

文章编号:1001-8166(2009)07-0793-09

行播作物地面方向性测量的视场不确定性分析*

陈玲, 阎广建*, 李静, 余莹洁

(北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京师范大学/中国科学院遥感应用研究所
遥感科学国家重点实验室, 北京 100875)

摘要:行播作物以其独特的几何结构介于离散与连续植被之间。地面测量此类地物的双向反射系数(Bidirectional Reflectance Factor, BRDF)特征, 不可回避视场变化所引起的不确定性问题。在Kimes垄行结构模型中加入等效视场的概念, 对视场进行分解, 从而建立了一个行结构多角度地面测量的视场不确定性分析模型, 为定量分析视场变化所引起的BRDF测量误差提供了可能。利用该模型较为全面地模拟分析了视场变化对视场内四组分比例及冠层BRDF的影响。结果表明:①BRDF误差基本独立于植被—土壤光谱对比度。②误差与观测天顶角之间的关系复杂, 前向观测表现得尤为明显。③垂直观测视场满1个垄周期后, 四组分比例及冠层BRDF的误差可保持较小且稳定的状态; 满2个垄周期, 误差达到局部最小值(局部指垂直视场含2.5个垄周期以下, 不排除视场更大, 误差更小的可能性)。④垂直视场若仅含0.5个垄周期, BRDF误差最大值一般可高达67.8%, 最小值亦可达38.7%; 满1个垄周期后, BRDF误差极大值降至20%以下, 极小值可控制在6%以内。其中视场为1个整周期, 误差范围为6%~12%; 2个整周期, 误差范围为0.6%~3.9%。⑤垂直视场大小为1~2个垄周期之间的非整周期, 四组分比例及冠层BRDF误差总体上均稍高于1个整周期, 故建议在实际测量过程中, 测量高度若无法满足垂直视场为2个垄周期, 可优先考虑1个整周期的情况。还通过非线性最优化函数将2个模型分别与黑河实验玉米地方向性观测实测数据进行拟合, 得出的结果与模拟分析的结论一致, 即在垂直视场内包含2个垄周期以上的生长初期, 方向性测量无需考虑视场效应; 若垂直视场内不足一个垄周期(生长中期), 则有必要考虑视场的不确定性。

关键词:行结构; 视场不确定性分析模型; 冠层BRDF; 垄周期; 误差

中图分类号:P407 **文献标志码:**A

1 引言

地表各组分的光学特征及光照遮荫比例空间分布的差异, 使得所有地物都具有独特的各向异性特征。准确地获取此特征对于认识地物光谱特性、分析遥感影像、建立并验证BRDF模型等均起着关键性

的作用。

野外多角度测量被认为是地表方向性特征真实值的主要获取方式。目前国际上已存在多种野外多角度测量装置, 主要包括瑞士苏黎世大学遥感实验室的FIGOS和NASA的SFG^[1,2], 加拿大莱斯布里奇大学的ULGS^[3]和瑞士联邦科技研究所IAC

* 收稿日期:2009-02-04; 修回日期:2009-05-31.

* 基金项目:国家重点基础研究发展计划项目“陆表生态环境要素主被动遥感协同反演理论与方法”(编号:2007CB714402); 中国科学院西部行动计划(二期)项目“黑河流域遥感—地面观测同步试验与综合模拟平台建设”(编号:KZCX2-XB2-09); 新世纪优秀人才支持计划联合资助。

作者简介:陈玲(1982-), 女, 安徽黄山人, 博士生, 主要从事定量遥感方面研究。E-mail: chenling8247@126.com

* 通讯作者:阎广建(1972-), 男, 山西应县人, 教授, 主要从事多角度遥感、热红外遥感建模及反演以及尺度转换等方面研究。

E-mail: gjyan@bnu.edu.cn

ETH^[4], 还有 JPL 的 PARABOLA 球面扫描辐射计^[5], 这些装置均因自身的限制而只能测量均匀地表的方向性特征。Sandmeier^[6]与 Bourgeois^[4]分别采用相应的仪器对草地与雪地进行了方向性光谱测量, 均提及测量过程中存在视场变化问题, 但认为目标地物较为均一, 加之视场很小(观测天顶角为 75°时, 椭圆视场的长轴仅为 41 cm^[6]), 视场变化带来的影响可忽略不计。而实际上视场越小, 可测量的目标尺度就越小。同样的目标物, 即便是均匀的(如球场草坪等), 在视场很小的情况下, 也存在较为严重的视场不确定性问题。但关于这方面, 国际上尚未见详细的分析报道。

行播作物是介于离散与连续植被之间的典型植被类型。测量此类具有复杂几何结构的冠层, 一般需采用较大视场角。Kimes 等^[7]采用 15°的视场角观测棉花的热红外辐射方向特性, Lagouarde 等^[8]采用 35°的视场角观测玉米的热红外方向辐射。他们指出大视场角会在一定程度上歪曲地物的方向性特征, 但均未作系统性的分析。余涛等^[9]采用一个简化的三分量二维结构模型对较大视场角测量玉米方向亮温的误差进行了初步分析与估算, 研究中考虑传感器在垂直垄向上一个垄行距内运动时造成的组分权重的变化, 但在分析中仅考虑了太阳和传感器均处于垂直垄平面且视场包含整数倍行距的情况。李丽等^[10]利用网格模型法对比分析了不同视场角下地面辐射测量的视场效应, 得出的结论是传感器视场角带来的视场效应在不同的观测天顶表现出不同的特征: 在较小观测天顶, 植被权重被夸大致使 NDVI 增加; 在较大观测天顶, 情况则相反, 即土壤权重被夸大。

目前, 垄状作物方向性建模方面也有不少研究。最初由 Jackson 等^[11]和 Kimes^[7]将作物的垄简化为实心无限长箱体, 底部紧贴地面且光线不可穿透; Verbrugge 等^[12]将作物行结构描述为横放于离地面一定距离的椭圆柱; 陈良富^[13]与阎广建等^[14]在 Kimes 模型的基础上建立了行播作物双向孔隙率模型; 余涛等^[15]用悬浮于土平面之上且充满孔隙的“箱体”来描述行播作物; 杜永明^[16]在前人的基础上, 针对不同生长期, 采用不同的模型来描述小麦垄行结构。

