

# 一种顾及观测视场的行播作物热辐射方向性模型

李坤<sup>1,2</sup>, 钱永刚<sup>1\*</sup>, 王宁<sup>1\*</sup>, 马灵玲<sup>1</sup>, 邱实<sup>1</sup>, 李传荣<sup>1</sup>, 唐伶俐<sup>1</sup>, 陈志明<sup>3</sup>, 王国珠<sup>3</sup>

(1. 中国科学院光电研究院 中国科学院定量遥感信息技术重点实验室 北京 100094;

2. 中国科学院大学 北京 100049;

3. 内蒙古北方重工业集团有限公司 内蒙古 包头 014033)

**摘要:** 热辐射方向性是热红外遥感反演和产品真实性检验中的关键问题之一. 针对行播作物, 构建了一个综合考虑光照植被/阴影植被、光照土壤/阴影土壤、植被-土壤多次散射和观测视场多影响因素的行播作物热辐射方向性模型, 并详细分析模型精度以及模型对 LAI、冠层结构等参数的敏感性. 结果表明, 该模型不仅能够很好体现出行播结构热辐射特性和热点效应, 而且适用于连续作物热辐射特性模拟; 与现有 FRA97 模型和 FovMod 模型对比一致性良好, 均方根误差分别为 0.18 K 和 0.36 K.

**关键词:** 观测视场; 行播作物; 热辐射; 方向性

中图分类号: TP722.5 文献标识码: A

## A directional thermal radiance model for row crop canopy impact of sensor footprint

LI Kun<sup>1,2</sup>, QIAN Yong-Gang<sup>1\*</sup>, WANG Ning<sup>1\*</sup>, MA Ling-Ling<sup>1</sup>, QIU Shi<sup>1</sup>,  
LI Chuan-Rong<sup>1</sup>, TANG Ling-Li<sup>1</sup>, CHEN Zhi-Ming<sup>3</sup>, WANG Guo-Zhu<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing Information Technology,  
Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Inner Mongolia North Heavy Industries Group Co. Ltd, Baotou 014033, China)

**Abstract:** The direction of thermal radiance is one of the key problems in thermal infrared remote sensing retrieval and product validation. Aiming at row crop, a directional thermal radiance model is built by considering the sunlit/shaded leaf, sunlit/shaded soil, multiple scattering and field of view. The accuracy and sensitivity of the model are discussed and the results show that the model can not only explain the row crop structure and hot spot effect well, but also be suitable for simulating the thermal radiance of continuous canopy. Compared with the FRA97 and the FovMod model, the directional distributions of directional brightness temperature are in good agreement. The root mean square error is 0.18 K and 0.36 K respectively.

**Key words:** sensor footprint, row crop, thermal radiance, directionality

**PACS:** 44.40.+a

## 引言

在热红外遥感观测中, 由于太阳辐射、地物物理

化学属性、地表分布及结构等原因, 不同传感器视场和观测角度下获取的热辐射存在明显的方向性特征<sup>[1]</sup>, 研究热辐射方向特性将会对热红外遥感地表

收稿日期: 2018-01-10 修回日期: 2018-02-14

Received date: 2018-01-10 revised date: 2018-02-14

基金项目: 国家 863 计划(2014AA123201); 国家重点研发专项(2016YFB0500402); 中科院先导项目(XDA13030402); 青年创新促进会

**Foundation items:** Supported by National High Technology Research and Development Program of China under Grants 2014AA123201, National Key Research and Development Program of China (2016YFB0500402), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences under Grant XDA13030402, and Youth Innovation Promotion Association CAS

作者简介(Biography): 李坤(1992-), 男, 河北献县人, 硕士研究生, 主要研究领域为热红外温度反演与热辐射方向性. E-mail: 1476783428@qq.com

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: qianyg@aoe.ac.cn, wangning@aoe.ac.cn

温度定量反演、温度产品的角度归一化处理以及后续产品的定量化应用产生重要意义<sup>[2-3]</sup>。早在 1991 年 Labeled 等人通过实验室测量指出土壤等单一目标的比辐射率存在方向性<sup>[4]</sup>；Sobrino 和 Cuenca (1999) 进一步对土壤、水以及均匀草地等地物进行热辐射方向性研究<sup>[5-6]</sup>；Lagouarde 等 (2000) ,Chehbouni 等 (2001) 随后对冠层及混合像元开展了热辐射方向性研究,指出由观测角度引起的方向亮温差异可达 4 K 或以上<sup>[7-8]</sup>。这种热辐射方向性的存在给精确的定量产品反演以及可靠的产品真实性检验等都带来了严重的问题,而热辐射方向性建模也成为国内外学者们重点探索的方向。其中,行播作物由于其复杂的三维几何结构成为了热辐射方向性领域的重点研究对象。Kimes 等 (1983) 将作物的行结构看作矩形截面来计算光线穿过冠层的几何光学路径<sup>[9]</sup>；陈良富等 (2002) 在 Kimes 模型基础上根据离散植被的孔隙率模型和连续植被的交相关概率思想,建立了考虑热点效应的行结构孔隙率模型<sup>[10]</sup>；刘强等 (2003) 在 Verhoef (1984) 提出的适用于可见光-近红外的 SAIL (scattering by arbitrarily inclined leaves) 模型基础上,加入了植被和土壤组分的热辐射,利用原有的计算各层上行和下行辐射的方法把 SAIL 模型扩展到了热红外领域<sup>[11]</sup>。辐射传输模型具有明确的物理过程,但是模型输入条件众多,计算过程繁琐、迭代次数多、效率较低,难以实际应用<sup>[12]</sup>。François 等 (1997) 在辐射传输模型基础上发展了一种解析式参数化模型 (FRA97 模型),利用方向间隙率刻画土壤在观测角度上的比例,并引入“cavity”效应因子描述冠层内部植被间的多次散射<sup>[13]</sup>；任华忠等 (2013) 在 FRA97 等模型基础上,针对行播作物提出了一个考虑光照土壤、阴影土壤、植被三组分以及视场效应的参数化 FovMod 模型<sup>[14]</sup>,但该模型忽略了光照植被与阴影植被的区别,省略了多次散射影响。这些参数化模型简化了辐射传输模型中复杂的计算过程,但是一定程度上也影响了模拟精度。

