

文章编号: 1001 - 9014 (2008) 03 - 0233 - 08

# 高分辨率中红外遥感 ( $3 \sim 5\mu\text{m}$ ) 成像模拟中 邻近效应分析

杨贵军, 柳钦火, 刘强, 肖青, 顾行发

(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 100101)

**摘要:** 在星载高分辨率遥感成像模拟中, 需要重点考虑大气辐射传输过程。通常情况下, 中红外波段大气多次散射作用可以忽略, 但在高分辨率中红外遥感成像中却需对由多次散射产生的邻近效应加以适当考虑。为对其进行定量分析, 分别将影响中红外邻近效应的地表、大气及卫星观测几何参量等进行分析, 结果表明: 邻近效应随像元测量条件而改变, 且在正常条件下其贡献达到 3% 左右。通过将现有大气点扩散函数 (PSF) 解析算法扩展至中红外波段, 建立了中红外像元邻近效应模型, 将其与大气辐射传输模型进行耦合, 共同实现大气辐射传输与邻近效应模拟。模拟结果表明, 模型是正确的, 且应用方法切实可行; 对中红外大气校正、成像模拟均具有一定参考价值。

**关键词:** 邻近效应; 高分辨率; 中红外; 大气辐射传输; 点扩散函数

**中图分类号:** TP722.5 **文献标识码:** A

## ADJACENCY EFFECT ANALYSIS IN IMAGING SIMULATION OF HIGH-RESOLUTION M ID-INFRARED ( $3 \sim 5\mu\text{m}$ ) REMOTE SENSING

YANG Gui-Jun, LIU Qin-Huo, LIU Qiang, XIAO Qing, GU Xing-Fa

(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)

**Abstract:** During the simulation of high-resolution remote sensing image, it is necessary to focus on the process of atmospheric radiative transfer. Generally, the role of multiple scattering of atmosphere may be neglected. However, it should be taken into account for high resolution middle infrared remote sensing. So, adjacency effects generated by neighbor pixels need to be properly considered. In order to give a quantitative analysis, the calculations of contribution of adjacency effect according to the different impact factors (land surface emissivity/temperature, atmosphere conditions and satellite observations geometric parameters et al) were carried out by turn. The results show that the adjacency effect changes with the measuring conditions and it can change about 3% under normal conditions. By an extended atmospheric point spread function (PSF) analytic algorithm, a model of adjacency effect in mid-infrared was created and was coupled with the atmospheric radiative transfer model to simulate atmospheric radiative process and adjacency effect. The simulation results show that the model is correct and practical; and it is also a helpful reference to mid-infrared atmospheric correction.

**Key words:** adjacency effect; high-resolution; mid-infrared; atmospheric radiative transfer; point spread function (PSF)

### 引言

随着高分辨率红外传感器的发展, 为降低卫星发射成本, 使传感器载荷、性价比达到最优, 通常需要在卫星发射前进行成像模拟, 以评定传感器的综

合性能。其中大气辐射传输过程的模拟是成像模拟中的一个重要环节。红外大气辐射传输模拟需要对红外波段的大气辐射传输进行合理描述, 并和复杂条件下的地表大场景进行地气耦合。实际计算表明: 正常情况下热红外波段临近像元的贡献占卫星接收

收稿日期: 2007 - 12 - 22, 修回日期: 2008 - 03 - 11

Received date: 2007 - 12 - 22, revised date: 2008 - 03 - 11

基金项目: 中科院知识创新工程重要方向项目 (KZCX3 - SW - 338 - 2, kzcx2 - yw - 303); 国家自然科学基金重点项目 (40730525); 国家自然科学基金项目 (40671139); 国家重点基础研究发展计划项目 (2007CB714400); 国防科学技术工业委员会项目 (KJSX0401)

作者简介: 杨贵军 (1976-), 男, 北京房山人, 中科院遥感所博士研究生, 主要从事定量遥感应用, 图像分析处理, 3S集成开发及资源遥感监测等相关技术研究。

的目标像元总辐射的比例小于 1%,可以不予考虑;而在中红外波段临近像元的贡献比例可达到 3%,所以中红外波段星载图像的模拟过程中,大气散射导致的邻近效应是其中的重要组成部分。

邻近效应 (Adjacency Effect)是指遥感中非目标像元对目标像元辐射亮度的贡献,又称为“大气的交叉辐射效应”(Cross Radiance)。在可见光-近红外波段范围,临近效应的大气校正方法已较为成熟<sup>[1]</sup>。Kaufman的研究结果表明:邻近效应的影响依赖于传感器的空间分辨率,当空间分辨率小于大气分子和气溶胶的平均高度时,邻近效应的影响不可忽略。Tanre等对 TM 数据中水面反射率的邻近效应影响分析后,给出邻近像元贡献权重与影响半径的关系,并将此方法也应用到 6S 中<sup>[2]</sup>。Reinersman 利用 Monte Carlo 方法模拟的结果表明,像元尺度越小邻近像元贡献所占的比例越高,波长越短邻近效应越强<sup>[1]</sup>。Vermote 等使用 Monte Carlo 方法模拟了垂直观测和大倾角 (70°) 观测时邻近效应的影响;牛铮、胡宝新等对大角度斜视条件下大气点扩散函数的解析近似表达式进行了求解<sup>[3]</sup>。肖青等在改进胡宝新大气点扩散函数求解方法基础上,结合 MODTRAN4 辐射传输模型对高分辨率机载遥感数据的交叉辐射进行了校正;Lee C. Sanders 等在对高光谱大气校正过程中给出了邻近像元效应 PSF 的近似表达式,并结合 MODTRAN4 计算出的透过率完成交叉辐射校正<sup>[4]</sup>。