本文在 Kimes 行结构模型中加入等效视场的概念, 通过视场分解法建立了一个行结构地表方向性测量的视场不确定性分析模型(Footprint Uncertainty Analysis Model, FUA), 较为全面地模拟分析了视场

变化对视场内光照植被、阴影植被、光照土壤、阴影土壤等四组分比例以及冠层 BRf 的影响, 从而提出了一些测量建议。

2 视场不确定性分析模型

2.1 模型描述

该模型基本原理与 Kimes 一致, 将垄行作物视为实心无限长箱体, 采用等效行角将太阳与观测方位转换到垂直垄平面。不同之处在于考虑了具体观测视场, 视场的大小与位置由传感器视场角、观测架高度及观测天顶角等确定; 继而通过观测方位与垄向之间的关系, 确定垂直垄等效视场; 最终将该等效视场分解成中部的整垄单元及两侧的剩余视场进行建模。模型全面考虑 3 部分视场可能发生的任何情况, 从而计算出实际视场中的四组分权重。给定组分光谱或组分温度, 即可得实际视场的冠层辐射信息。

另外, 模型还给出 4 项分析条件: 其一为视场中心及大小均发生变化的实际观测情况; 二为视场不发生变化的理想情况; 另两项分别为仅存在视场大小变化和仅存在视场中心偏移的情况, 可用于进行敏感性分析。

模型的输入包括环境参数与观测几何信息两部分。环境参数为: 垄宽、垄间距、垄向、冠层高度等; 几何信息为: 视场角、太阳天顶与方位、观测天顶与方位、旋转基座与冠层顶之间高差、立杆高度、垂直观测时视场中心落点位置等(图 1)。

2.2 模型建立

2.2.1 视场的确定

首先, 由观测高度、视场角及观测天顶等确定视场的位置及大小。图 2 显示了视场角 25°、观测天顶角 0~60°、立杆高度 3 m, 旋转基座与冠层顶齐平时的视场变化情况。从图中可看出, 即便旋转基座与冠层顶齐平, 也存在视场变化现象, 变化程度由视场角、立杆高度以及旋转基座与冠层顶高差等参数共同决定。

其次是根据观测方位与垄向夹角计算垂直垄等效视场, 本文将通过视场中心并垂直于垄向的轴作为等效视场(图 3)。垂直垄等效视场半轴长(A)由(1)式得出:

$$A = \sqrt{\frac{a^2 b^2 (1 + k^2)}{b^2 + a^2 k^2}}$$

$$k = \tan(\Delta\phi + 90^\circ) \quad (1)$$

式中: a 和 b 分别为椭圆视场的长短半轴; k 为通过视场中心并垂直于垄向的直线斜率; $\Delta\phi$ 为观

测方位与垄向夹角。

最后是视场分解。根据视场中心位置与垄单元大小,对等效视场进行分解。将其分解为中部的整垄单元及两侧的剩余部分。整垄单元数 N 为:

$$N = \text{floor}[(A - y)/S] + \text{floor}[(A + y)/S] \quad (2)$$

式中:floor 表示取小于该值的最大整数; S 表示垄单元宽度; y 为偏移后视场中心在垄单元中的位置。

两侧剩余视场 y_1 与 y_2 分别为:

$$\begin{aligned} y_1 &= \text{Mod}[A + y, S] \\ y_2 &= \text{Mod}[A - y, S] \end{aligned} \quad (3)$$

式中:Mod 表示取余数。

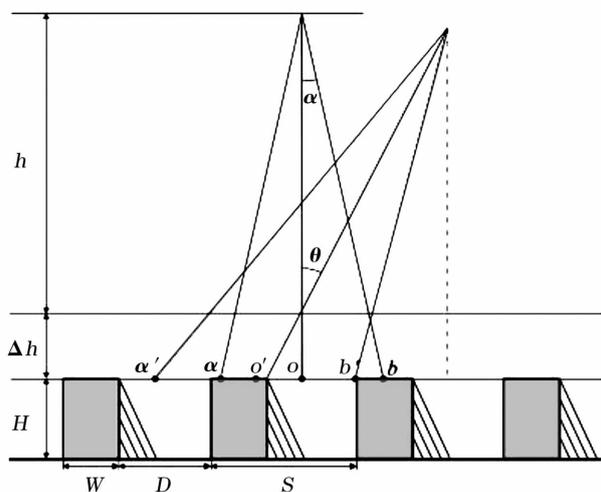


图1 行播作物地面多角度测量视场示意图

Fig.1 The footprint schematic diagram of ground-based multiangular measurement of row crop

W 为垄宽; D 为垄间距; S 为垄周期宽; H 为垄高; Δh 为旋转基座与冠层顶高差; h 为观测架立杆长度; θ 为观测天顶角; α 为传感器视场角的一半; ab 为垂直观测时视场范围; $a'b'$ 为倾斜观测时视场范围; o 为垂直观测时视场中心; o' 为倾斜观测时视场中心

2.2.2 双向投影长度

此部分继承 Kimes 模型中等效行角的思想,分别通过太阳与观测等效行角计算 2 个方向垄高的投影长度。等效行角 α 为:

$$\tan\alpha = \tan\theta \sin\Delta\phi \quad (4)$$

式中: θ 为太阳/观测天顶角; $\Delta\phi$ 为太阳/观测方位与垄向的夹角。

垄高在垂直垄方向上的投影长度 L 为:

$$L = H \cdot \tan\alpha \quad (5)$$

2.2.3 模型主体

视场及投影长度确定完毕,即进入模型主体设计阶段。

对于整垄单元,四组分的计算遵循 Kimes 模型。

考虑垂直观测,与太阳在垄的同侧、异侧共 10 种情况。对于剩余视场,根据其大小、垄宽、垄间距及投影长度等之间的关系,全面考虑可能发生的任何情况,共 51 种可能性。