目前研究者们提出的热辐射方向性参数化模型还存在以下不足：(1) 普遍认为光照植被与阴影植被温度差异不大；(2) 大多未考虑多次散射贡献；(3) 很少考虑实际传感器成像视场影响,仅利用单个光线的追踪方式,难以实现视场内部精确的组分计算。针对上述不足,本文从优化现有模型入手,构建一个具有更符合实际物理过程的、并能考虑实际传感器观测视场的行播作物热辐射方向性参数化

模型。

## 1 算法原理

### 1.1 模型概述

上文指出 FRA97 模型将连续作物冠层热辐射简单表示为植被热辐射和土壤热辐射两种组分之和,忽略了阴影和光照的差异性；FovMod 模型基于 FRA97 模型,将行播作物分为植被、光照土壤和阴影土壤三个组分,忽略了光照植被和阴影植被的温度差异以及土壤-植被间多次散射影响。

在上述研究基础上,针对行播作物构建了一种综合考虑观测视场、多次散射影响的热辐射方向性四组分参数化模型。该模型将地表类型细分为光照植被、阴影植被、光照土壤、阴影土壤四个组分；并针对现有模型鲜有考虑视场效应这一问题,采用视场聚合方法获取视场范围内四组分热辐射；此外,考虑了植被与土壤之间的多次散射。模型表达式可写为：

$$L(DBT) = \oint_{FOV} [P_{sun\_leaf} \cdot L(BT_{sun\_leaf}) + P_{shd\_leaf} \cdot L(BT_{shd\_leaf}) + P_{sun\_soil} \cdot L(BT_{sun\_soil}) + P_{shd\_soil} \cdot L(BT_{shd\_soil})] + L_{multi} \quad (1)$$

式(1)中  $L(DBT)$  为冠层方向性热辐射； $DBT$  为传感器观测亮温； $BT_{sun\_leaf}$ 、 $BT_{shd\_leaf}$ 、 $BT_{sun\_soil}$ 、 $BT_{shd\_soil}$  分别是光照植被、阴影植被、光照土壤、阴影土壤四组分的温度； $P_{sun\_leaf}$ 、 $P_{shd\_leaf}$ 、 $P_{sun\_soil}$ 、 $P_{shd\_soil}$  是上述四个组分在视场中所占比例； $FOV$  为传感器视场角大小； $\oint_{FOV}$  表示单个视场范围内的光线能量聚合； $L_{multi}$  是冠层多次散射辐射。

针对上述热辐射方向性四组分参数化模型,下文将重点针对四组分热辐射、视场聚合及多次散射的计算方法等进行详细描述。

### 1.2 基于光线跟踪的四组分热辐射估算

#### 1.2.1 四组分比例计算

该研究采用光线跟踪原理,结合双向间隙率模型,对四组分热辐射参数化表达式进行推导。间隙率是一束光线不受阻碍穿过冠层的概率,可以表示为有效光路径的函数。假定行播作物冠层为矩形结构,且水平分布均匀,并规定一垄作物和一垄裸土为一个垄周期,光线在作物冠层中通过的路径距离  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$  之和即为有效光路径,可以看出有效光路径  $l$  与行播作物的冠层宽度 ( $W$ )、冠层垄间距 ( $Wp$ )、冠层高度 ( $H$ ) 直接相关 (图 1),此外还与冠层垄方向

( $\phi_i L$ )、光线入射位置 A ( $X_m, H$ ) 和入射角度、作物垄的叶面积指数 (LAI) 等参数有关。

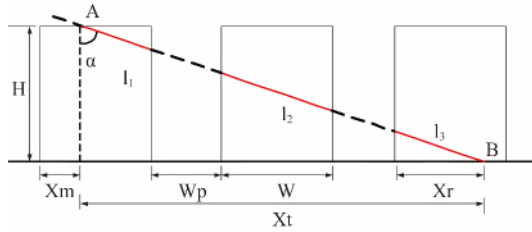


图1 行播作物光线传输示意图  
Fig.1 The diagram of light passing through the row crop canopy

(1) 光照土壤与阴影土壤组分比例计算

假设视线从 A 处射入冠层, 视线方向有效光路径为  $l_{view}$ , 传感器观测方向上的土壤概率就为视线穿过冠层不被遮挡而到达土壤的概率  $P_{soil}$ :

$$P_{soil} = P_{gap}(l_{view}) \quad (2)$$

其中  $P_{gap}(l_{view})$  是视线方向有效光路径为  $l_{view}$  的间隙率, 表达式为:

$$P_{gap}(l_{view}) = \exp(-\tau \cdot l_{view} \cdot FAVD) \quad (3)$$

式(3)中  $\tau$  表示消光系数,  $FAVD$  指作物垄的叶面积体密度,  $FAVD = LAI/H$ .

反之, 视线被遮挡, 传感器观测方向上的植被概率  $P_{leaf}$  为:

$$P_{leaf} = 1 - P_{gap}(l_{view}) \quad (4)$$

光照土壤概率需要考虑太阳和观测两个方向的影响, 基于 Kuusk 提出的双向间隙率指数模型<sup>[15]</sup>, 光照土壤的比例  $P_{sun\_soil}$  为:

$$P_{sun\_soil} = P_{gap}(l_{view}) \cdot P_{gap}(l_{sun}) Ht = \exp\left[-\tau\left(l_{view} + l_{sun} - \frac{1 - \exp(-m \cdot l_{sv})}{m \cdot l_{sv}} \sqrt{l_{view} \cdot l_{sun}}\right) \cdot FAVD\right] \quad (5)$$