总体来说,可见光-近红外波段的邻近效应计算可以归为 Monte Carlo 模拟方法;基于大气-地表耦合的三维辐射传输方法和几何光学模型三种方法。但这些方法都没有探讨中红外波段的邻近效应并给出定量分析。本文从中红外辐射传输机理出发,探讨中红外波段成像模拟过程中的临近效应与建模方法。

## 1 邻近效应影响分析

影响邻近效应的主要因素是大气状况(大气分子、气溶胶光学厚度和平均高度)、传感器高度、瞬时视场角大小及太阳-目标-传感器三者间的空间位置。在中红外波段,邻近效应还受地表发射率/反射率、地表温度差异影响,且随波长位置变化而不同。下面给出利用大气辐射传输解析模型<sup>[5-7]</sup>计算出的邻近像元贡献随上述因子变化的情况,在事先给定目标像元和邻近像元的温度和发射率/反射率、大气参数及观测几何参数后,得到邻近效应占总辐

射的比例。

选择 3.5~3.9 $\mu\text{m}$  波段作为试验波长范围,利用 ASTER SPECTRAL LIBRARY Ver 1.2 光谱库 (<http://speclib.jpl.nasa.gov/>),大气模式为中纬度夏季,乡村气溶胶类型,能见度为 25Km,其他参数为大气辐射传输模型 MODTRAN4 默认值;卫星平台传感器向下垂直观测,太阳天顶角为 60°,二者相对方位角为 180°。

### 1.1 地表状况影响 (邻近像元间反射率、温度差异)

地物反射率差异影响分析,选择光谱库中土壤(棕色细沙土-Brown fine sandy loam)和植被(草地)反射率光谱曲线,经过插值处理后得到试验波段范围内的地物波谱曲线。设置目标像元为植被,邻近像元为土壤。目标温度和邻近像元平均温度均设为 300K 为模拟不同土壤和草地反射率,保持二者的光谱曲线形状不变,通过设定不同‘比例因子’来改变它们各自的反射率,这符合同类属的地物在同一

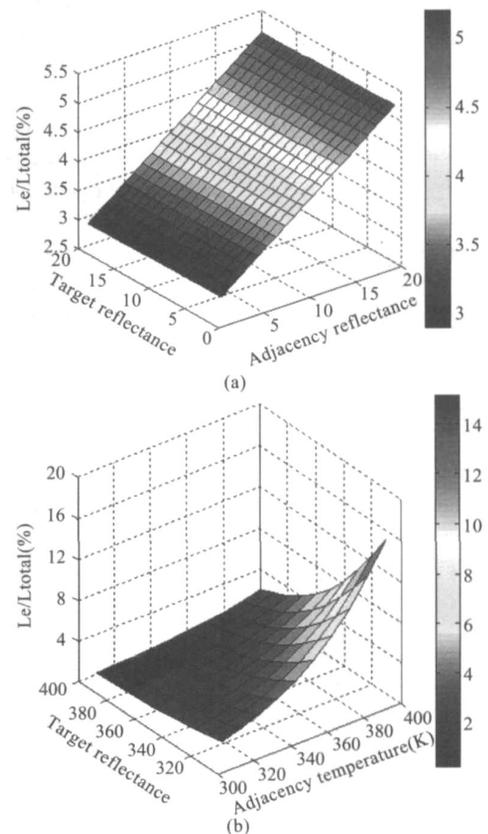


图 1 地物间反射率、温度差异对邻近效应的影响 (a) 反射率差异影响 (X、Y 轴为比例因子) (b) 地物间温度差异影响

Fig 1 Adjacency effect for difference land surface reflectivity and temperature (a) The effect of different land reflectivity (b) The effect of different land temperature

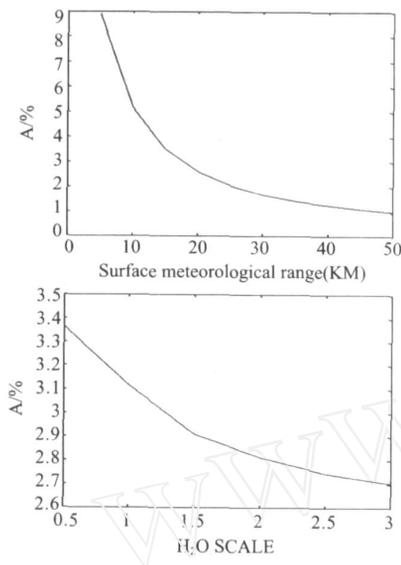


图 2 大气参量对中红外交叉辐射影响 (a)不同大气能见度对交叉辐射影响 (b)不同水汽含量对交叉辐射影响  
 Fig 2 Adjacency effect for different atmospheric conditions (a) The effect of different atmospheric visibility (b) The effect of different atmospheric vapor

波段处的反射率曲线形状具有相似性的特点,比例因子:0.1~2,步长 0.1.对温度差异影响分析则通过给定目标像元和邻近像元反射率,通过改变二者温度实现,目标像元与邻近像元温度变化范围:300~400K,步长 10K,反射率均设为 0.4.