综合考虑 3 部分视场内的四组分,得出实际视场内的四组分比例,通过给定的组分光谱或组分温度等信息,加权得到整个视场的冠层辐射信息。

3 模拟分析

本文选择 6 组典型的组分光谱(表 1),设定垄行结构参数为:垄宽 0.43 m,垄间距 0.57 m,垄高 1 m,此参数设置对应于黑河星一机一地大型遥感实验中垄行结构最为明显的玉米生长中期;此外,视场大小不同,误差的规律也存在差异,故本文选择了 4 种具有代表性的垂直观场大小,它们分别是垂直观场内包含的垄周期数为:0.5、1、1.5、2。根据以上的参数设置,模拟分析了实际观测与理想观测之间的相对均方根误差(RMSE):

$$RMSE = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \hat{x}_i}{\hat{x}_i} \right)^2} \quad (6)$$

式中: x_i 为实际视场内某组分比例或某波段冠层 BRF; \hat{x}_i 则为理想视场内相应的量,此处的理想视场为能够代表完整目标的基本单元,对于行播作物则为整垄周期; n 为参与比较的数量,此处指一个观测平面内观测天顶角的个数。

表 1 用于模拟计算的四组分光谱

Table 1 Four components spectra for simulation

| 四组分 | 设定的 6 组光谱(%) | | | | | |
|------|--------------|-----|------|-----|----|----|
| 光照植被 | 7 | 15 | 11 | 40 | 37 | 19 |
| 遮荫植被 | 0.84 | 1.5 | 0.88 | 3.6 | 8 | 4 |
| 光照土壤 | 10 | 15 | 28 | 30 | 32 | 38 |
| 遮荫土壤 | 1.2 | 1.5 | 2.24 | 2.7 | 6 | 7 |

3.1 BRF 误差与植被—土壤光谱对比度之间的关系

本节主要分析植被—土壤光谱反差对 BRF 误差的影响。首先经验地将植被与土壤的反射率比值设为 0.5 ~ 3.5 之间,将其 500 等分,通过设定的光照植被反射率算得光照土壤的反射率;相应的遮荫植被与遮荫土壤的反射率通过假设的天空光比例(20%)获取;将四组分光谱分别输入 FUA 和 Kimes 模型,二者的相对均方根误差与植被—土壤反射率比值之间的关系见图 4a。

由图 4a 可见,视场不确定性所造成的误差与组分光谱的对比度之间关系并不明显,尤其是垂直观

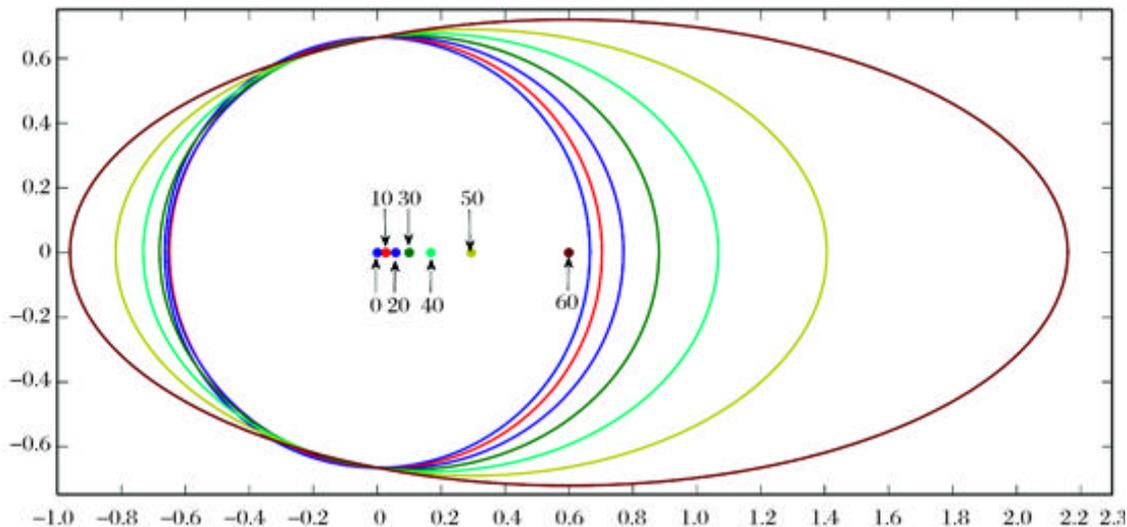


图 2 实际视场中心及大小变化图

Fig.2 Footprint changes with view zenith angle

图中,不同颜色的椭圆代表不同观测天顶角下的视场,相应颜色的点表示该视场的中心

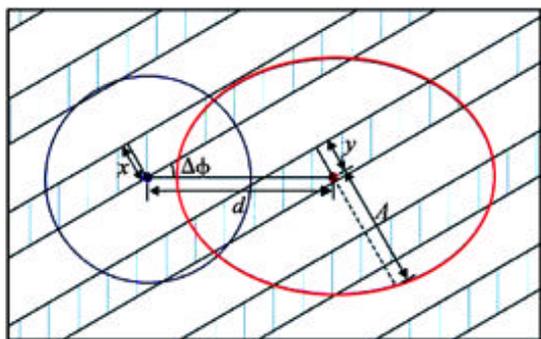


图 3 等效视场求算示意图

Fig.3 Computation of equivalent footprint

d 为视场中心偏移量, ϕ 为垂直观测时视场中心在茎单元中的位置, γ 为偏移后视场中心在茎单元中的位置; $\Delta\phi$ 为观测方位与茎向夹角, A 为垂直茎等效半轴长

场为整周期的情况;为非整周期的情况下,误差与植被—土壤光谱比值之间呈现很弱的正相关关系。各种观测情况下, RMSE 的标准偏差均在 1% 以内,相对于误差本身而言,可以忽略,故可以认为土壤—植被光谱反差对视场不确定性没有影响。

3.2 BRF 误差与观测天顶角之间的关系

每个观测角度视场造成的误差会存在差异。模型分析过程中,将观测天顶角设定为 $-70 \sim 70^\circ$, 5° 间隔,设定的观测平面为垂直茎观测,太阳垂直茎入射,太阳天顶角为 25° ,视场角为 25° ,垂直观测时视场中心为茎单元中心。由 3.1 节可知,BRF 误差与组分光谱对比度之间的关系甚微,故本节采取表 1 中 6 组光谱所得 BRF 误差的均值进行分析。