式(4)中,  $m = 1/s$ ,  $s$  为植被线性尺寸参数,  $Ht$  为双向函数, 用来表征热点效应.  $l_{sv}$  为太阳方向和观测方向的有效路径长度之差, 可由有效光路径长度和天顶角与方位角得到:

$$l_{sv} = |\vec{l}_{sun} - \vec{l}_{view}| = \sqrt{l_{sun}^2 + l_{view}^2 - 2l_{sun}l_{view}\cos\xi}$$
$$\cos\xi = \cos\theta_{sun}\cos\theta_{view} + \sin\theta_{sun}\sin\theta_{view}\cos(\varphi_{view} - \varphi_{sun}) \quad (6)$$

在得到光照土壤比例后, 阴影土壤比例  $P_{shd\_soil}$  可表示为:

$$P_{shd\_soil} = P_{soil} - P_{sun\_soil}$$

$$= P_{gap}(l_{view}) - P_{gap}(l_{view}) \cdot P_{gap}(l_{sun}) \cdot Ht \quad (7)$$

(2) 光照植被与阴影植被组分比例计算

针对光照植被, 假设冠层由一系列水平均匀层叠加而成, 观测方向光线入射深度为  $h_i$  层 ( $0 < h_i < H$ , 冠层顶为 0, 垂直向下为正) 时被植被遮挡 (图 2), 此时观测方向有效光路径为  $l_{view}(h_i)$ , 太阳方向的总有效光路径为  $l_{sun}(h_i)$ , 该层处观测到光照植被的概率  $P_{ci}$  为:

$$P_{ci} = [P_{gap}(l_{view}(h_{i-1})) - P_{gap}(l_{view}(h_i))] \cdot P_{gap}(l_{sun}(h_i)) \cdot Ht \quad (8)$$

该式的含义为: 第  $h_i$  层观测到光照植被的概率  $P_{ci}$  等于视线穿过  $h_{i-1}$  层但不穿过  $h_i$  层即看到  $h_i$  层植被的概率  $P_{gap}(l_{view}(h_{i-1})) - P_{gap}(l_{view}(h_i))$  乘上从该层出发穿过  $h_i$  层植被看到太阳即该处植被被照亮的概率  $P_{gap}(l_{sun}(h_i))$ , 再乘上双向函数  $Ht$ .

若将该段垄结构冠层分为  $num\_c$  层, 按上述方法分层求解光照植被的概率, 该段垄结构冠层的光照植被概率可通过求和得到. 由于视线射入冠层后可能穿过多个垄结构, 这些垄结构可以分为两类: (a) 视线从冠层顶部射入; (b) 视线从冠层侧方射入. 光线穿过冠层的整个过程必然是若干个侧方射入情况和一个或零个顶部射入情况的组合, 对每一段垄结构进行求解加和即可得到视线观测整个冠层下光照植被的概率:

$$P_{sun\_leaf} = \sum_n \sum_{i=1}^{num\_c} P_{ci} \quad (9)$$

式(9)中,  $n$  表示视线射入冠层后穿过的垄结构个数.

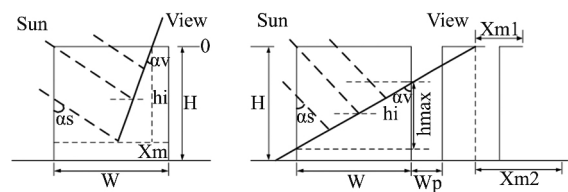


图2 视线与光线在冠层深度  $h_i$  层交汇示意图 (a) 视线从冠层顶部射入 (b) 视线从冠层侧方射入  
Fig.2 Lights in the viewing and solar directions collide at the  $h_i$  floor of the row crop canopy (a) sights from the top of the canopy (b) sights from the side of the canopy

相应的阴影植被的概率  $P_{shd\_leaf}$  可表示为:

$$P_{shd\_leaf} = P_{leaf} - P_{sun\_leaf} \quad (10)$$

1.2.2 考虑观测视场的四组分热辐射计算

传感器对目标进行观测时, 其观测视场一般可

视为椭圆形状<sup>[14]</sup>(图3):

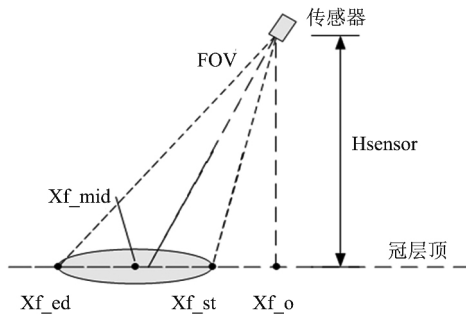


图3 传感器视场示意图  
Fig.3 The diagram of sensor's footprint

将椭圆视场的长轴等分为多段(记为  $num\_f$ ), 并按照行播作物冠层垄方向延伸, 将整个椭圆视场分为  $num\_f$  个等宽度的矩形(图4(a)和图4(b)), 对于每个矩形结构根据 1.2.1 节计算四组分比例, 将每个矩形的面积  $S_i$  作为权重计算整个视场的四组分方向性热辐射:

$$L_j = \iint_{FOV} [P_j \cdot L(BT_j)] = \left( \sum_{i=1}^{num\_f} S_i \cdot P_{j,i} \right) / \left( \sum_{i=1}^{num\_f} S_i \right) \cdot L(BT_j) \quad (11)$$

式(11)中  $j$  代表四组分中某一组分,  $L_j$  为视场内该组分方向性热辐射;  $P_{j,i}$  为该组分在第  $i$  个矩形中的比例;  $S_i$  为第  $i$  个矩形的面积;  $L(BT_j)$  为由普朗克函数计算得到的该组分热辐射.

需要注意的是, 在接近顺垄观测时, 需采用椭圆视场的短轴来等分视场, 避免按长轴等分视场后的矩形无法覆盖整个椭圆视场的情况(图4(c)).