图 1 中,纵轴表示交叉辐射占入瞳总辐射的百分比.可以看出,中红外波段交叉辐射贡献最高达到 5%左右;正常情况下为 3%左右.中红外波段的交叉辐射随目标反射率增大而减小,随邻近像元反射率增大而增大.地表温度差异对中红外波段的交叉辐射影响,正常地表温度下中红外波段的交叉辐射仍约为 3%;但当目标像元温度为 300K,而邻近像元温度达到 400K时,中红外波段交叉辐射贡献达到 10%左右.

1.2 不同大气状况分析

大气参量主要包括气温、气溶胶、水汽含量、二氧化碳含量、臭氧含量等,选择其中对中红外波段邻近效应影响相对较大的气溶胶能见度和大气水汽含量进行分析.在地表覆盖均一条件下,分析不同大气状况对邻近效应的影响.地表温度固定为 300K,发射率取 0.4,其他参量与前面相同.在给定大气模式下,通过改变能见度距离和水汽含量分别计算邻近效应贡献比例,水汽含量是通过改变气柱内的总含水量比例实现.

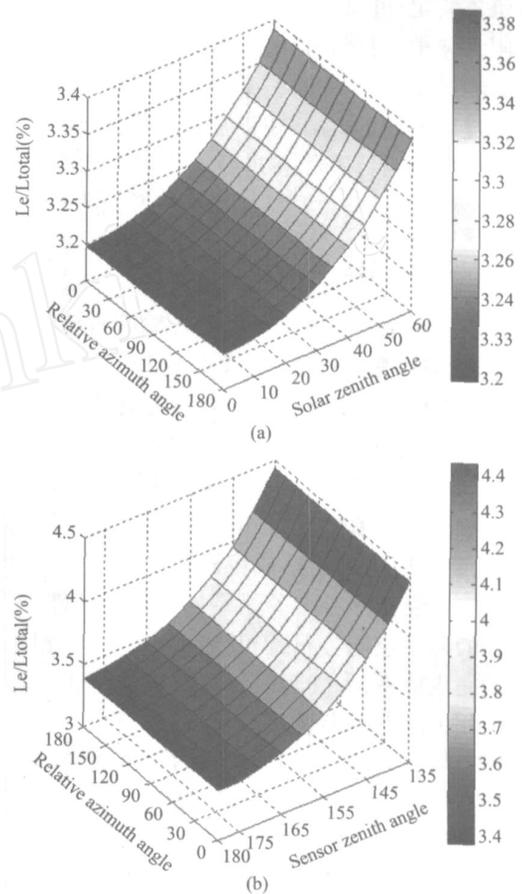


图 3 观测几何对中红外交叉辐射影响 (a)太阳天顶角对交叉辐射贡献的影响 (b)传感器观测天顶角对交叉辐射贡献的影响  
 Fig 3 Adjacency effect for different observation geometric angle (a) The effect of solar zenith angle (b) The effect of sensor view zenith angle

从图 2 可以看出:在给定的气溶胶类型下,随着能见度增大,在中红外波段交叉辐射贡献比例呈负指数式衰减,即发生多次散射的概率迅速减小,且在正常 25Km 能见度下,中红外波段邻近像元达到 3%左右.交叉辐射随水汽含量增大也呈负指数性下降.下降的主要原因是水汽含量增大导致在中红外吸收增强.当比例因子达到 3 倍左右时,由于相对湿度接近饱和状态,即使再增大比例因子,交叉辐射贡献也变化不大.在比例因子为 1 时计算出的交叉辐射贡献和前面仍然一致,中红外波段约 3%.

1.3 不同观测几何分析

观测几何主要包括太阳入射天顶角、卫星观测天顶角及太阳和卫星相对目标的相对方位角.  
 图 3 中 (a)为固定传感器观测天顶角时(180°)时,太阳天顶角和相对方位角变化对交叉辐射影响;(b)为太阳天顶角为 60°时,传感器观测天顶角和相

对方位角变化,可以看出:无论传感器观测天顶角或是太阳天顶角,对交叉辐射贡献均为3%,受相对方位角影响微弱。

通过以上分析得出,在正常情况下,中红外波段交叉辐射贡献约为3%,在进行成像模拟、大气纠正等相关工作时,是需要对其加以适当考虑的。

## 2 邻近效应建模与分析

上述分析都是基于大气辐射传输解析模型进行的,而其未将传感器瞬时视场(IFOV)和邻近像元影响半径引入模型中,其计算出的邻近贡献就不能确定具体空间范围和相应的点扩散函数分布(PSF-Point Spread Function)。所以,单独利用大气辐射传输模型不能获得真实像元分辨率下的交叉辐射贡献,无法直接应用到遥感成像模拟中去。另一方面,邻近效应建模充分考虑了卫星观测几何条件,可确定具体的PSF空间分布;但其需要输入大气相关参量才能完成计算,大气辐射传输解析模型正好可以求解出相关的大气参量。这样就需要将大气辐射传输解析模型与邻近效应PSF模型耦合在一起,完成交叉辐射贡献计算,并用于成像模拟。