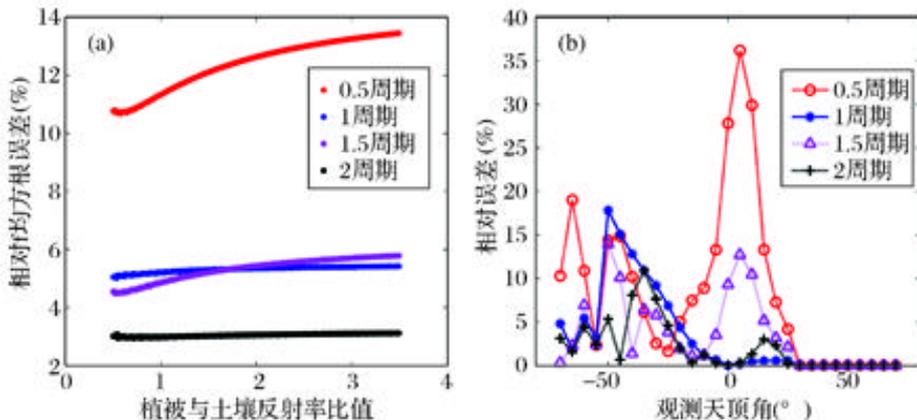


图 4 (a)BRF 误差与植被—土壤光谱对比度之间的关系;(b)BRF 误差与观测天顶角之间的关系

Fig.4 (a)Relationship between BRF error and the spectrum contrast of vegetation and soil;

(b)Relationship between BRF error and view zenith angle

由图 4b 可看出,各角度的 BRF 误差与观测天顶角的关系比较复杂,尤其是前向观测,其中垂直视场为非整周期的情况下,在近天顶观测角度误差较大;垂直视场为整周期时,误差主要体现在前向;后向观测在观测天顶角高于临界角度 β 后,误差为 0,这是因为根据上述的参数设定,观测等效行角高于此角度之后,视场内均为光照植被,故已不存在视场效应。该临界角度根据垄间距与垄高求得,即:

$$\tan\beta = \frac{D}{H} \quad (7)$$

式中: D 为垄间距; H 为垄高。本文 β 为 29.68° 。

需要指出的是,本节所得结论在同样观测几何条件下也适于其它垄行结构。

3.3 BRF 误差与各种观测条件之间的关系

本节模拟计算了各种观测条件下冠层 BRF 的误差。变化的观测条件包括:太阳位置,观测方位,

垂直观测时视场中心落点在垄单元中的位置等。

3.3.1 误差与太阳位置的关系

野外多角度观测过程中,光源的位置是持续变化的。了解误差与太阳位置之间的关系,能为选择最佳测量时间提供一定帮助。设定观测平面为垂直垄平面,视场角为 25° ,垂直观测时视场中心为垄单元中心。

图 5a 表明,仅变化太阳位置的情况下,若能保证垂直视场为 1 个垄周期以上,冠层 BRF 误差均可控制在 7% 以内;若垂直视场仅为 0.5 个垄周期,误差均为 12% 以上。误差随太阳行角有递增之势,但幅度很小,垂直视场大于 1 个垄周期,变化幅度可限于 1.5% 以内。由此可见,方向性地面观测过程中,视场的不确定性与太阳位置无显著相关关系。

3.3.2 误差与观测方位的关系

理想的多角度观测需要对半球空间进行全方位

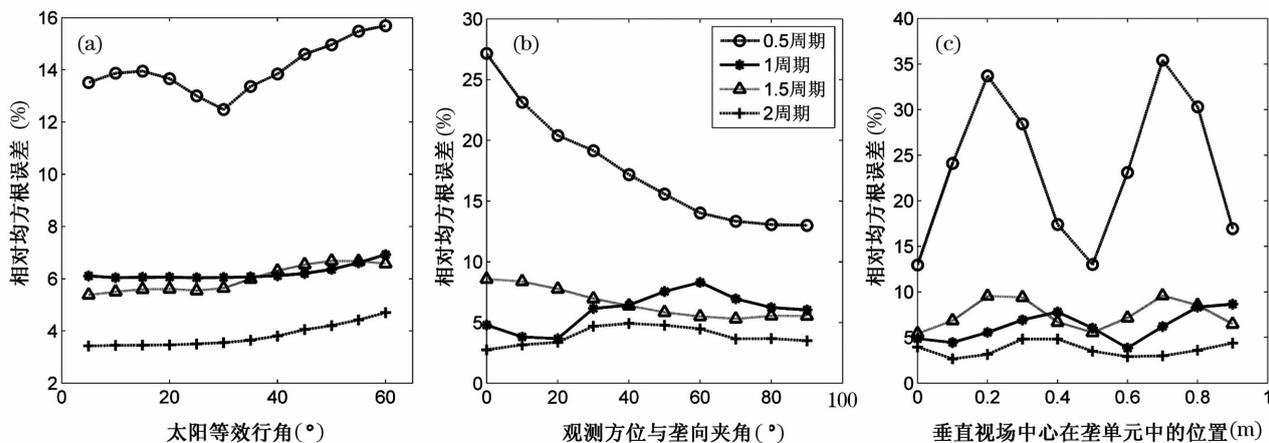


图 5 (a) 误差与太阳位置的关系; (b) 误差与观测方位的关系; (c) 误差与垂直视场中心位置的关系

Fig. 5 Relationship between BRF error and Sun row angle (a), and view azimuth angle (b), and nadir footprint center (c)

采样。而实际上,由于各种限制性因素的存在,全方位采样存在一定的困难。不同的观测方位,视场变化带来的误差可能存在区别。研究误差与观测方位之间的关系,可为实际测量过程中选择主要测量平面提供指导。设定太阳方位为垂直垄,太阳天顶为 25° ,视场角为 25° ,垂直观测时视场中心为垄单元中心。