### 1.3 植被-土壤多次散射计算

FRA97 模型中只包含了植被内部多次散射和土壤对植被热辐射的多次散射影响<sup>[13]</sup>, 忽视了植被对土壤热辐射的多次散射. 因此, 本文对植被-土壤多次散射  $L_{multi}$  进行了完善, 综合考虑了植被内部、土壤对植被、植被对土壤三方面的多次散射, 计算公式可写为:

$$L_{multi} = \underbrace{\sigma_f \cdot b(\theta) \cdot L_{leaf}(1 - \varepsilon_g)}_{\text{土壤对植被热辐射的单次散射项}} + \underbrace{(1 - \alpha) [1 - b(\theta)(1 - \sigma_f)] \cdot [1 - b(\theta)](1 - \varepsilon_v) \cdot L_{leaf}}_{\text{植被内部多次散射项}}$$

表1 模型主要参数设置情况

Table 1 The main variables of the model

VAA	VZA	SAA	SZA	W/m	Wp/m	H/m	phi_L	LAI	num_c	FOV	Hsensor	Xf_o	num_f	BT <sub>sun_soil</sub>	BT <sub>shd_soil</sub>	BT <sub>sun_leaf</sub>	BT <sub>shd_leaf</sub>
/ (°)	/ (°)	/ (°)	/ (°)				/ (°)		/层	/ (°)	/m	/m	/段	/K	/K	/K	/K
0:30:330	0:10:60	270	30	0.3	0.3	0.3	0	1.0	30	6	1	0.15	30	320	315	305	303

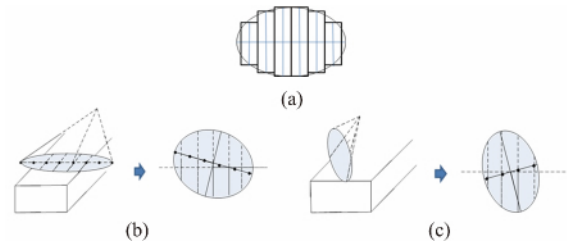


图4 传感器视场分割示意图 (a) 等宽度分割 (b) 按长轴分割 (c) 按短轴分割  
Fig.4 Segmentation of sensor's footprint (a) segmentation by same width (b) segmentation by long axis (c) segmentation by short axis

$$+ \frac{(1 - \alpha) \cdot \sigma_f(1 - \varepsilon_v) \cdot L_{leaf} \cdot [1 - b(\theta)(1 - \sigma_f)] \cdot [1 - b(\theta)]}{\text{新增的植被对土壤热辐射的多次散射项}}$$

$$= \sigma_f \cdot b(\theta) \cdot L_{leaf}(1 - \varepsilon_g) + (1 - \alpha) [1 - b(\theta)(1 - \sigma_f)] \cdot [1 - b(\theta)](1 - \varepsilon_v) \cdot (L_{leaf} + \sigma_f L_{soil}) \quad (12)$$

式(12)中  $\alpha$  为“cavity”效应因子<sup>[13-14]</sup>,  $\varepsilon_v$  与  $\varepsilon_g$  分别表示土壤和植被的发射率,  $L_{leaf}$  和  $L_{soil}$  表示植被热辐射和土壤热辐射;  $b(\theta)$  为植被的方向性间隙率,  $\sigma_f$  为半球遮挡率.

## 2 模拟结果与模型参数敏感性分析

### 2.1 模型模拟结果

热辐射方向性模型输入参数设置详见表1所示:

图5给出了在初始参数设置下, 不同 LAI (1.0, 4.0)、不同观测视场(6°, 44°)下方向性亮温分布情况. 从整体来看, 传感器视场越小, 地面投影范围越小, 越能较好地模拟出行播作物的结构特征(图5a、5d); 较大的视场角由于其地面投影范围内包含多个行播垄结构, 传感器观测值是多个垄结构的综合反映, 模拟结果没有明显的垄结构效应(图5b、5e); 在不同 LAI 下, 太阳主平面方向都可以观测到热点现象, 且 LAI 越大, 热点越明显(图5c、5f). 由于 LAI 的大小决定了冠层的浓密程度, 因此 LAI 为 1.0(稀疏植被, 裸土比例高)时冠层整体的亮温比 LAI 为 4.0(浓密植被, 裸土比例低)时高.

### 2.2 模型敏感性分析

模型输入参数较多, 限于篇幅原因, 本文仅针对冠层分层参数、视场分段参数、植被叶面积指数、冠层结构参数进行分析.

