于摄像头视场范围要大于光谱仪视场,如果直接使用摄像头拍出的数字像片计算覆盖率,则得到的覆盖率值无法准确地描述光谱仪视场内的作物覆盖情况,为此,设计了光谱仪视场在数字相片上的定标实验。下面将详细介绍室内的光谱仪视场定标实验及玉米的 BRDF 野外观测实验。

4.1 光谱仪视场在数字像片上的定位实验

4.1.1 实验设计

在野外观测时,将 ASD 光谱仪的探头与摄像头固定在一起,如图 3 所示。实验时,每获取一条光谱的同时,摄像头同时获取一张同视场的数字像片。但是,在距离观测目标 90 cm 高时,摄像头的视场为

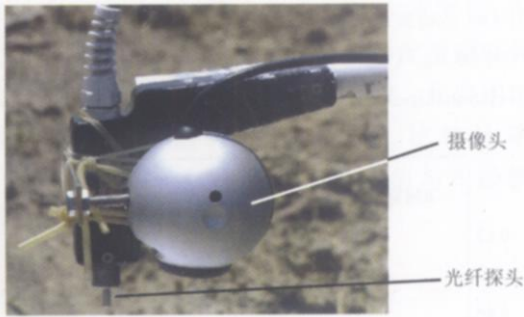


图 3 固定在一起的光谱仪探头和摄像头

Fig 3 Camera and optical fiber head of ASD tied together

$$\frac{L}{A} = \begin{cases} \beta \cdot \cos\left[\frac{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}}{r} \cdot \frac{\pi}{2}\right] + \gamma & \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \leq r \\ \gamma & \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} > r \end{cases} \quad (3)$$

式中, (x_0, y_0) 为光谱仪视场中心点坐标, (x, y) 为点光源中心点坐标, r 为视场半径, s 为描述光谱仪空间响应的属性值, β 和 γ 为分别表示增益和偏移的两个校正系数。光谱仪对点光源的响应强度,用单位光源面积上的散射能量 L/A 来表达。其中,光源面积 A 是在数字像片中光源区域的面积;反射能量 L 是对光谱仪测量得到的光谱文件中 500—800 nm 波长范围内的辐射亮度值积分得到的。

72 cm × 54 cm。光谱仪的视场角是 25°, 在 90 cm 高时,视场直径约为 37 cm。摄像头的视场要大于光谱仪的视场。为了能得到准确的覆盖率,设计了如下的光谱仪视场在摄像头视场中的定位实验。

假设有一足够大的面状暗目标,中心有一足够亮的点光源。当点光源刚好在光谱仪视场中心时,光谱的响应能量最强;当点光源逐渐远离视场中心时,光谱响应会逐渐减弱。实验中,以长 1 m 宽 0.8 m 表面涂有黑漆的粗糙木板作为面状暗目标。木板中心挖有小洞,放置一个小的磨砂玻璃白炽灯,作为点光源。木板旁有一支架,架有一伸出的长臂,高度为距木板上方 90 cm,臂上固定有光谱仪探头及摄像头。测量时在一个黑暗房间,以确保光谱仪对点光源的敏感响应。样点采集时,首先在黑板上方均匀采集,当视场位置大概可以确定后,再在视场区域内加密采集。

4.1.2 数据处理

通过以上实验,获取到一组光谱仪和摄像头分别对暗背景下不同位置处的点光源响应的数据。根据这组数据,建立了点光源在数字像片中的位置与光谱响应强度间的函数关系,进而求解出光谱仪视场中心在数字像片中的位置、光谱仪视场半径及视场的空间响应函数。

如图 4 所示,首先以摄像头视场即数字像片建立坐标系。由于摄像头与光谱仪探头的相对位置是固定的,因此光谱仪视场的中心点在摄像头视场中的位置也是固定的,设这个中心点的坐标为 (x_0, y_0) 。假设光谱仪的实际视场半径是未知的,设为 r 。根据光源在光谱仪视场中心时,光谱响应的能量最强,随着光源远离视场中心,光谱响应逐渐减弱的规律,用公式(3),建立了点光源在数字相片中的位置与光谱仪响应强度间的函数关系:

模拟函数中, β, γ, s, x_0 和 y_0 与光谱仪视场、视场响应特性和光谱仪与摄像头的固定关系有关,因此,对每一组数据来说,它们是不变的。而 x, y, L 和 A 是随着点光源在光谱仪视场中的位置的变化而变化的,因此,对每一条波谱来说,它们都是不一样的。因此,需要首先从波谱文件中计算出 L 从数字像片中计算出 x, y 和 A 。假设共测量 m 组数据,那么就是解有 6 个未知数、 m 个方程的超定方程组。