### 2.1 邻近效应建模

邻近效应建模主要参考胡新宝、肖青等采用的大气PSF近似模型<sup>[1,2]</sup>,并将模型扩展到中红外波段,调整了模型的计算方法。修改后的模型根据传感器、目标像元和邻近像元构成的观测几何关系来求解邻近像元出射辐射(邻近像元反射的下行辐射和邻近像元发射之和)经大气散射后到达传感器的辐射通量,从而求出大气点扩散函数的近似解。PSF模型计算需要输入的大气参量和辐射值是由大气辐射传输解析模型提供的,而其计算出的不同影响半径下的PSF分布又提供给大气辐射传输解析模型使用,二者是相互耦合在一起的。这也是与原PSF模型差别之处。中红外波段的PSF模型如图4所示。

任意邻近像元A对目标O产生的邻近贡献可表示为:

$$L_{A \rightarrow O}(\theta, \phi) = \int_{(h_0)}^{(H)} \int_{\phi=0}^{2\pi} L_{(A) \text{ emit}}(\theta, \phi) P(\theta, \phi) \times T(\theta, \phi) d \sin(\theta) d \phi, \quad (1)$$

其中:  $(h_0)$ 代表大气底层的光学厚度,  $(H)$ 代表大气均质高度为  $H$  的大气光学厚度;  $L_{(A) \text{ emit}}(\theta, \phi)$  为邻近像元A散射向的出射辐射,  $(\theta, \phi)$  反射的太阳、大气下行辐射和自身发射之和;  $P(\theta, \phi)$  为大气散射相函数;  $T(\theta, \phi)$  为由单次散射后至入瞳处的透

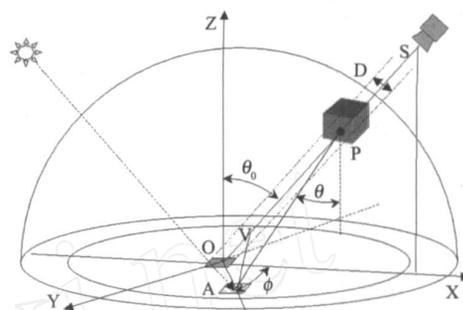


图4 邻近像元辐射贡献分析示意图

Fig 4 The scheme of adjacency radiation contribution

率;  $\theta, \phi$  分别为观测像元对传感器视场方向所成的天顶角和方位角;  $\sin(\theta) d \theta d \phi$  为观测邻近像元的立体角; O为目标像元, A为邻近像元, OS为传感器视场方向; D为视场宽度(实际上,传感器视场为一近似柱体的锥体),由传感器IFOV和卫星飞行高度  $h$  决定。公式(1)中  $L_{(A) \text{ emit}}(\theta, \phi)$  若表达为太阳、大气下行辐射和自身发射之和,其表达式应为:

$$L_{(A) \text{ emit}}(\theta, \phi) = \frac{\omega}{4} F_{e \rightarrow A}(\theta_{sl}, \phi_{sl}, \phi) \exp\left(-\frac{\sigma t_{sl}}{\mu}\right) + \frac{1}{4} L_{am \downarrow}(\theta, \phi, \phi) \cos \theta \sin \theta d \theta d \phi + (1 - A(\theta_{sl}, \phi_{sl}, \phi)) B(T_{sa}) \cos \theta \sin \theta d \theta d \phi, \quad (2)$$

其中:  $L_{am \downarrow}(\theta, \phi) = B(T_h) \frac{\partial t(\theta, h)}{\partial h} dh$ ,  $B(T_p)$  为高度  $h$  处大气微分薄层黑体发射辐射,  $\partial t(\theta, h)$  为高度  $h$  处给定角度方向上的透过率;  $\omega$  大气单散射反照率;  $F_e$  为大气层顶直射太阳辐射;  $\sigma t_{sl}$  为大气整层光学厚度;  $A(\theta_{sl}, \phi_{sl}, \phi)$  为A的双向反射率,  $\theta_{sl}, \phi_{sl}$  为太阳天顶角和方位角;  $L_{am \downarrow}(\theta, \phi)$  为大气下行辐射(散射的太阳辐射和自身发射);  $B(T_{sa})$  为A黑体发射辐射,  $T_{sa}$  为A温度。公式(2)充分考虑了在地表非均一条件下,不同发射率、温度的邻近像元对邻近效应的影响,即各邻近像元的出射辐射均不同,这与原始PSF模型有本质差异;原始方法假设地表为覆盖均一的朗伯体;这显然是不符合实际情况的。式中第一项为太阳辐射贡献,第二项为大气下行辐射贡献,第三项为邻近像元自身发射辐射。

若将邻近像元辐射计算过程分为三步:1) A散射的太阳、大气下行辐射和自身发射(假设A为漫反射体),在经过大气衰减作用后,部分进入传感器视场内(SO方向);2)在传感器视场内发生散射,并部分散向传感器观测方向;3)散向传感器方向的辐