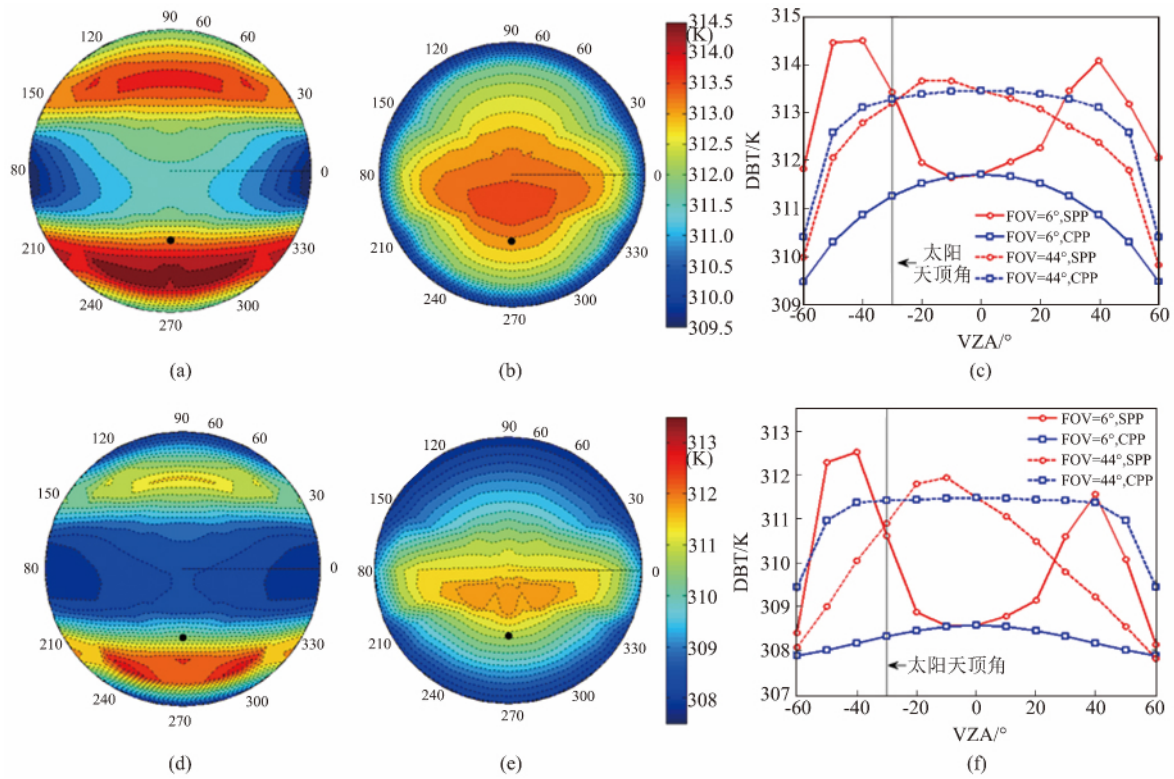


图5 冠层方向性亮温的模拟结果 (a) LAI = 1.0 ,FOV:6°(b) LAI = 1.0 ,FOV:44°(d) LAI = 4.0 ,FOV:6°(e) LAI = 4.0 ,FOV:44°(c)和(f)为太阳主平面(SPP)和垂直主平面(CPP)分布  
 Fig.5 The simulation results of DBT in different cases (a) LAI = 1.0 ,FOV:6°(b) LAI = 1.0 ,FOV:44°(d) LAI = 4.0 ,FOV:6°(e) LAI = 4.0 ,FOV:44°(c) &(f) the angular variations of DBT in the principal plane

(1) 模型对冠层分层参数(*num\_c*)的敏感性

图6给出了在典型参数设置下不同冠层分层数对冠层方向性亮温的影响。可以看出,随冠层分层参数的增加,模型模拟的亮温误差(以 *num\_c* = 100 时的模拟结果作为真值)呈现指数减小趋势,但计算耗时呈线性增加。对于不同观测视场和高度,亮温误差较为接近,但 LAI 越低,相同的冠层分层对应的精度越高,故在对高密冠层时,可适当扩大分层层数。本文将分层数设置为 30 层,该条件下的模拟亮温误差约为 0.02 K。

(2) 模型对视场分段参数(*num\_f*)的敏感性

图7是在典型参数设置下不同视场分段段数对冠层方向性亮温的影响。可以发现,视场分段数越多,方向性亮温误差越小(以 *num\_f* = 100 时的模拟结果作为真值),分段数与模型计算耗时成线性正相关。在相同分段数下, LAI 越大、FOV 越小、观测高度越低,方向性亮温差异越小。随着视场角和传感器高度的增加,模拟亮温误差增加较为迅速。设置分段数为 30 段,该条件下的模拟亮温误差在 0.03 K 左右。

(3) 模型对植被叶面积指数(LAI)的敏感性

图8给出了 LAI 分别为 0.5、1.0 和 2.0 时, LAI 偏差 -0.4 ~ +0.4 在不同视场大小下对无偏差结果的方向性亮温误差。其他参数设置与表1初始设置一致。可以看出, LAI 测量偏差越大,对方向性亮温造成的影响越大;并且视场角越小对 LAI 的变化也越敏感,这是由 LAI 变化仅导致穿过植被区域的亮温变化而对裸土区域亮温无影响,当视场越大,所能观测到的茎与茎之间混合状态的可能性越大,进而削弱了 LAI 偏差带来的影响;同时,随着 LAI 的增大, LAI 测量偏差对方向性亮温的影响逐渐降低。这是因为 LAI 是间隙率的关键影响因子,而间隙率影响着视场内组分比例的大小,进而影响方向性亮温,由式(3)可知,在 LAI 较小时,测量偏差对结果影响较大,而 LAI 较大时影响较小。

(4) 多次散射贡献影响

图9给出了不同 LAI 下多次散射对冠层方向性亮温的影响。可以发现, LAI 越高,热辐射在作物冠层中总的多次散射整体越显著,浓密植被总的多次散射可达 1.7 K 左右,其中土壤对植被的多次散射

