

基于扩展真实结构模型的地基多角度遥感视场效应分析^①黄华国^②

(北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室 北京 100083)

摘 要 为研究地面多角度遥感测量中的视场(FOV)效应问题,扩展了计算机真实结构模型,进行了玉米和小麦冠层的野外模拟测量和误差评估研究。扩展模块与 POV-Ray 模型进行了对比,验证结果一致。模拟测量分析表明,地面多角度观测试验中,FOV 效应可导致近红外双向反射率(BRF)偏差接近 0.1。玉米 FOV 效应比小麦明显。大 FOV 条件下,难以获得精确的热点位置、大小和宽度。研究弥补了真实结构模型在大 FOV 条件下的不足,证实了“定面积法”和“定像素法”的一致性,肯定了小麦冠层大 FOV 观测的可行性。研究结论将有助于地面定量遥感实验和理论建模。

关键词 视场(FOV),视场效应,透视投影,真实结构模型(RGM),植被冠层,遥感

0 引 言

多角度遥感可用于植被结构参数和生化参数反演^[1,2],由于它比传统垂直观测遥感蕴含了更多的立体结构信息,因而成为当前定量遥感研究的热点^[3,4]。地面观测是多角度遥感建模和卫星反演的重要基础^[5-9]。地面多角度测量平台低,为满足精度要求^[10],观测视场(field of view, FOV)角需较大^[11]。然而,地面多角度观测存在两个主要问题。首先,大 FOV 测量得到的双向反射率(bidirectional reflectance factor, BRF)并非严格意义上的“双向”反射率,而是一个近似圆锥的观测“立体角”反射率,因此测量结果与单一方向反射率是有差异的^[6]。其次是 FOV 不确定性,即不同方向观测到的地面目标可能存在差异^[12]。热红外波段的方向亮度温度(directional brightness temperature, DBT)也存在类似问题^[13]。本文将两种问题统称为 FOV 效应。

在验证三维辐射传输模型 DART^[14]时,作者发现相同样地上两种多角度传感器(POLDER 和 PARABOLA)得到的 BRF 差异较大,其中一个很重要的原因就是 FOV 不一致(PARABOLA 的 FOV 为 15°,而 POLDER 为 0.37°),相比而言 POLDER 的热

点效应更加明显^[15]。相关研究^[12,16]表明,FOV 效应会导致植被或者土壤等组分的观测权重误差,而引起 BRF 观测误差。不过,上述研究仅采用不透明垄行模型假设,并不考虑多次散射。不透明体模型会增大植被可视比例。而在近红外波段,多次散射效应也会对 BRF 形状产生较大影响。为进一步推进 FOV 效应研究,本文扩展了三维真实结构模型(radiosity-graphics combined model, RGM),综合考虑了孔隙、透视效应和多次散射,更为精细地分析了 FOV 不确定性带来的 BRF 误差,以便评价近似模型的可行性,为野外试验中如何纠正 FOV 效应提供支持。

1 模型和方法

1.1 真实结构模型(RGM)

RGM 是一种结合计算机图形学原理和辐射度理论求解植被冠层内部辐射传输和冠层顶部 BRF 的计算机模拟模型^[17]。RGM 基于逼近真实的三维场景对冠层的辐射传输进行模拟,可以准确计算多次散射、BRF 和组分可视比例,适用条件广,符合研究要求。但是,RGM 模型在处理 FOV 时,采用若干平行投影的平均来代替宽视场 BRF,计算结果存在

① 国家自然科学基金(41171278),国家科技支撑计划(2012BAC01B03),教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0230)和北京市科技新星计划(2009A24)资助项目。

② 男,1978 年生,博士,副教授;研究方向:植被定量遥感,三维仿真;联系人,E-mail:huaguo_huang@bjfu.edu.cn
(收稿日期:2013-02-21)