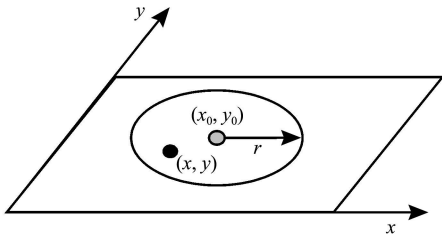


图 4 光谱仪视场、光源在摄像头视场坐标系中的位置关系
 Fig 4 Position relationship of ASD Field of View (FOV) and light source in the coordinate of camera FOV

由于函数形式是非线性的,故采用 MATLAB 提供的 `fm inunc` 函数,使用牛顿迭代的方法,得到最接近实际测量值时的 6 个未知数的解。计算得到的这 6 个参数 r, β, γ, s, x_0 和 y_0 的解分别为 111, 0.662, 0.297, 0.122, 349 和 259。

4.1.3 结果与分析

图 5(a)是根据计算得到的 r, β, γ, s, x_0 和 y_0 6 个未知数画出的在数字像片中光谱仪视场的空间响应图。图 5(b)显示了数字像片上光谱仪响应的视场范围。

计算结果中,在 640×480 大小的数字像片上,光谱仪的视场直径约 220 个像素,大约 25cm,这要

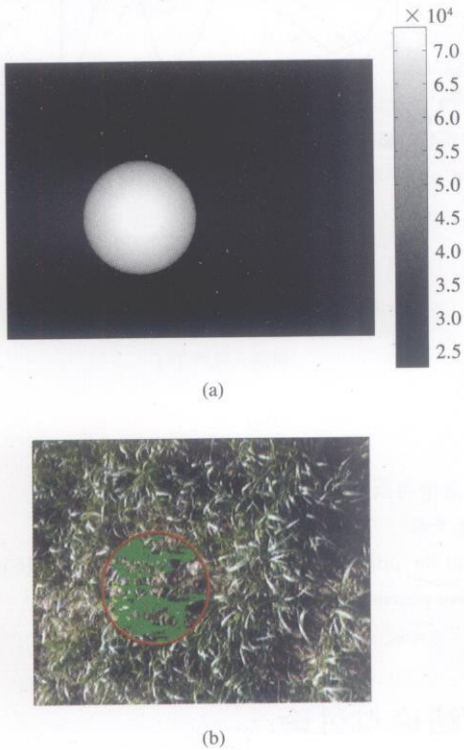


图 5 光谱仪在数字像片上的视场
 Fig 5 ASD FOV in the image taken from camera

比按照 25° 视场角计算 90cm 测量高度时的计算结果 37cm 小。这与实际的光谱仪视场情况是相符的,光谱仪 25° 视场角,但是视场范围内并不是所有面积上的均匀响应,视场中心区域,信号响应比较强,越往边缘,响应越弱,到视场边缘的时候,响应不再敏感,函数模拟时,就不再考虑这些区域,而只圈出了有一定敏感响应度的区域。因此,画出来的区域会小于 ASD 的 25° 视场角的范围。

4.2 BRDF 野外观测实验

2005 年 7 月 1 日,在北京师范大学的实验园区开展了玉米的 BRDF 多角度观测实验。光谱测量使用美国 ASD 公司的 FieldSpec 光谱仪。观测时使用多角度观测架,将光谱仪探头和摄像头固定在距冠层高度 1.4m 处观测。由于观测时主平面和顺垄平面基本重合,故只测量了主平面和垂直主平面。每个平面从 -50° 到 50° 以 10° 为间隔各测量了 11 个角度。同时测量了玉米叶片的组分波谱和土壤波谱。叶片的组分波谱是与 BRDF 测量同步、在室内使用积分球和 ASD 光谱仪测量得到的。实验进行时玉米株高大概 82cm。

在求每条波谱所对应的覆盖率时,使用光谱仪视场在数字像片上的位置参数,计算数字像片中光谱仪视场内的覆盖率。图 6 比较了光谱仪视场内计算的覆盖率与数字像片全视场计算的覆盖率。对于垄行结构的作物,光谱仪视场相对较小,受垄行结构的影响会较大,光谱仪探头对着垄上或者垄间,覆盖率会相差较多。数字像片的视场相对较大,可覆盖 2—3 垄,受垄行影响较小。因