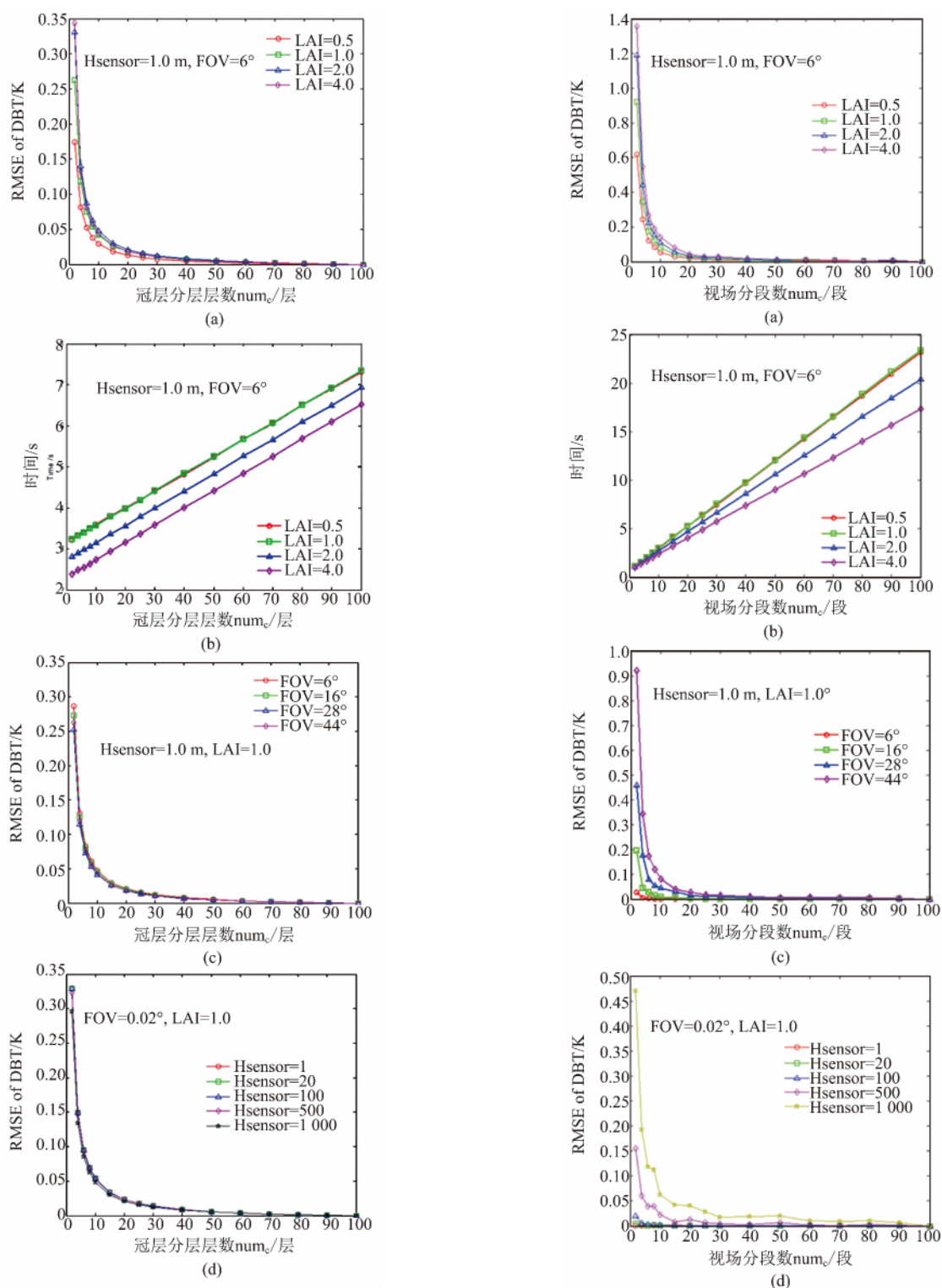


图6 冠层分层数对方向性亮温的影响 (a) 不同 LAI 情况 (b) 不同 LAI 下对计算耗时的影响 (c) 不同 FOV 情况 (d) 不同传感器高度情况

Fig. 6 The influence of different  $num_c$  on DBT: (a) in different LAI (b) influence on time-consuming in different LAI (c) in different FOV (d) in different sensor's height

图7 视场分段数对方向性亮温的影响 (a) 不同 LAI 情况 (b) 不同 LAI 下对计算耗时的影响 (c) 不同 FOV 情况 (d) 不同传感器高度情况

Fig. 7 The influence of different  $num_f$  on DBT: (a) in different LAI (b) influence on time-consuming in different LAI (c) in different FOV (d) in different sensor's height

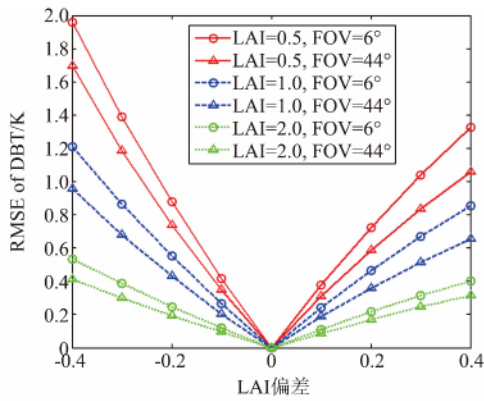


图 8 不同视场下 LAI 测量偏差对方向性亮温的影响  
 Fig. 8 The influence of LAI error on DBT in different FOV

贡献随 LAI 增加先增后减, 植被内部多次散射与本文新增植被对土壤的多次散射随 LAI 增加而增加, 浓密植被处均可达 0.7 K 左右, 不能被忽略。

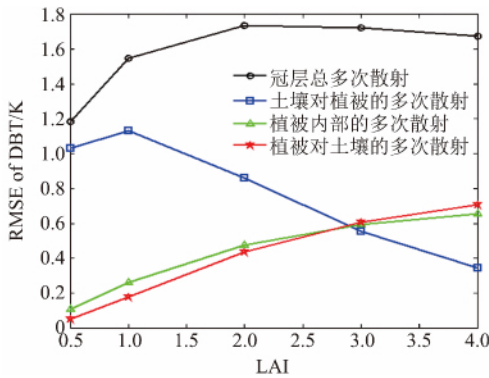


图 9 不同 LAI 对多次散射的影响  
 Fig. 9 The influence of different LAI on multiple scattering

(5) 作物垄宽、垄间裸土宽和垂直下视点位置的影响

作物垄宽( $W$ )和垄间裸土宽( $W_p$ )直接影响行播作物的结构, 传感器垂直下视点位置( $Xf_o$ )位置是导致视场内部组分比例发生变化的关键因素之一。针对上述测量偏差对最终结果的影响进行了敏感性分析。模型初始参数见表 1, 图 10 是分别对  $W$ 、 $W_p$ 、 $Xf_o$  进行了不同程度扰动下 VZA 在  $\pm 60^\circ$  范围内的误差图。1) 作物垄宽: 当传感器位于土壤上方时, 垄宽测量误差导致的模拟差异较小, 最大误差小于 0.22 K@ 偏差 0.05 m; 当传感器位于植被上方时, 模拟误差明显增大, 最大差异可达 0.31 K@ 偏差 0.05 m; 2) 垄间裸土宽: 测量误差相同情况下, 传