从图 5b 可看出,垂直视场非整周期的情况下,误差随着观测方位与垄向的夹角单调递减。整周期的情况下,误差与观测方位之间的关系稍显复杂:若为 1 个整周期,最大误差出现在与垄向夹角为 60° 的观测平面;若为 2 个垄周期,误差在所有观测平面

均为最小且限于 5% 以内。此结论也适于其它垄行结构。

3.3.3 误差与垂直视场中心位置的关系

垂直观测视场中心落点的位置不同,视场内地物组分比例则随之变化,进而造成冠层 BRF 存在差异。一定观测条件下,了解误差与视场中心落点之间的关系,可为选择观测装置的架设位置提供一定的理论支持。将垄单元 10 等分,设定太阳与观测方位均为垂直垄,太阳天顶为 25° 。

图 5c 表明,误差与垂直视场中心位置之间的关系较为复杂。若垂直视场仅为 0.5 个垄周期,误差变化幅度较大;满 1 个周期后,误差表现出相对稳定

状态,变幅为5%以内。可见,实际测量过程中,需要根据垂直视场的大小,选择合适的视场中心落点。

此外,旋转基座与冠层顶高差(以下简称高差)以及传感器视场角(图1)也是造成视场变化的主要因素,对二者进行了类似分析后,得出的结论是:①垂直视场满1个茎周期后,仅改变高差,BRF误差变化幅度在3.5%以内;若仅含0.5个茎周期,此变化幅度可高达31.4%。可知,若可保证视场足够大,平台高差无需谨慎考虑。②垂直视场若为整周期,误差随视场角单调递增,但增幅并不显著。垂直视场为1个茎周期,45°与5°视场角对应误差差值为6.6%;2个茎周期,此差值降为3%。视场大小若为非整周期,误差与视场角之间未见明显关系。

总体而言,各种不同观测条件下误差特征表现出的一致性为:垂直视场不满1个茎周期,误差与各观测条件之间关系复杂,误差变化幅度较大;满1个茎周期,视场不确定性引起的BRF误差趋于稳定;若含2个整周期,BRF的误差可始终保持局部最小值(此处不排除视场更大,误差更小的可能性)。

3.4 误差与垂直视场大小之间的关系

本文还分析了各种观测条件下,垂直视场大小

为0.5~2.5个茎周期,组成视场的四组分比例及冠层BRF误差与垂直视场大小之间的关系(图6a~e)。因目前一般的多角度观测装置测量高度有限,故视场内含2.5个茎周期以上的情况不参与本文讨论。

图6a~e表明,无论如何变化观测条件(太阳位置、观测方位、垂直视场中心位置等),视场不确定性引起的误差与垂直视场大小之间基本呈现一致的关系。即,垂直视场不满1周期,误差较大;满1个整周期后,误差减小,虽有不同程度的波动,但基本可保持在一定范围内;在垂直视场满2个整周期时,误差接近局部极小值,均低于10%。从各幅图中还容易看出,垂直视场内含1个整周期,四组分比例及BRF的误差普遍低于1~2个周期之间的非整周期。

3.5 冠层BRF误差变化范围

基于以上较为细致全面的误差分析,综合各种观测条件下误差极值所对应的观测参数,计算相应组合条件下BRF误差的变化范围(图6f)。

图6f描述了6种组分光谱组合情况下(表1),BRF的平均相对均方根误差的极值范围。在垂直视场仅含0.5个茎周期的情况下,BRF误差极大值

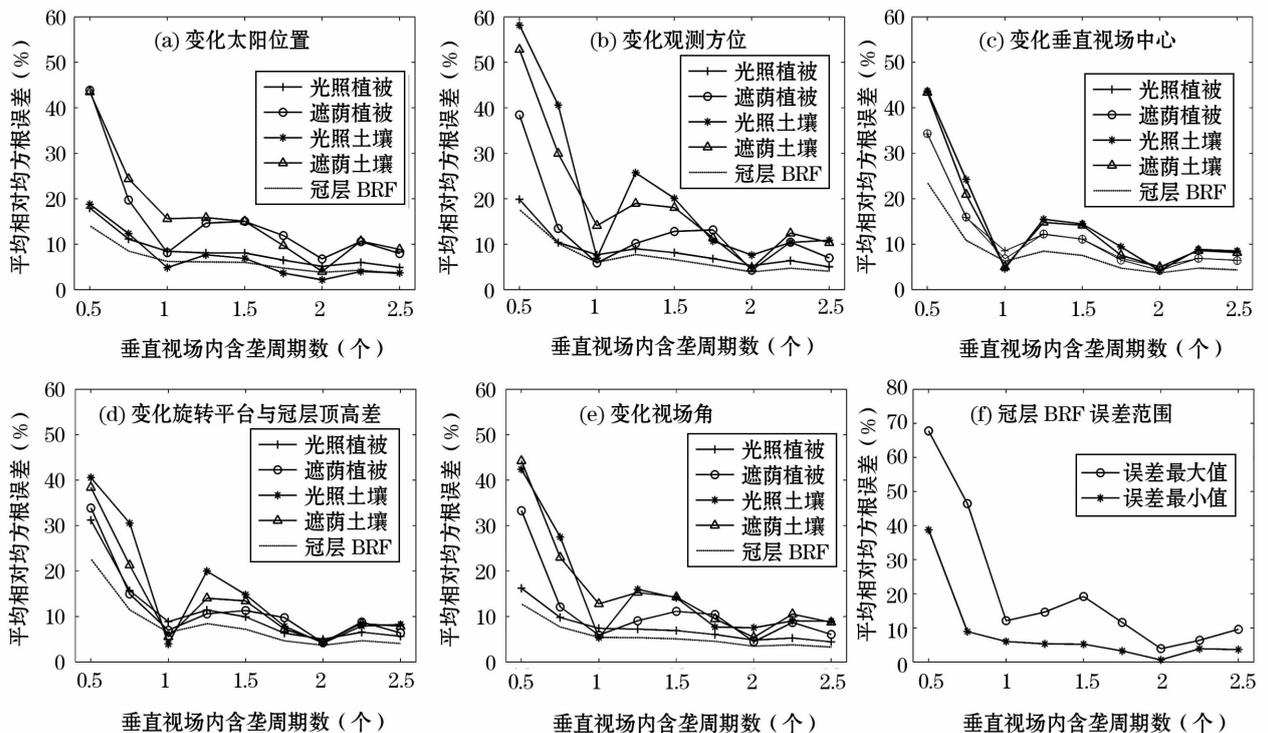


图6 四组分比例及BRF误差与垂直视场大小之间的关系图(a~e)及冠层BRF误差变化范围图(f)