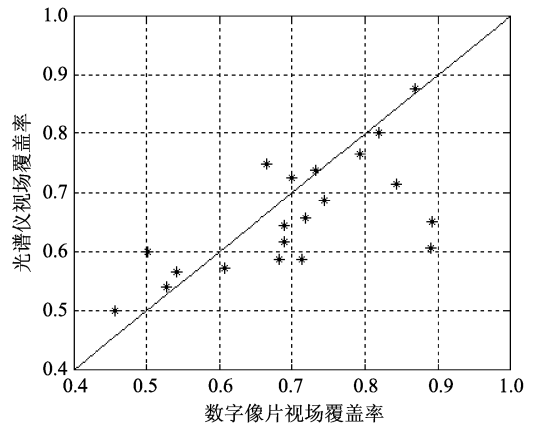


图 6 计算的光谱仪视场内的覆盖率与数字像片全视场覆盖率比较

Fig 6 Comparison of cover rates computed respectively inside ASD FOV and camera FOV

此,计算得到的光谱仪视场内的覆盖率会更加准确地反映光谱仪测量得到的波谱所对应的作物冠层结构。

5 实验数据验证

首先使用光谱仪视场在数字像片上的定标实验获得的 6 个参数,计算了 BRDF 观测实验中获取的数字像片上光谱仪视场内的覆盖率。然后对实验中获得的包括主平面和垂直主平面共 22 个观测角的玉米 BRDF 波谱,使用多项式表达模型,计算多项式系数 $a_{10}, a_{01}, a_{20}, a_{11}, a_{02}, \delta, s_1$ 和 s_2 ,根据第二种方式构建系数矩阵,使用经验系数 Coef_2,反演得到每条波谱对应的多角度覆盖率。图 7 画出了反演的多角度覆盖率与实际测量的覆盖率。计算 RMSE 为 0.1254。由图中可以看出,反演的覆盖率中有一个异常点,实际测量的覆盖率为 0.587,而反演得到的覆盖率只有 0.163。查看对应的波谱,在近红外波段,反射率最大值已达到 0.71,而正常情况下只有

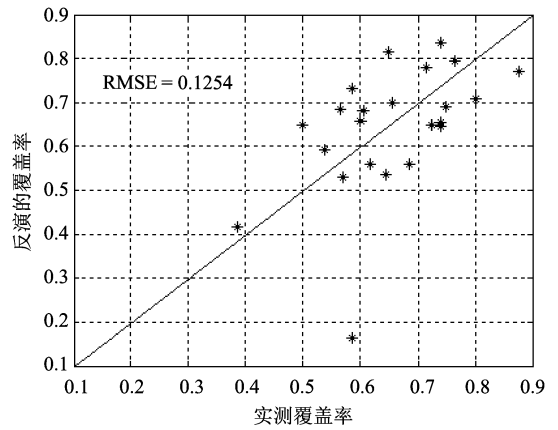
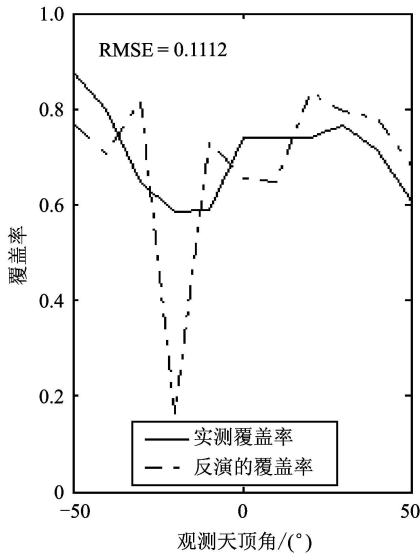


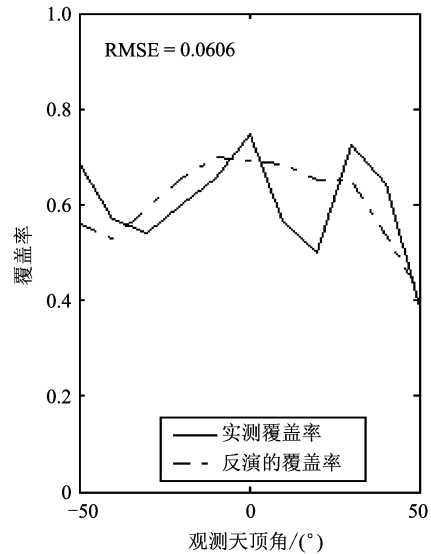
图 7 反演覆盖率与测量覆盖率比较图

Fig 7 Comparison of inversed and measured cover rates

0.34 左右。因此,异常点的产生主要是由于实验中的异常状况所致。图 8 画出的是分别在主平面和垂直主平面上不同观测角观测的覆盖率与反演覆盖率。由于主平面上有一个异常点存在,故计算的 RMSE 较大。