一定的误差,需要开发真正的透视投影模块。

1.2 野外多角度观测方法

图1为常见的野外地面多角度观测方法。观测中心点 O 位于作物冠层正上方。光谱仪的探头 S 视场角固定,视线中心始终指向 O ,并在以 O 为中心,半径为 R (即 SO) 的上半球表面移动观测 BRF。当高度 h 为 0 时,各个角度观测到的目标均为同一个圆形。当 h 大于 0(如作物和森林)时,尽管 O 所在平面观测的圆形区域可能会一直保持不变,但视线会穿过该平面直到土壤,导致观测对象随着角度发生变化。观测目标的异质性越高,观测目标不一致性就越大。

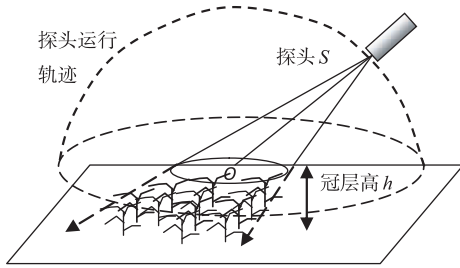


图1 野外地面多角度观测示意图

1.3 透视投影和视场计算

地物发射出一束光线,经过投影中心聚焦至投影平面上的成像方式,叫透视投影,也叫中心投影。图1中,探头 S 相当于投影中心。假定有个投影平面,其中心通过 SO ,并且和 SO 垂直,那么得到的投影图像其实就是中心投影图像。当半径 R 无限大时,近似为平行投影。但是当 R 较小时,平行投影假设会存在一定误差,透视投影比平行投影将更贴近现实观测几何条件。

根据计算机图形学中的透视投影公式^[18],将三维坐标点集转换为包含深度信息的透视投影坐标点集。对所有点进行深度排序,按照画家算法由远及近绘制所有点,得到所有面元的投影图像。利用 RGM 模拟得到的每个面元的光照和阴影辐射,对投影图像进行渲染,就得到了整个场景的透视图。

考虑探头 FOV 时,须去除非 FOV 内像素。最简单的方式是,不考虑观测方向变化,直接取图像中心处半径为 a 的圆形区域作为 FOV,称之为“定像素”方法,如式

$$a = R \times \tan\left(\frac{FOV}{2}\right) \times \left(\frac{L}{2 \times R_{\max}}\right) \quad (1)$$

所示。式中 $R_{\max}$ 是以 O 为中心的整个场景的最大外

接圆半径, L 为透视图像素宽度。

然而,实际视场在图像上的投影随着角度变化较大,类似椭圆。较为精确的方法是“定面积”法^[19,20]。投影可以采用上下两条椭圆曲线拟合^[20],长轴位于图像中心的横轴方向,长度仍然为 a ,短轴位于图像中心的纵轴方向,上下分别长为 b 和 d 。以图像中心作为原点,对图中任意一个像素坐标 (x, y) 进行判断:

$$\begin{cases} f(x, y) = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 1 \\ g(x, y) = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{d^2} - 1 \end{cases} \quad (2)$$

如果 $f(x, y) \leq 0$ 并且 $g(x, y) \leq 0$, 则像素 (x, y) 被保留参与 BRF 计算,否则该像素被剔除。其中 b 和 d 计算方法为

$$\begin{aligned} b &= \frac{R \times a \times \cos\theta}{R + a \times \sin\theta} \\ d &= \frac{R \times a \times \cos\theta}{R - a \times \sin\theta} \end{aligned} \quad (3)$$

1.4 分析指标

采用多次散射后的 BRF 为指标,分析 BRF 形状特征和绝对值,包括热点效应^[21]。比较三种情况:(1)平行投影;(1)定像素法获得的透视投影;(3)定面积法获得的透视投影。并采用光照植被、阴影植被、光照土壤和阴影土壤四个组分的可视比例,分析 BRF 随着视场变化的规律。

2 模拟设置

2.1 模拟场景

设计玉米和小麦两种典型行播作物类型的地表真实场景(图2),具体的结构参数见表1。组分光谱选择红光和近红外两个典型波段,所有场景采用同一套数据(表2)。太阳天顶角为 30° ,方位角为 150° (北为 0° ,顺时针)。