射再经过大气衰减作用,最终进入传感器.按照图 4 中  $\cos\phi > 0$ 和  $\cos\phi < 0$ 将  $L_{A,O}(\theta, \phi)$ 分为两部分,依照

$$L_{A,O}(\theta, \phi) = \begin{cases} \int_0^1 \frac{\omega}{4} P\left(\frac{\theta}{2} + \alpha\right) L_{(A)emit}(\alpha, \phi, \theta) (A_{A \rightarrow P}(\alpha, \phi) T_{A \rightarrow P} \cdot p(\alpha, \phi, \theta_0)) \cdot T_{P \rightarrow Sensor} d\alpha & \text{if } (\cos\phi > 0) \\ \int_0^2 \frac{\omega}{4} P\left(\frac{\theta}{2} - \alpha\right) L_{(A)emit}(\alpha, \phi, \theta) (A_{A \rightarrow P}(\alpha, \phi) T_{A \rightarrow P} \cdot p(\alpha, \phi, \theta_0)) \cdot T_{P \rightarrow Sensor} d\alpha & \text{if } (\cos\phi < 0) \end{cases} \quad (3)$$

其中  $\theta_1, \theta_2$ 为积分运算上下限,  $\theta_1$ 为 AO 与 AV 间夹角, AV 为过邻近像元且垂直于传感器视场方向 OS 的直线;  $\theta_2$ 为 AV 与 AP 间夹角;  $\alpha$ 为分布于  $\theta_1, \theta_2$ 内的任意角度,  $\theta_1, \theta_2$ 确定了 A 散射向传感器视场 AS 的所有方向范围;  $\omega$  大气单散射反照率;  $P\left(\frac{\theta}{2} \pm \alpha\right)$  为大气散射相函数;  $(A_{A \rightarrow P}(\alpha, \phi))$  为邻近像元 A 对传感器视场方向  $(\alpha, \phi)$  所成的立体

上述邻近像元辐射传输过程涉及三个步骤,邻近像元辐射贡献的相应计算公式为:

角;  $T_{A \rightarrow P}$ 为由 A 传输至 P 处的大气透过率,  $p(\alpha, \phi, \theta_0)$ 为到达 P 处的辐射散射向传感器方向 S 的概率;  $T_{P \rightarrow Sensor}$ 为由 P 传输至入瞳处的大气透过率.公式中大气透过率和散射概率等未知量可根据几何示意图进行推导<sup>[2]</sup>.为了得到大气点扩散函数的解析解,将上述积分公式改为离散求和即可:

$$L_{A,O}(\theta, \phi) = \begin{cases} \sum_{i=x}^{-x} \sum_{j=y}^{-y} \frac{\omega}{4} P\left(\frac{\theta}{2} + \alpha\right) L_{(A)emit}(\alpha, \phi, \theta) (A_{A \rightarrow P}(\alpha, \phi) T_{A \rightarrow P} \cdot p(\alpha, \phi, \theta_0)) \cdot T_{P \rightarrow Sensor} & \text{if } (\cos\phi > 0) \\ \sum_{i=x}^{-x} \sum_{j=y}^{-y} \frac{\omega}{4} P\left(\frac{\theta}{2} - \alpha\right) L_{(A)emit}(\alpha, \phi, \theta) (A_{A \rightarrow P}(\alpha, \phi) T_{A \rightarrow P} \cdot p(\alpha, \phi, \theta_0)) \cdot T_{P \rightarrow Sensor} & \text{if } (\cos\phi < 0) \end{cases} \quad (4)$$

其中  $(i, j)$ 为邻近像元 A 的行列号;  $(\pm x, \pm y)$ 为像元分布范围;像元空间分辨率大小可由IFOV和轨道高度确定.对于大气散射相函数  $P\left(\frac{\theta}{2} \pm \alpha\right)$ ,参考 Henyey-Greenstein 相函数形式:

$$P(\theta, g) = (1 - g^2) (1 + g^2 - 2g \cos\theta)^{-3/2} / 4 \quad (5)$$

将其重新定义为两种不同气溶胶类型的组合,具体为:

$$P(\theta, g_1, g_2) = P(\theta, g_1) + (1 - \lambda) P(\theta, g_2) \quad (6)$$

其中  $g$  为非对称因子.通过给定不同的  $\lambda, g_1, g_2$  来模拟不同气溶胶特征.

### 2.2 模型分析

根据建立的 PSF 模型,下面分别对不同观测天顶角、像元空间分辨率、气溶胶光学厚度及相函数对大气点扩散函数影响进行了分析,可确定不同半径范围内 PSF 的大小.

#### (1) 不同观测天顶角下的 PSF 分布

保持 IFOV 和高度不变(分别为 3mrad, 100Km),在均匀地表假设下(每个像元的地表发射率和温度相同),并基于大气辐射传输解析模型获得的地表入射辐射、大气透过率等参数,利用上述 PSF 模型计算不同观测天顶角对 PSF 的影响.从图

5 中可以看出(PSF 权重值经过了对数变换),在垂直测量时,大气点扩散函数是对称的,与方位角无关,邻近像元贡献为 1.783%;在大角度倾斜观测时,PSF 不仅受邻近像元与目标像元相对距离影响,而且它们所处的相对方位有很大关系,与观测方位同侧(图中相对方位角为 0°)像元权重较大,邻近像元贡献为 3.6132%.与垂直观测相比,倾斜观测时目标像元的权重降低,这是由于随观测天顶角增大,从传感器至视场中心像元的光学路径增加,散射作用加强所致.实际卫星观测天顶角一般在 140°~180°间,此时大气点扩散函数随天顶角变化仍比较明显,需要加以适当考虑.