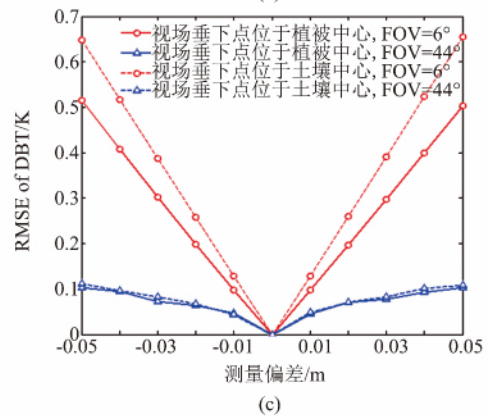
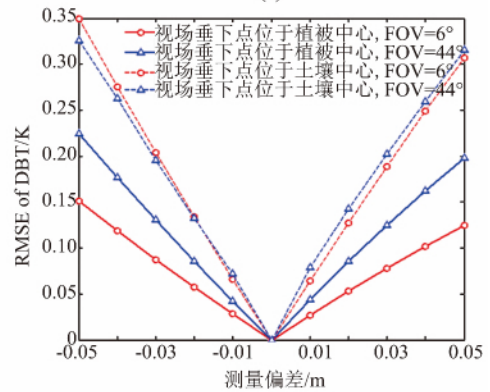
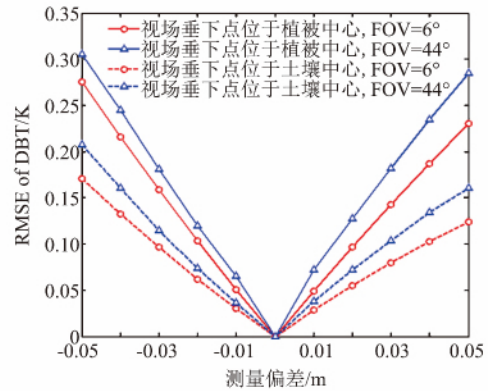


图 10 冠层结构参数偏差对方向性亮温的影响结果图 (a)  $W$  (b)  $W_p$  (c)  $Xf_o$   
 Fig. 10 The influence of canopy parameters error on DBT (a)  $W$  (b)  $W_p$  (c)  $Xf_o$

感器位于土壤上方时导致的误差普遍大于位于植被上方的误差; 而且当传感器位于土壤上方时, 视场角变化对测量误差影响小; 3) 垂直下视点: 测量误差相同情况下,  $6^\circ$  FOV 时的误差明显比  $44^\circ$  FOV 时的误差大, 约高 0.4 K@ 偏差 0.05 m; 当 FOV 较大时 ( $44^\circ$ ) 在 VZA  $\pm 60^\circ$  范围内传感器视场内部总是受植被与裸土的综合影响,  $Xf_o$  误差对模拟结果影响不明显; 当 FOV 较小时 ( $6^\circ$ ), 位于土壤和植被上方的  $Xf_o$  误差会导致较大的模拟误差, 位于土壤上方

的误差更大,这是因为 FOV 越小, VZA 在  $\pm 60^\circ$  范围内传感器观测值是植被、裸土、植被/裸土三者的交替反映,因此模拟误差也将更大.

### 3 模型精度对比分析

#### 3.1 与 FRA97 热辐射参数化模型对比

由于 FRA97 模型为连续冠层模型,且未考虑太阳方向的影响,为了对比直观,该模型将垄间距设为尽量小(设置为  $0.000001\text{ m}$ ),作物垄宽设为尽量大(设置为  $100000\text{ m}$ ),阴影与光照组分温度设为一致.模拟连续植被冠层的方向性热辐射,只选取  $0^\circ/180^\circ$  方位角平面进行讨论,结果如图 11 所示.分析发现,提出的模型模拟结果与 FRA97 模型接近, RMSE 为  $0.18\text{ K}$ ,差异主要是多次散射的影响(图 11b).因此,该模型同样适用于连续冠层热辐射方向性的模拟.

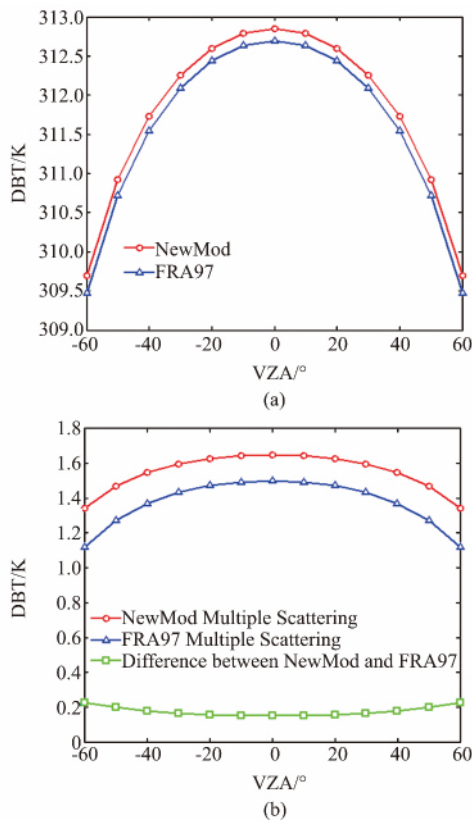


图 11 构建四组分参数化模型与 FRA97 模型模拟结果比较  
图 (a) DBT (b) 多次散射  
Fig. 11 Comparison of the simulated DBT between NewMod and FRA97 (a) DBT (b) multiple scattering