2.2 多角度观测

观测高度为距冠层顶部高度,数值与 R 相等,默认为 2m。选择太阳主平面和垂直太阳平面进行观测,观测天顶角间隔为 10° ,从 -60° 到 60° ,但是在热点附近($30^\circ \pm 10^\circ$),角度加密,间隔改为 2° 。

FOV:参考 ASD 公司(<http://www.asdi.com/>)生产的光谱仪探头提供的 FOV 序列($1^\circ, 5^\circ, 8^\circ, 18^\circ$ 和 25°),并考虑观测代表性,选择 FOV 为 $8^\circ, 18^\circ$ 和 25° 的三种情况进行模拟分析。

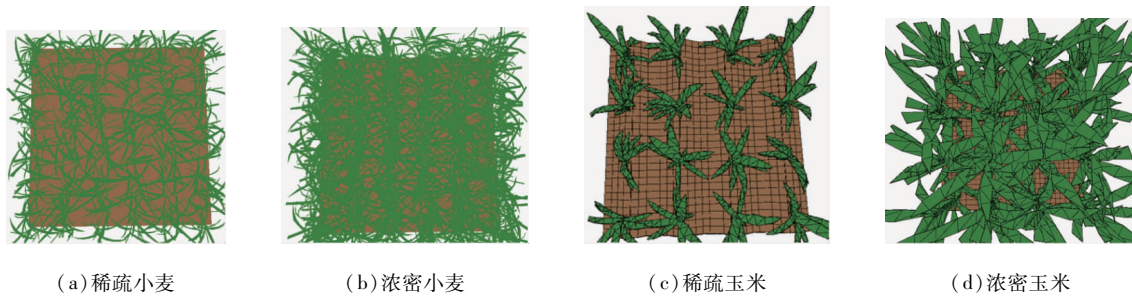


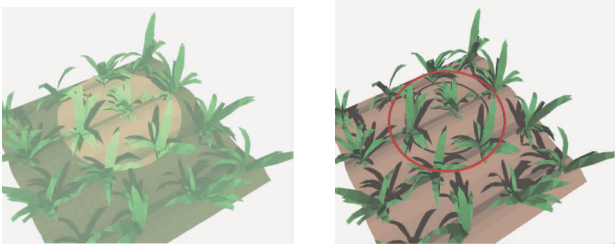
图 2 模拟所需场景

表 1 模拟所需场景结构参数 (SAI 和 LAI 分别为茎面积指数和叶面积指数)

	行距 (cm)	株距 (cm)	高度 (cm)	SAI (m ² m ⁻²)	LAI (m ² m ⁻²)	平均叶倾角 (°)
小麦 - 稀疏	15	7.25	18	0.1	0.7	58
小麦 - 浓密	15	7.25	45	0.4	2.0	61
玉米 - 稀疏	50	50	70	0.2	0.5	64
玉米 - 浓密	50	50	145	1.5	2.3	72

表 2 模拟所需光谱参数

组分	红光		近红外	
	反射率	透过率	反射率	透过率
叶片	0.08	0.07	0.50	0.40
茎	0.08	0.00	0.50	0.00
土壤	0.10	0.00	0.20	0.00



(a) 真实结构模型 (b) POV-Ray 模型

图 3 模拟的稀疏玉米观测图像对比, 对应观测区域分别是亮色区域 (a) 和圆圈区域 (b)

3 模型验证

POV-Ray (Persistence of Vision Raytracer) 模型, 一个使用光线跟踪绘制三维图像的软件, 广泛应用于真实感图像绘制, 并已经用于遥感建模研究^[22]。以 POV-Ray 3.6 作为参考模型, 可验证模型在透视变化和视场计算上的正确性。以稀疏玉米冠层为例, 图 3 给出了两个模型在太阳入射方向 (天顶角 30°, 方位角 150°), FOV 25°, 观测架长 2m 时的模拟观测图像。