#### (2) 不同像元尺度下的大气点扩散函数

由于像元尺度取决于传感器的 IFOV 和飞行高度,为分析像元尺度对交叉辐射的影响,分别计算了不同 IFOV 和飞行高度条件下的交叉辐射贡献,如图 6 所示.对不同视场角(IFOV)分析中,轨道高度为 100Km,其他参数与选取不同 IFOV(1mrad, 2mrad, 4mrad)进行计算,获得不同 IFOV 下的交叉辐射贡献比例.在对不同轨道高度分析时,IFOV 为 2mrad,其他参数相同,轨道高度从 1Km 增加到

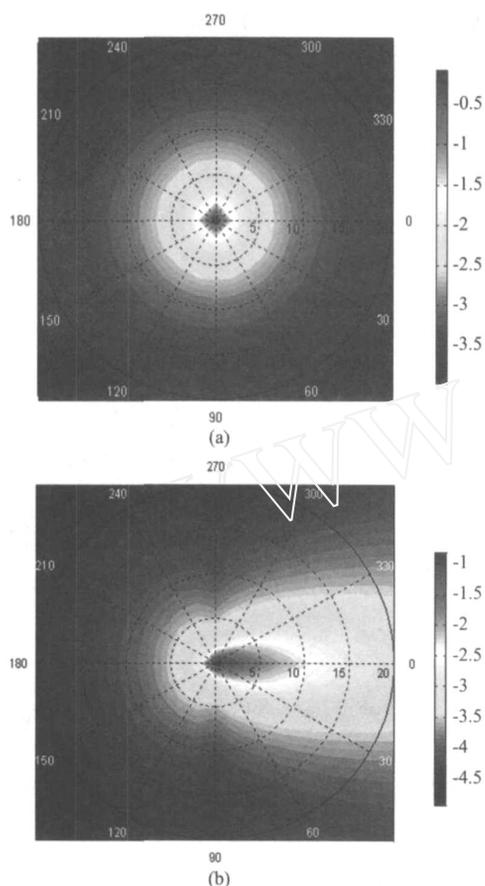


图 5 不同卫星观测角度下点扩散函数二维分布图  
(a) 卫星垂直观测 (b) 卫星倾斜 70 观测

Fig 5 2D distribution map of PSF for different satellite observation angle (a) The view of zenith angle (b) The view of incline 70° from zenith

10Km. 左图表明随着视场角增大,即空间分辨率的降低,邻近像元造成的交叉辐射也下降.主要是由于随视场角增大,目标像元的辐射贡献成倍增大,而交叉辐射增加的幅度却很有限,导致交叉辐射贡献比例降低.右图中,随轨道高度的增加,保持IFOV不变,像元空间分辨率会降低,但由于气溶胶光学厚度增加(透过率减小),目标像元的辐射贡献会有所减小;同时大气散射效应加强,邻近效应会加大,导致最终交叉辐射贡献比例随轨道高度增大.

(3) 不同气溶胶光学厚度和相函数下的大气点扩散函数

改变气溶胶光学厚度和散射相函数,用PSF模型对交叉辐射贡献进行了分析,如图7所示. IFOV为2mrad,轨道高度为100Km,其他参数设置相同,气溶胶光学厚度从1.0增加到1.4.左图中随着气溶胶光学厚度增大,对于目标和邻近像元的辐射贡献均随透过率降低而减小,但光学厚度增大导致散

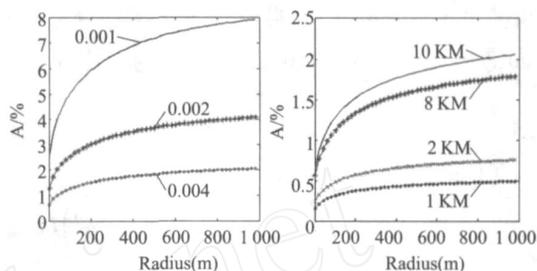


图 6 不同视场角(左)和不同轨道高度(右)对邻近效应贡献

Fig. 6 Adjacency effect for different IFOV(left) and satellite altitude(right)

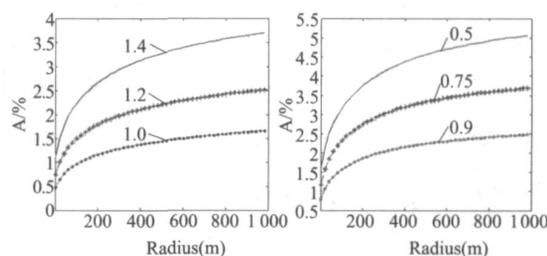


图 7 不同气溶胶光学厚度(左)和不同相函数(右)对邻近效应贡献

Fig. 7 Adjacency effect for different aerosol optical depth (left) and phase function (right)

射概率增加,相对于目标像元辐射贡献,邻近像元散射贡献是逐渐加强的,即交叉辐射贡献比例随光学厚度增大而增大.右图中散射相函数不对称因子从0.5增加到0.9,其他参数设置与左图相同,由于前向散射作用加强,邻近像元方向产生的散射辐射减弱,被邻近像元散射的概率降低,导致交叉辐射的影响减弱,即交叉辐射贡献比例随不对称因子增大而减小.