#### 3.2 与 FovMod 模型对比

FovMod 模型 (Ren, 2013) 是通过计算光照土壤、阴影土壤和植被三组分的行播作物热辐射方向

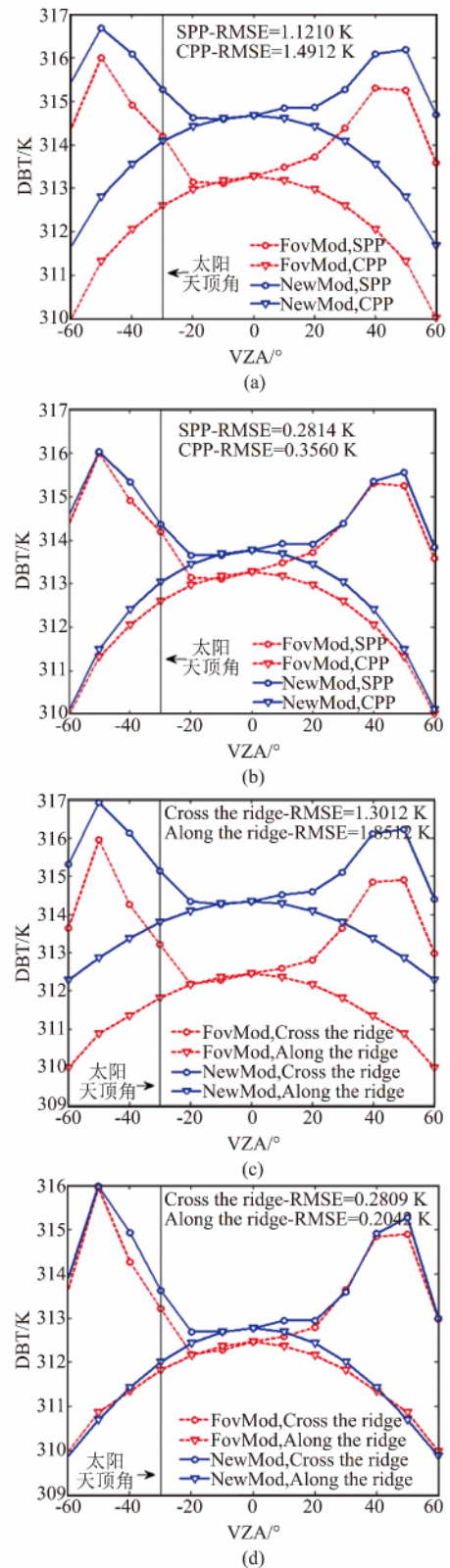


图 12 构建四组分参数化模型与 FovMod 模型模拟结果比较  
图 (a)、(c) 考虑多次散射项 (b)、(d) 未考虑多次散射项  
Fig. 12 Comparison of the simulated DBT between NewMod and FovMod (a) & (c) considering of multiple scattering (b) & (d) without considering of multiple scattering



性参数化模型. 图 12a、c 是该模型与 FovMod 模型随观测角度的模拟结果, 趋势基本一致, 其数值上相差约 1 K. 这是因为本文模型考虑了植被-土壤多次散射影响. 为了精确对比分析, 给出了不考虑多次散射后的对比结果(图 12b、d). 可以看出两个模型模拟结果基本吻合, 太阳主平面(SPP)和垂直主平面(CPP)误差分别为 0.28 K 和 0.36 K; 顺垄平面(A-long the ridge)与垂直垄平面(Cross the ridge)误差分别为 0.20 K 和 0.28 K.

#### 4 结论

构建的热辐射方向性四组分参数化模型能够适应不同 FOV、不同高度的行播作物冠层的热辐射方向性的模拟. 结果有明显行播结构特征和热点效应. 在模拟数据支持下, 该模型与 FRA97 模型进行了对比, 结果一致性较好, 偏差 0.18 K, 证明该模型同样可以用来模拟连续植被冠层的方向性热辐射; 此外, 该模型与 FovMod 模型进行对比, 结果表明, 两个模型在空间分布上变化趋势一致, 并且该模型在对植被进行细分为光照植被、阴影植被, 同时增加了对多次散射项的考虑, 提高了模型的全面性和精确性, 由于视场处理方式的不同以及细分了植被组分, 造成两者 0.3 K 左右的偏差. 同时, 对模型进行了敏感性分析, 发现该模型对 LAI 以及冠层结构参数等参数较为敏感. 在实际使用时应该注意这些参数的高精度获取. 后续研究将深入开展外场多角度观测实验, 利用实际数据对模型精度进行验证.

#### References

- [1] CHEN Liang-Fu, FAN Wen-Jie, LIU Qin-Huo. The study on thermal infrared radiant directionality of non-isothermal land surface [J]. *Progress in Geography* (陈良富, 范闻捷, 柳钦火. 地表热辐射方向性研究进展. 地理科学进展), 2001, **20**(3): 262-267.
- [2] LI Zhao-Liang, TANG Bo-Hui, WU Hua, et al. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **131**: 14-37.
- [3] LI Zhao-Liang, ZHANG Ren-Hua, SUN Xian-Min, et al. Experimental system for the study of the directional thermal emission of natural surfaces [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, **25**(1): 195-204.
- [4] Labed J, Stoll M P. Angular variation of land surface spectral emissivity in the thermal infrared: laboratory investigations on bare soils [J]. *Remote Sensing*, 1991, **12**(11): 2299-2310.
- [5] Sobrino J A, Cuenca J. Angular variation of thermal infrared emissivity for some natural surfaces from experimental measurements [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(18): 3931-3936.
- [6] Cuenca J, Sobrino J A. Experimental measurements for studying angular and spectral variation of thermal infrared emissivity [J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(23): 4598-4602.
- [7] Lagouarde J P, Ballans H, Moreau P, et al. Experimental study of brightness surface temperature angular variations of maritime pine (Pinus pinaster) stands [J]. *Remote sensing of environment*, 2000, **72**(1): 17-34.
- [8] Chehbouni A, Nouvellon Y, Kerr Y H, et al. Directional effect on radiative surface temperature measurements over a semiarid grassland site [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **76**(3): 360-372.
- [9] 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.
- [10] CHEN Liang-Fu, LIU Qin-Huo, FAN Wen-Jie, et al. A directional gap model for simulating the directional thermal radiance of row crops [J]. *Science in China Series D*(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. 中国科学 D 辑), 2002, **32**(4): 290-298.
- [11] LIU Qiang, CHEN Liang-Fu, LIU Qin-Huo, et al. A radiation transfer model to predict canopy radiation in thermal band [J]. *Journal of Remote Sensing*(刘强, 陈良富, 柳钦火, 等. 作物冠层的热红外辐射传输模型. 遥感学报), 2003, **7**(3): 161-167.
- [12] LI Zhao-Liang, WU Hua, WANG Ning, et al. Land surface emissivity retrieval from satellite data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, **34**(9-10): 3084-3127.
- [13] François C, Otle C, Prevot L. Analytical parameterization of canopy directional emissivity and directional radiance in the thermal infrared: Application on the retrieval of soil and foliage temperatures using two directional measurements [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, **18**(2): 2587-2621.
- [14] REN Hua-Zhong, YAN Guang-Jian, LIU Rong-Yuan, et al. Impact of sensor footprint on measurement of directional brightness temperature of row crop canopies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **134**: 135-151.
- [15] Kuusk A. The hot spot effect of a uniform vegetative cover [J]. *Soviet Journal of Remote Sensing*, 1985, **3**(4): 645-658.