Fig. 6 Error variation of four component proportions and BRF with nadir footprint size (a~e), and the BRF error range with nadir footprint size (f)

平均高达 67.8%, 部分情况甚至高达 80% 以上, 最小值也可达 38.7%; 一旦视场满 1 个整周期, 误差极大值急剧降至 20% 以下, 最小值可控制在 6% 以内。其中视场为 1 个整周期, 误差范围为 6% ~ 12%; 2 个整周期, 误差范围为 0.6% ~ 3.9%。与前述分析结果相一致, 垂直视场为 1 ~ 2 之间的非整周期, 误差极大值稍高于 1 个整周期。

综合以上分析结果, 认为在实际方向性测量过程中, 若受观测架高度所限而无法达到垂直视场内包含 2 个整周期的要求, 则可优先考虑垂直视场为 1 个整周期的情况。

4 模型对比验证

2008 年 5 ~ 7 月在甘肃黑河流域进行了星—机—地同步的大型遥感实验。针对盈科绿洲制种玉米的不同生长期, 采用便携式多角度观测架进行了多次地面光谱方向性观测实验。测量中采用的是美国 ASD 公司的便携式光谱仪, 探头由 5 m 光纤连接, 固定于观测架横杆末端; 两次观测的相关测量参数见表 2, 其中平台高度对应于图 1 中的 $H + \Delta h$; 平台与探头距离则对应图中的 h 。对于生长初期(5 月 30 日), 采取等效的垄结构参数: 垄宽 0.2 m, 垄间距 0.3 m, 垄高 0.4 m; 生长中期的垄结构参数见第 3 节引言。

表 2 黑河实验多角度测量相关参数

Table 2 Some parameters of field multiangular measurement in Heihe experiment

| 日期 | 测量时间 | 平台高度 (m) | 平台与探头 距离(m) | 视场角 (°) | 垄向 (°) |
|-------|-------------|-------------|----------------|------------|-----------|
| 5月30日 | 12:02-14:16 | 1.7 | 3 | 25 | 105 |
| 6月22日 | 11:35-12:26 | 1.5 | 3 | 25 | 110 |

鉴于难以获取准确的四组分光谱, 本文基于多元有约束非线性最优化函数 (fmincon), 分别将考虑视场的 FUA 模型和不考虑视场的 Kimes 模型, 与作物生长初期(5 月 30 日)和中期(6 月 22 日)的两组光谱方向性测量数据进行最优拟合, 并比较拟合效果。选择的 2 期均属于垄行结构比较分明的时期, 早期由于植株比较离散, 故采用等效垄宽和垄间距来代替实际的垄结构。由于两次测量中, 观测架的架设高度基本一致, 而垄行结构却因植被生长出现了较大差异, 致使 5 月 30 日垂直观测视场内包含 2 个整周期以上; 而 6 月 22 日仅包含 0.8 个整周期, 形成鲜明对比。由于模型无法考虑多次散射影响,

故在多次散射作用明显的近红外波段与实测数据出现较大分歧, 加之模型也无法准确描述顺垄观测, 故本文在比较过程中, 仅针对可见光波段和主平面、垂直主平面以及垂直垄 3 个平面的观测, 对比结果见图 7。

图 7 表明, 在垂直视场内包含整周期较多的生长初期(5 月 30 日), 2 个模型的拟合程度相当, 几乎不存在视场不确定性问题; 而在垂直视场内仅包含 0.8 个整周期的生长中期(6 月 22 日), 考虑视场的本文模型与实测数据能够更好地拟合, 尤其是在接近天顶的观测角度, 这是因为模型在较大观测天顶角下视场内地物将因未考虑孔隙率而变得单一, 导致与实测数据分歧明显。2 个模型与实测数据之间的相对均方根误差 (RMSE) 见表 3。

表 3 模型与实测数据之间的相对均方根误差

(括号内为观测天顶角范围)

Table 3 Relative RMSE between models and observation data (The range of view zenith angle is in the parentheses)

| RMSE (%) | 早期(-50° ~ 50°) | | 中期(-60° ~ 60°) | | 中期(-20° ~ 20°) | |
|-------------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|
| | FUA | Kimes | FUA | Kimes | FUA | Kimes |
| 主平面 | 5.62 | 5.71 | 5.64 | 13.56 | 5.87 | 10.58 |
| 垂直主平面 | 2.17 | 2.38 | 18.37 | 19.72 | 8.07 | 12.36 |
| 垂直垄平面 | 3.91 | 4.09 | 21.02 | 22.66 | 9.03 | 16.9 |

5 结论与讨论

地面多角度测量视场不确定性问题备受关注, 但对其进行系统定量地分析还较缺乏。本文在 Kimes 模型的基础上, 引入等效视场及视场分解算法, 建立了地面方向性测量视场不确定性分析模型, 并对组成视场的四组分及冠层 BRF 误差进行了较为全面细致地模拟分析。分析结果简述如下:

(1) 视场不确定性所造成的误差与组分光谱的对比度之间关系并不明显, 尤其是垂直视场为整周期的情况下。

(2) 各角度的 BRF 误差与观测天顶角的关系比较复杂, 前向观测尤为明显。

(3) 垂直视场不满 1 个整周期, BRF 误差与各观测条件之间的关系较为复杂, 变化幅度也较大; 满 1 个整周期, 各种观测条件下冠层 BRF 的误差及其变化幅度均较小, 若含 2 个整周期, BRF 的误差可始终保持局部最小值。