可以看出, 两个模型的结果是一致的: 首先, FOV 覆盖区域一致; 其次, 由于透视投影导致热点方向仍然可见阴影, 阴影的位置和大小一致, 目标距离探头越近, 观测到的阴影比例越大, 符合透视投影规律; 最后, 整体图像具有极强的相似度, 亮度差异主要来自于 POV-Ray 模型不考虑叶片的透过率。因此, 真实结构模型拓展的 FOV 模块、视场估计以及透视变换准确。

POV-Ray 模型不能较好地处理叶片透过率, 而且只能输出 0 - 255 的亮度拉伸值, 有局限性。RGM 可以输出绝对 BRF, 更适合定量遥感研究。由于 RGM 的辐射求解精度已有验证^[23], 而本文并未修改辐射模块, 所以没有验证辐射值。

4 结果分析

4.1 定像素与定面积的比较

模拟表明, 2m 观测高度下, 定面积和定像素两种方法得到的 BRF 曲线基本重合, 平均差值小于 0.001。最大差值出现在热点附近, 定面积方法的热点效应略明显。小麦冠层红光 BRF 最大差异 0.0015、近红外最大差异 0.016 出现在 LAI 2.0 时。LAI 2.3 时, 玉米冠层的 BRF 出现最大差异 0.003 (红光) 和 0.014 (近红外)。因此, 定面积方法与定像素方法无显著差异, 但可以改善热点大小和宽度