### 3 应用方法

为了将邻近效应模型应用于遥感成像模拟,需要将其与大气辐射传输解析模型结合才能实现具体应用<sup>[8-10]</sup>.实质上邻近效应模型是对大气辐射传输解析模型中邻近贡献计算的一种非线性逼近,解决了大气辐射传输解析模型中邻近效应计算不能直接用于实际图像处理的问题.邻近效应模型应用于成像模拟的方法如图8所示.

具体步骤为:1)根据输入的地表参量、大气参量及卫星观测几何,利用建立的辐射传输解析方程计算各辐射项,包括交叉辐射项;并最终计算出交叉辐射贡献比例(Q);2)将计算出的透过率、大气和太阳总下行辐射及邻近发射辐射项带入PSF模型中,

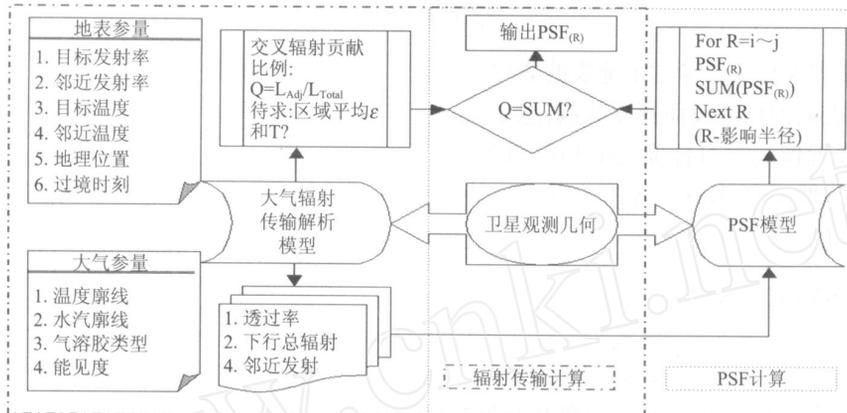


图8 邻近效应贡献应用流程

Fig. 8 The workflow of adjacency effect application



图9 邻近效应模拟结果对比(左:未考虑邻近效应;中:加入邻近效应;右:二者差异)

Fig. 9 Comparing without adjacency effect(left) and with adjacency effect(right)

输入卫星观测几何参量后,计算出给定影响半径下邻近像元 PSF的总和 (SUM;不含目标贡献);3)将计算出的  $Q$  和  $SUM$  进行比较,如果二者不相等,则改变 PSF计算中的影响半径大小,重新计算 PSF和  $SUM$ ;并依据 PSF和输入的地表温度、发射率图像,重新计算邻近区域的平均温度和平均发射率,带入辐射传输解析模型中重新计算  $Q$ .再将  $Q$  和  $SUM$  比较,直至二者相等或最佳接近时计算结束;4)根据最终确定的影响半径确定 PSF分布,并基于输入的图像计算出目标像元对应邻近区域的平均发射率和平均温度.可以看出,在成像模拟中,邻近效应模型主要是由输入的地表、大气及传感器观测几何参数确定 PSF分布范围和各邻近像元贡献的权重大小.图9为未考虑邻近效应和考虑邻近效应时模拟的入瞳处中红外遥感图像,像元分辨率为 10m.

从模拟结果可以看出,当模拟大气辐射传输过程时加入邻近效应后,在相邻像元温度和发射率差异变化较大处,交叉辐射贡献要显著一些,使得入瞳辐射值相应增大;可以从图9中最右侧的差异图像上明显看出:差异较大处与图像边缘轮廓大体一致.

而在区域地表温度、发射率变化不大时,交叉辐射贡献较小,这与前面邻近效应影响分析得出的结论是一致的.当然,邻近效应贡献比起其他大气辐射贡献还是要小很多,所以在加入邻近效应和不加入邻近效应的模拟结果中,目视效果上是没有明显差异的.

#### 4 结语

邻近效应在星载高分辨率中红外遥感中具有一定的影响,利用建立的大气辐射传输解析模型对涉及邻近效应的影响因素进行了定量分析,得出邻近效应主要受相邻像元间地表温度、发射率差异影响;同时还受大气状况条件影响,在不同大气能见度和气溶胶条件下,大气的散射强度变化比较明显,致使邻近效应也随之变化.为了将传感器的观测几何(IFOV、飞行高度等)引入邻近效应模型,建立高空间分辨率模式下邻近效应计算模型,将原有 PSF模型扩展至中红外波段,并在不同空间分辨率、不同观测角度等条件下进行了邻近效应分析,证实了观测几何对邻近效应影响也十分显著.通过以上综合分析,在正常地表、大气和观测条件下,邻近效应贡献

约为 3%,这就需要无论在进行成像模拟还是大气订正工作中,邻近贡献是不可忽略的。

建立的邻近效应模型虽然考虑了地表的非均匀性,但还是基于地表朗伯体假设而建立的;若想更为精确地定量描述邻近像元对目标像元的辐射贡献,需要考虑地表双向性反射率分布函数(BRDF)特性,后续工作将在此方面展开研究。