(4) 所有观测条件下, 四组分比例及 BRF 误差与垂直视场大小之间呈现较为一致的关系。垂直视场满 1 个整周期后, 误差达相对稳定状态; 满 2 个整

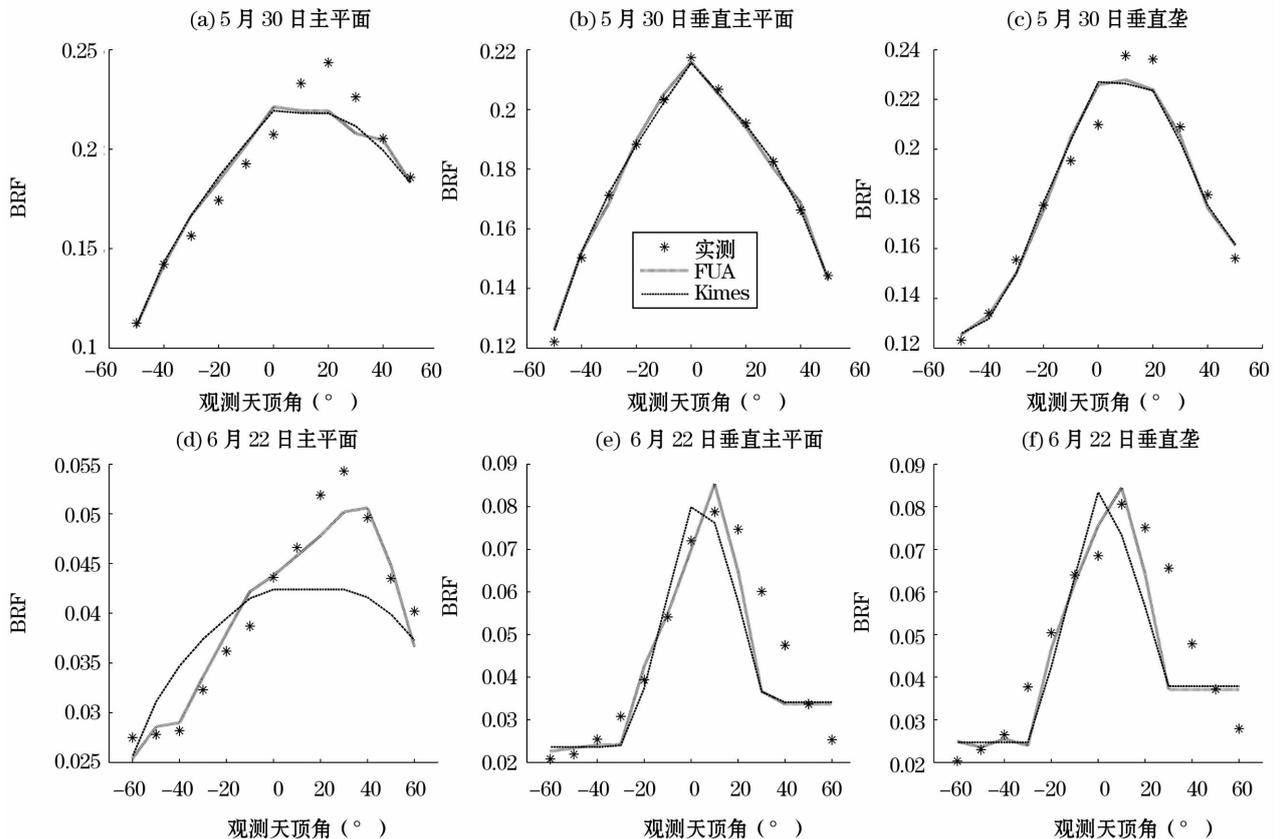


图7 5月30日和6月22日3个平面两个模型与实测数据的对比

Fig. 7 Comparison of two models with measurement data in three observation planes of two growth stages

周期时,误差分别接近局部最小值。

(5) 垂直视场内若仅含0.5个垄周期,BRF误差最大值一般可高达67.8%,最小值亦可达38.7%;满1个垄周期后,BRF误差极大值急剧降至20%以下,最小值可控制在6%以内。其中垂直视场为1个整周期,误差范围为6%~12%;2个整周期,误差范围为0.6%~3.9%。

(6) 垂直视场为1~2个垄周期之间的非整周期,四组分比例及冠层BRF误差总体上均稍高于1个整周期,故建议在实际测量过程中,测量高度若无法满足垂直视场为2个垄周期的要求,则可优先考虑1个整周期的情况。

(7) 与实测数据的对比验证分析表明,在垂直视场内包含2个垄周期以上的生长初期,方向性测量无需考虑视场效应;若垂直视场内不足一个垄周期,则有必要考虑视场的不确定性。

以上结论表明了复杂结构地表方向性测量视场不确定性研究的必要性。若引入较为精确的组分光谱或组分温度,该模型可直接应用于多角度可见光及热红外地面观测误差分析领域。由于本文仍对大

视场角锥形观测采用平行处理,不可避免造成误差;但通过等效视场及视场分解法对地面多角度测量视场不确定性进行分析的思路可推广到锥形视场的不确定性分析。此外,模型尚未考虑孔隙率问题,用于真实行播作物可能存在一定的不合理性。

参考文献 (References):

- [1] Sandmeier S R. Acquisition of bidirectional reflectance factor data with field goniometers[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 73(3): 257-269.
- [2] Schopfer J, Dangel S, Kneubuhler M, et al. The improved dual-view field goniometer system FIGOS [J]. *Sensors*, 2008, 8: 5120-5140.
- [3] Coburn C A, Peddle D R. A low-cost field and laboratory goniometer system for estimating hyperspectral bidirectional reflectance [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2006, 32(3): 244-253.
- [4] Bourgeois C S, Ohmura A, Schroff K. IAC ETH Goniospectrometer a tool for hyperspectral HDRF measurements [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2006, 23: 573-583.
- [5] Bruegge C J, Helmlinger M C, Conel J E, et al. PARABOLA III: A sphere scanning radiometer for field determination of surface