(图4)。该结论仅针对小麦和玉米冠层,对垄结构非常明显的冠层适用性还需进一步分析。

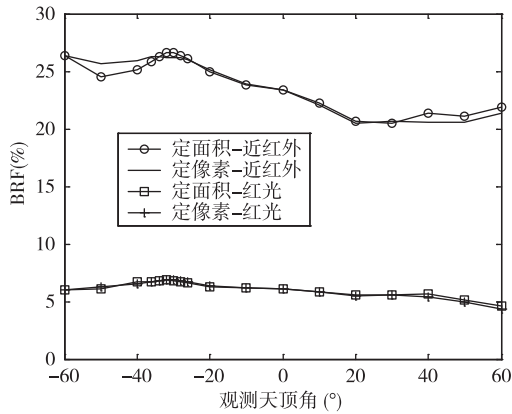


图4 稀疏玉米场景在18°FOV时定像素与定面积BRF

4.2 不同FOV下的BRF比较

不同FOV模拟的小麦场景BRF趋势一致,但存在系统数值、热点效应和碗边效应三种差异(图5和图6)。

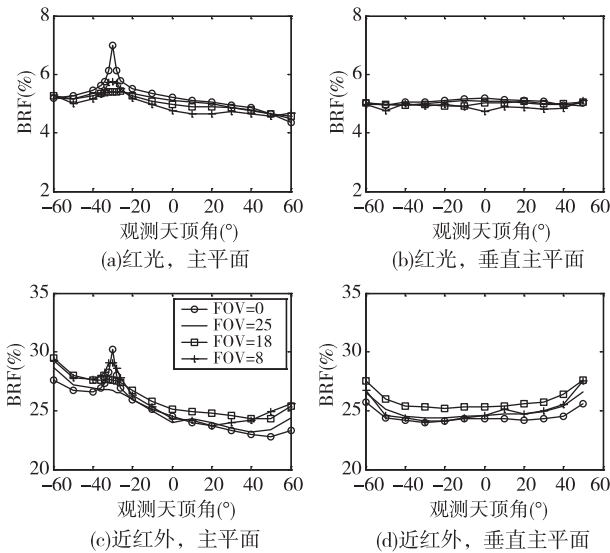


图5 稀疏小麦场景在不同FOV条件下的BRF

系统数值偏差:三种FOV的模拟结果在红光波段都比平行投影略偏低,而在近红外波段,除了热点区域,BRF偏高0.02~0.03。

热点效应:在热点区域,FOV 18°和25°的BRF偏低,几乎看不到热点。但FOV为8°时的热点效应比FOV为18°和25°时都要明显一些。

碗边效应:在近红外,三种FOV的模拟结果呈

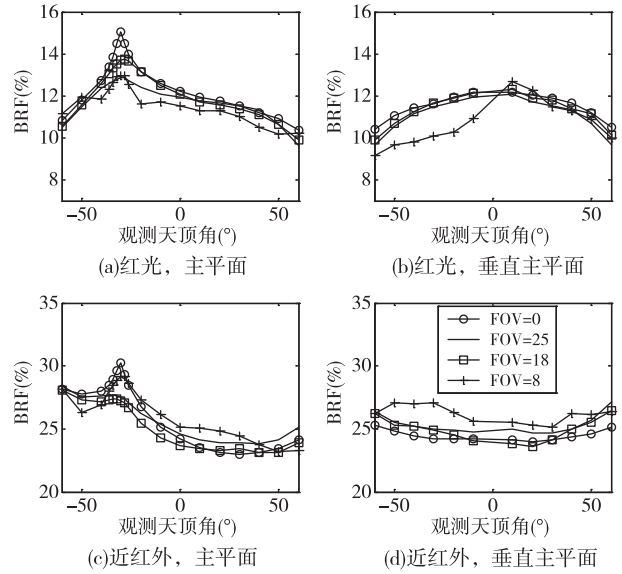


图6 浓密小麦场景在不同FOV条件下的BRF

现比平行投影更加明显的“碗边效应”。

图7和图8分别显示了稀疏和浓密玉米场景的BRF随着FOV的变化情况。FOV为8°的模拟结果趋势明显不同,BRF差异也最大。FOV为18°和25°的模拟结果在红光波段趋势一致,但是近红外差别较大。近红外两个平面上都可以看到星下点附近的BRF要显著偏高一些,形成一个小的凸起。相对而言,FOV为18°的结果最接近平行投影,平均差值为0.003,最大差值为0.02。浓密玉米场景的BRF数值差值更为明显,其中红光差异近0.01,近红外差异近0.1。

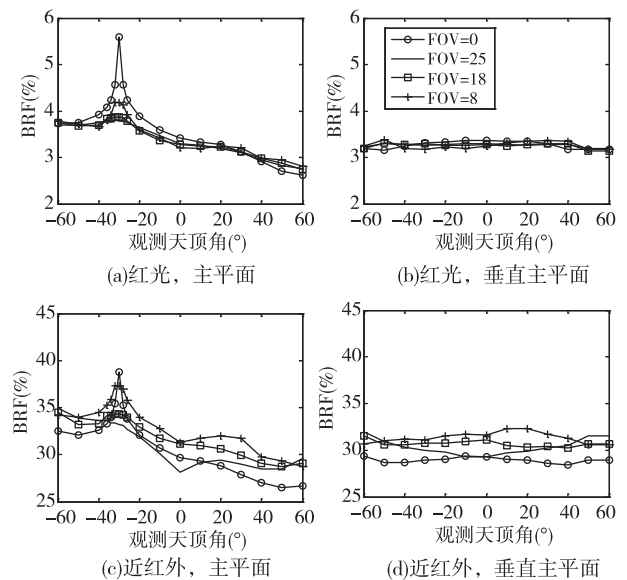


图7 稀疏玉米场景在不同FOV条件下的BRF

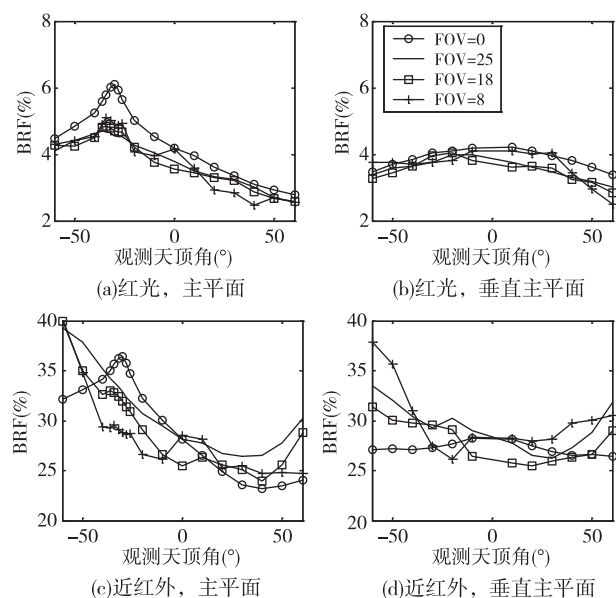


图 8 浓密玉米场景在不同 FOV 条件下的 BRF

4.3 差异分析

不同 FOV 下观测得到的 BRF 不一致,有两个主要因素:(1)组分的可视比例发生了变化;(2)组分光谱存在差异。其中组分可视比例更关键,属于“质”的变化。而组分光谱差异,更多地体现在“量”的变化。不同波段多次散射效应不同,因此组分光谱差异也不同。