## REFERENCES

- [1] XIAO Qin, LU Qin-Huo, LI Xiao-Wen, et al. Analysis correction of atmospheric cross radiation for high geometric resolution airborne remote sensing data [J]. *Journal of Remote Sensing* (肖青, 柳钦火, 李小文, 等. 高分辨率机载遥感数据的交叉辐射影响及其校正. 遥感学报), 2005, 6: 3—11.
- [2] Hu Bao-Xin, Li Xiao-Wen, Zhu Chong-Guang. Deriving the anisotropic atmospheric Point Spread Function of off-nadir remote sensing [J]. *Journal of images and graphics* (胡宝新, 李小文, 朱重光. 大倾角光学遥感中大气点扩散函数的近似模型. 中国图象图形学报), 1996, 1: 19—29.
- [3] NIU Zheng, ZHU Chong-Guang, WANG Chang-Yao. Analysis of atmospheric cross radiation in a slant viewing angle [J]. *Journal of Remote Sensing* (牛铮, 朱重光, 王长耀. 斜视角度下大气交叉辐射影响分析. 遥感学报), 1997, 2: 8—13.
- [4] CHEN Liang-Fu, ZHUANG Jia-Li, XU Xi-Ru, et al. The simulation of thermal radiant directionality of continuous

vegetation using Monte Carlo method [J]. *Journal of Remote Sensing* (陈良富, 庄家礼, 徐希孺, 等. 用 Monte Carlo 方法模拟连续植被热辐射方向性. 遥感学报), 2000, (4): 261—265.

- [5] YANG Gui-Jun, LU Qin-Huo, HUANG Hua-Guo, et al. Methods for simulating infrared remote sensing images based on scene models [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨贵军, 柳钦火, 黄华国, 等. 基于场景模型的热红外遥感成像模拟方法. 红外与毫米波学报), 2007, 26 (1): 1—7.
- [6] HE Li-Ming, YAN Guang-Jian, LI Xiao-Wen, et al. Atmospheric correction for AMTIS single-channel multi-angular thermal-infrared imagery [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (何立明, 阎广建, 李小文, 等. AMTIS 单通道多角度热红外图像的大气订正. 红外与毫米波学报), 2006, 25 (6): 429—433.
- [7] Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. MODTRAN4 USER'S MANUAL, AIR FORCE RESEARCH LABORATORY Space Vehicles Directorate. June 1999.
- [8] Bömer A, Wiest L, et al. SENSOR: a tool for the simulation of hyperspectral remote sensing systems [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, 55 (6): 299—312.
- [9] Wout Verhoef, Heike Bach. Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87: 23—41.
- [10] Sadot D, Kopeika N S. Thermal imaging through the atmosphere: atmosphere MTF theory and verification [J]. *Opt Eng*, 1994, 33 (3): 880—887.

(上接 232页)

差随波长的变化性。

(4) 不管采用哪种算法,最大光程差一定时,矩形函数作用下的复原光谱相对误差最大,其它切趾函数作用后的复原光谱精度则明显提高。此外,相对于其他切趾函数, Hanning 函数作用后的复原光谱在各个最大光程差下相对误差都较小。

(5) 根据 HJY20-1-A 复原光谱对三种典型植被指数求解,进一步证明了基于仪器线型函数标准化的光谱复原改进算法的有效性。

文中选用了 4 种最大光程差以及 4 种切趾函数,与目前众多的切趾函数类型相比,采用的样本数量还不够丰富。因此下一步将对其他类型的切趾函数进行分析研究,从而更为全面地分析切趾函数处理带来的影响以及验证改进算法的有效性。

## REFERENCES

- [1] Bell R J. *Introductory Fourier Transform Spectroscopy* [M]. New York: Academic Press, 1972.
- [2] Filler A H. Apodization and interpolation in fourier transform spectroscopy [J]. *J. Opt Soc Am*. 1964, 54: 762—767.
- [3] Norton R H, Beer R. New apodizing functions for fourier spectrometry [J]. *J. Opt Soc Am*. 1976, 66: 259—264.

- [4] Norton R H, Beer R. Errata - new apodizing functions for fourier spectrometry [J]. *J. Opt Soc Am*. 1977, 67: 419.
- [5] Amato U, Canditiis D D, Serio C. Effects of apodization on the retrieval of geophysical parameters from fourier transform spectrometers [J]. *Applied Optics* 1998, 37: 6537—6543.
- [6] Gao Lian-Ru, Zhang Bing, Zhang Xia, et al. Infrared spectral analysis of architectural materials covered by different paints [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (高连如, 张兵, 张霞, 等. 油漆涂层对板材红外光谱特性影响分析. 红外与毫米波学报). 2006, 25: 411—416.
- [7] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation [J]. *Remote Sensing of Environment* 1979, 8: 127—150.
- [8] Kim M S, Daughtry C S T, Chappelle E W, et al. The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation (APAR) [C]. Proceedings of the 6<sup>th</sup> Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing. France: VoD'Isere, 299—306, 1994.
- [9] Haboudane D, Miller J R, Tremblay N, et al. Hyperspectral vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application and validation in the context of precision agriculture [J]. *Remote Sensing of Environment* 2004, 90: 337—352.
- [10] Li Bao-Sheng, LU Yong, WANG An. Uniform sampling method of optical fiber fourier transform spectrometer [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李保生, 刘勇, 王安. 光纤傅里叶光谱仪干涉图均匀抽样方法. 红外与毫米波学报). 2007, 26 (3): 201—204.