- anisotropic reflectance functions [J]. *Remote Sensing Reviews*, 2000, 19: 75-94.
- [6] Sandmeier S R, Itten K I. A field goniometer system for acquisition of hyperspectral BRDF data[J]. *IEEE Transactions on Geo-Science and Remote Sensing*, 1999, 37(2): 978-986.
- [7] Kimes D S. Remote sensing of row crop structure and component temperatures using directional radiometric temperatures and inversion techniques[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1983, 13(1): 33-55.
- [8] Lagouarde J P, Kerr Y H, Brunet Y. An experimental study of angular effects on surface temperature for various plant canopies and bare soils[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 77(3/4): 167-190.
- [9] Yu Tao, Gu Xingfa, Tian Guoliang, et al. Analyzing the errors caused by FOV effect on the ground observation of directional brightness temperature over a row structured canopy[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(5): 443-450. [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[J]. 遥感学报, 2004, 8(5): 443-450.]
- [10] Li Li, Qiao Yanli, Gu Xingfa, et al. Field of view effect on the remote sensing field radiometric measurements[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(5): 676-682. [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[J]. 遥感学报, 2006, 10(5): 676-682.]
- [11] Jackson R D, Reginato R J, Jr Pinter P J, et al. Plant canopy information extraction from composite scene reflectance of row crops[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(22): 3 775-3 782.
- [12] Verbrugge M, Cierniewski J. Effects of Sun and view geometries on cotton bidirectional reflectance test of a geometrical model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 54(3): 189-197.
- [13] Chen Liangfu, Liu Qinhuo, Fan Wenjie, et al. A bi-directional gap model for simulating the directional thermal radiance of row crops[J]. *Science in China(Series D)*, 2002, 32(4): 290-298. [陈良富, 柳钦火, 范闻捷, 等. 行播作物热辐射方向性孔隙率模型[J]. 中国科学:D辑, 2002, 32(4): 290-298.]
- [14] Yan Guangjian, Jiang Lingmei, Wang Jindi, et al. Thermal bidirectional gap probability model for row crop canopies and validation[J]. *Science in China(Series D)*, 2002, 32(10): 857-863. [阎广建, 蒋玲梅, 王锦地, 等. 行播作物热辐射双向孔隙率模型及验证[J]. 中国科学:D辑, 2002, 32(10): 857-863.]
- [15] Yu Tao, Gu Xingfa, Tian Guoliang, et al. Modeling directional brightness temperature over a maize canopy in row structure[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(1): 15-20. [余涛, 顾行发, 田国良, 等. 垄行结构玉米冠层方向亮温模型研究[J]. 遥感学报, 2006, 10(1): 15-20.]
- [16] Du Yongming. A study of seasonal variation and models of directional thermal radiance over row-planted winter wheat canopy [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Science, 2006. [杜永明. 冬小麦冠层方向性热辐射的季相变化和模型研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2006.]

Footprint Uncertainty Analysis for Ground-based Multiangular Measurement of Row Crops

CHEN Ling, YAN Guangjian, LI Jing, YU Yingjie
(State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography,
Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Row crop can be classified between homogeneous and heterogeneous canopy due to its own special geometric characteristics. The footprint uncertainty problem of this kind of canopy should not be neglected in the field directional measurement. This study introduces an equivalent footprint of sensor's field of view into the original Kimes model and develops a footprint uncertainty analysis model for multiangular in situ measurements of row crops through disassembling the equivalent footprint. Both the influences of footprint uncertainty on the four component proportions (*i. e.* the proportion of sunlit and shaded vegetation, and sunlit and shaded soil) and canopy BRF have been analyzed: ①BRF error is nearly independent of the spectral contrast between vegetation and soil. ②The relationship between BRF error and view zenith angle is very complicated with the forward observation worse than the backward. ③Both the errors of four component proportions and canopy BRF keep relatively small and steady after the nadir footprint reaches more than 1 row period. When the nadir footprint is 2 row periods, both the errors arrive at local minimum. Here the 'local' means the error might be smaller when the nadir footprint contains more than 2.5 row periods which is beyond the discussion of this study. ④The relative mean error range of BRF is 38.7% ~ 67.8% when the nadir footprint contains only half row period. This range changes into 6% ~ 12% and 0.6% ~

3.9% when the nadir footprint contains 1 and 2 row periods respectively. ⑤ Errors are somewhat higher when the nadir footprint contains non-integral period which is between 1 and 2 row periods than it contains just 1 period. So considering the one period situation before the nadir footprint reached 2 periods in the field experiment is the suggestion. This study also compares the proposed and the original Kimes model to the field directional observation of corn canopy in the Heihe River basin based on a multivariate constrained nonlinear optimization technique. The results are consistent with the simulation conclusions above, which include that the footprint uncertainty problem can be ignored when the nadir footprint reached more than 2 row periods and it's necessary to consider the problem if the nadir footprint contains less than 1 period.

Key words: Row crop; Footprint uncertainty analysis model; Canopy BRDF; Row period; Error.

《地球科学进展》杂志广告参考价目表

| 黑白(文字、照片) | | 彩色(文字、照片) | |
|------------|-------------|------------|-------------|
| 封二、封三 | 价格(元) | 封二、封三 | 价格(元) |
| 纯文字 | 1500 ~ 2000 | 纯文字 | 3500 ~ 4000 |
| 文字加照片 | 2500 ~ 3000 | 文字加照片 | 4500 ~ 5000 |
| 封四(含文字、照片) | 2000 ~ 2500 | 封四(含文字、照片) | 5000 ~ 6000 |
| 1/2 版面 | 价格减半 | 1/2 版面 | 2500 ~ 3000 |
| 1/3 版面 | 价格的 1/3 | 1/3 版面 | 1500 ~ 2000 |
| 1/4 版面 | 价格的 1/4 | 1/4 版面 | 1000 ~ 1500 |
| 插页(正反两版) | 3000 ~ 4000 | 插页(正反两版) | 6000 ~ 8000 |

注:(1)客户如果长期合作,可以给予 15% ~ 20% 的优惠(需签定合作意向)。

(2)本刊与客户之间可根据广告的难易程度协商确定价格。

(3)其他相关事项可协商确定。

(4)1/2、1/3、1/4 版面的纯文字宣传,只做插页广告。

联系电话:0931-4968256 E-mail: adearth@lzb.ac.cn