图 9 显示了 4 个场景的植被观测比例随着角度的变化。可以看出,透视投影时阴影植被的可视比例多高于平行投影。光照叶片的可视比例在稀疏场景中和平行投影接近,但是在浓密场景大角度观测

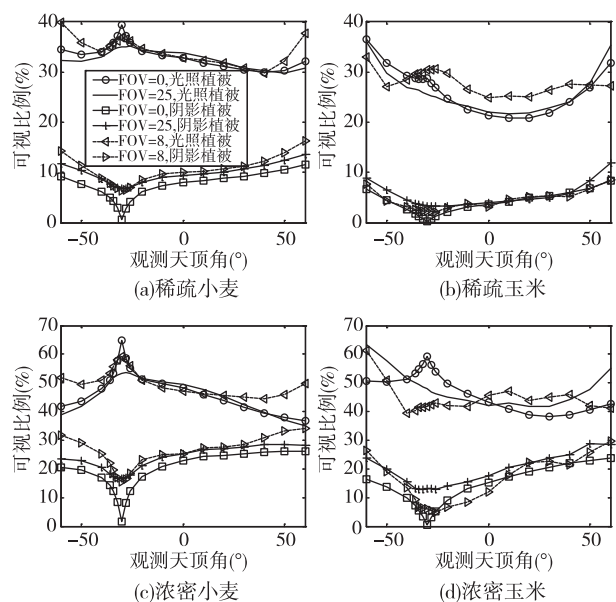


图 9 光照和阴影叶片在太阳主平面上的观测比例

时会高于平行投影 10% 左右。因此,透视投影会导致植被的贡献被高估。由于植被组分的反射率在红光波段一般小于土壤,而在近红外波段一般远大于土壤,所以透视投影得到的红光波段 BRF 偏低,而近红外 BRF 则偏高,尤其是在大的观测角度下。当叶面积指数增加时,植被对总体 BRF 的贡献增大,其可视比例的高估会引起近红外波段的“碗边效应”的增强。

热点附近光照植被的可视比例未见明显凸起,也解释了热点效应不明显的原因。

4.4 观测高度的影响

模拟表明,观测高度为 1.0m 时,即使是矮小的小麦冠层,其近红外 BRF 最大偏差增至 0.05 (见图 10(a))。对玉米冠层,只有当高度增加到 15m 时,近红外 BRF 最大偏差才小于 0.02 (见图 10(b))。

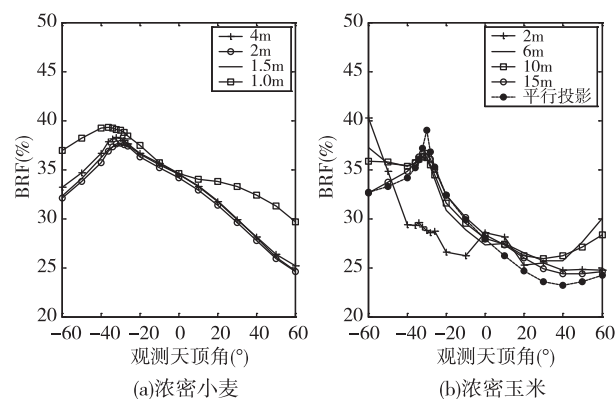


图 10 在 8°FOV 时观测高度对 BRF 的影响

5 结论和讨论

模拟表明,FOV 效应在不同冠层上的表现并不完全相同。对小麦而言,BRF 趋势基本一致,误差相对较小(小于 0.03)。玉米冠层的 BRF 误差更加明显,在浓密情况下误差可接近 0.1。其原因在于,在相同观测高度和 FOV 条件下,玉米冠层的行距更大,冠层更高,叶片更宽。一方面覆盖的垄行减少,使得观测的代表性降低,观测目标的变化更大^[10];另一方面,在透视条件下,距离探头近的叶片越大,对后面土壤的遮挡就越明显,因此植被比例增大会更明显。