(a)



(b)

图 8 主平面与垂直主平面上实测覆盖率与反演的覆盖率

(a) 主平面; (b) 垂直主平面

Fig 8 Comparison of measured and inversed cover rates respectively in the principle plane and the vertical principle plane

(a) Sun principle plane; (b) Cross sun principle plane

由图 8 可以看出,虽然,根据经验关系反演得到的反演覆盖率与实测的覆盖率能够较好地符合,但是,两者都没有反映出随着观测角增加覆盖率增大的规律。

6 结论与讨论

本次研究实现了基于多项式表达模型的多角度

覆盖率反演,并设计实验对其进行了验证。对于添加了一定噪声的模拟数据,能够非常准确地反演方向覆盖率(残差 0.0096),但是对于实测数据,效果还不十分理想。分析其中的原因,认为可能,一是实验测量冠层多角度光谱和配套组分光谱,因为时间地点不可能完全一致,所以数据的配套上可能还存在潜在的问题;二是分析多项式反演系数与作物多角度覆盖率只用了最简单的经验回归模型,而经验模型存在的一个公认的缺点就是对于训练数据能够拟合很好,却不能推广到其他条件下测量的数据,尽管在模拟数据时力求使模拟数据集具有代表性,但是看来仍不能克服经验模型的这种缺点。

所以,在以后的工作中,一方面需要继续完善这种组分波谱、冠层波谱及数据像片相配套的测量方法,另一方面将在经验模型的基础上,推导多项式反演系数与作物多角度覆盖率间的理论模型。之后,将尝试将模型用于高光谱遥感图像的反演。

致 谢 感谢北京师范大学遥感与 GIS 研究中心的刘素红副教授提供组分光谱数据和在 BRDF 观测实验上的支持。

参 考 文 献 (References)

- [1] Chen J, Chen Y H, He C Y, et al. Sub-pixel Model for Vegetation Fraction Estimation Based on Land Cover Classification [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2001, **5** (6): 416—423. [陈晋, 陈云浩, 何春阳等. 基于土地覆盖分类的植被覆盖率估算压像元模型与应用 [J]. *遥感学报*, 2001, **5** (6): 416—422]
- [2] Tian J, Yan Y, Chen S B. The Advances in the Application of the Remote Sensing Technique to the Estimation of Vegetation Fractional Cover [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2004, **59**: 1—5. [田静, 阎雨, 陈升波. 植被覆盖率的遥感研究进展 [J]. *国土资源遥感*, 2004, **59**: 1—5]
- [3] Su H B, Zhang R H, Tang X Z. An Alternative Method to Compute the Component Fractions in the Geometrical Optical Model Visual Computing Method [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2003, **41**: 719—724.
- [4] Liu Q, Menenti M. Polynomial Expression for Analysis of Hyperspectral Remote Sensing Data [A]. *Proceedings of IGARSS03*, 2003, **VI**: 3763—3765.
- [5] Liu Q, Yan C Y, Du Y M, et al. Analyzing Canopy Spectra with Polynomial Expression and Retrieval of Chlorophyll Concentration [J]. *Proceedings of IGARSS04*, 2004, **VI**: 4203—4206.
- [6] Yan C Y, Liu Q, Niu Z, et al. Polynomial Analysis of Canopy Spectra and Biochemical Component Content Inversion [J]. *Science in China (Ser D)*, 2005, **48** (10): 1780—1791. [颜春燕, 刘强, 牛铮等. 冠层光谱的多项式分析及生化参量反演 [J]. *中国科学 (D)*, 2005, **35** (9): 881—890]
- [7] Verhoef W. Light Scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Reflectance Modeling: The SAIL Model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1984, **16**: 125—141.
- [8] Kuusk A. A Fast Invertible Canopy Reflectance Model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, **51**: 342—350.
- [9] Bacour C, Jacquenoud S, Tourbier Y, et al. Design and Analysis of Numerical Experiments to Compare Four Canopy Reflectance Models [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **79**: 72—83.
- [10] Zarco-Tejada P J, Rueda C A, Ustin S L. Water Content Estimation in Vegetation with MODIS Reflectance Data and Model Inversion Methods [J]. *Remote Sensing Environment*, 2003, **85**: 109—124.