上述分析可以帮助回答以下几个问题:

(1) 透视投影能否用 FOV 内若干平行投影的平

均来代替?

在 RGM 模型中,处理 FOV 观测的模拟方法是假定透视投影可以用若干平行投影的平均来代替。当 FOV 较小时($<5^\circ$),观测的方向近似为平行投影,用平行投影代替可行。但当 FOV 较大时(如 25°),透视投影产生的变形无法用平行投影来弥补。因此,透视投影算法弥补了 RGM 在大 FOV 角下的 BRF 计算不足。

(2)大 FOV 观测的结果能否用于验证理论模型?

理论模型通常都是采用近似平行投影的狭小 FOV 角。野外观测 BRF 则一般是在较大的 FOV 角下得到的。两者的不一致性长期被忽略,而直接用观测 BRF 验证理论 BRF 模型。模拟表明,不考虑热点,小麦冠层 25° FOV 的观测结果趋势正确,基本可用,但应用时要考虑 FOV 误差。2m 高度测量玉米冠层的结果误差较大,稀疏条件可以谨慎使用 18° FOV 天顶角小于 60° 的结果。浓密条件下,2m 观测高度结果可信度低,系统偏差大,应增加观测高度至 15m 以上。

(3)野外测量 BRF 能否提取热点?

热点是 BRF 测量中的难点。 8° FOV 一定程度上捕捉到了小麦的热点信息,但仍有较大差异。一方面因为在热点方向,始终存在探头的阴影;另一方面就是 FOV 的大小和热点宽度相当,甚至偏大,角度分辨率不够探测热点。因此,采用大 FOV、“定面积”或者“定像素”的方法提取不到准确的热点位置、大小和宽度,仅仅能得到粗略的位置和宽度信息。

(4)是否一定需要“定面积”?

在本文有限的模拟条件下(四种作物和一个太阳入射角)，“定像素”与“定面积”的结果没有显著差异。当观测的地面目标覆盖代表性较好(如 2 垄以上时)，“定像素”带来的目标不确定性并不明显。

参考文献

- [1] Diner D J, Asner G P, Davies R, et al. New directions in earth observing: scientific applications of multiangle remote sensing. *Bull Amer Meteor Soc*, 1999, 80: 2209-2228
- [2] Diner D J, Beckert J C, Bothwell G W, et al. Performance of the MISR instrument during its first 20 months in earth orbit. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2002, 40 (7) : 1449-1466
- [3] 赵春江, 黄文江, 王纪华等. 用多角度光谱信息反演冬小麦叶绿素含量垂直分布. *农业工程学报*, 2006, 22 (6) : 104-109
- [4] 黄文江, 王纪华, 刘良云等. 基于多时相和多角度光谱信息的作物株型遥感识别初探. *农业工程学报*, 2005, 21 (6) : 82-86
- [5] Ishiyama T, Tsuchiya K. Development of BRF (Bidirectional Reflectance Factor) facility and its preliminary results. *Advances in Space Research*, 1999, 23 (8) : 1389-1392
- [6] Sandmeier S R. Acquisition of bidirectional reflectance factor data with field goniometers. *Remote Sens Environ*, 2000, 73 (3) : 257-269
- [7] Snyder W C, Wan Z M, Zhang Y L, et al. Thermal Infrared (3-14 μm) bidirectional reflectance measurements of sands and soils. *Remote Sens Environ*, 1997, 60 (1) : 101-109
- [8] Comar A, Baret F, Viénot F, et al. Wheat leaf bidirectional reflectance measurements: Description and quantification of the volume, specular and hot-spot scattering features. *Remote Sens Environ*, 2012, 121 : 26-35
- [9] Lagouarde J P, Kerr Y H, Brunet Y. An experimental study of angular effects on surface temperature for various plant canopies and bare soils. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 77 (3/4) : 167-190
- [10] Zhang R H, Tian J, Li Z L, et al. Principles and methods for the validation of quantitative remote sensing products. *Sci China Ser Earth Sci*, 2010, 40 (2) : 211-222
- [11] Stuckens J, Somers B, Verstraeten W, et al. Evaluation and normalization of cloud obscuration related BRDF effects in field spectroscopy. *Remote Sensing*. 2009, 1 (3) : 496-518
- [12] 陈玲, 阎广建, 李静等. 行播作物地面方向性测量的视场不确定性分析. *地球科学进展*, 2009, 24 (7) : 793-802
- [13] 余涛, 顾行发, 田国良等. 垄行作物玉米方向亮温野外测量中视场角影响的简单分析. *遥感学报*, 2004, 8 (5) : 443-450
- [14] Gastellu-Etchegorry J P, Demarez V, Pinel V, et al. Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies. *Remote Sens Environ*, 1996, 58 (2) : 131-156
- [15] Gastellu-Etchegorry J P, Guillevic P, Zagolski F, et al. Modeling BRF and radiation regime of boreal and tropical forests: I. BRF. *Remote Sens Environ*, 1999, 68 (3) : 281-316
- [16] 李丽, 乔延利, 顾行发等. 遥感地面辐射观测中的视场效应问题研究. *遥感学报*, 2006, 10 (5) : 676-682
- [17] Qin W, Gerstl S. 3-D scene modeling of semidesert vegetation cover and its radiation regime. *Remote Sens Environ*, 2000, 74 (1) : 145-162
- [18] 孙家广, 杨长贵. 计算机图形学. 第三版. 北京: 清华大学出版社, 1998. 1-595

- [19] Li Z L, Zhang R, Sun X, et al. Experimental system for the study of the directional thermal emission of natural surfaces. *Int J Remote Sens*, 2004, 25(1): 195-204
- [20] 黄华国, 柳钦火, 刘强等. 利用多角度热图像提取冠层组分温度和方向亮温. 北京师范大学学报(自然科学版), 2007, 43(3): 291-298
- [21] Hapke B, Dimucci D, Nelson R, et al. The cause of the hot spot in vegetation canopies and soils: Shadow-hiding versus coherent backscatter. *Remote Sens Environ*, 1996, 58(1): 63-68
- [22] 王剑庚, 赵峰, 李虎等. POV-Ray 应用于冠层可视光照和阴影组分比例变化分析. 遥感学报, 2010, 14(2): 242-251
- [23] Widlowski J L, Taberner M, Pinty B, et al. The third Radiation transfer Model Intercomparison (RAMI) exercise: Documenting progress in canopy reflectance modelling, *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: D0911

Study of the FOV effect in field multi-angular remote sensing based on an extended realistic structural model

Huang Huaguo

(The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education,
Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract

To investigate the FOV (field of view) effect in field multi-angular remote sensing, a realistic structural computation model was extended to simulate the process of field measurements on maize and wheat canopies and assess FOV-induced measurement errors. The extended module was compared with the POV-Ray (persistence of vision ray-tracer) model, and the same simulation results were obtained. The results showed that the FOV effect resulted in a large BRDF (bidirectional reflectance factor) error of 0.1 in near infrared regions. Maize canopies had a more significant FOV effect than wheat canopies. At a large FOV, the hotspot position, size and width could not be precisely captured. The extension improved simulation capabilities under large FOV conditions for realistic structural models. The simulation results confirmed the consistence between the “fix-area” method and the “fix-pixel” method, as well as the feasibility of using large FOV on wheat canopies. The conclusions will help field experiments and theoretical modeling of crop canopies, and provide support for multi-angular remote sensing research.

Key words: field of view (FOV), FOV effect, perspective projection, radiosity-graphics combined model (RGM), vegetation canopy, remote sensing