

# 中红外大气辐射传输解析模型及遥感成像模拟

杨贵军<sup>1,2</sup>, 柳钦火<sup>2</sup>, 刘 强<sup>2</sup>, 肖 青<sup>2</sup>, 顾行发<sup>2</sup>, 黄文江<sup>1</sup>

1. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京市农林科学院, 北京 100097  
2. 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

**摘 要** 为了建立完整的星载高分辨率中红外成像模拟系统, 并为航天器载荷设计等相关工作提供有力参考, 需要对大气辐射传输这一环节进行重点考虑, 设计出切实可行, 精度较高的中红外大气辐射传输数值成像模拟方法。针对中红外大气辐射传输具有大气散射和自身发射的特性, 将整个大气辐射传输过程进行了合理分解, 并利用 MODTRAN4 对各辐射分量进行求解, 以查找表方式实现了中红外大气辐射传输成像模拟。此外, 针对大气散射导致的邻近效应进行了分析, 将原有 PSF 模型扩展至中红外波段, 并与大气辐射传输解析模型相互耦合共同完成模拟成像。最后对模型进行了初步验证和成像模拟, 结果表明: 模型具有较好的模拟精度, 通过给定观测几何和大气条件, 并根据地表输入的温度和发射率等, 实现逐像元的大气辐射传输计算。

**关键词** 中红外; 成像模拟; 大气辐射传输; 解析模型; 邻近效应

**中图分类号:** TP722.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)03-0629-06

## 引 言

通常情况下, 从开始研制遥感器起, 就要设计出遥感器模拟系统, 为遥感器载荷研制过程中的可行性(概念)论证、方案论证、分析、设计、制造、运行、维护、训练和管理等提供重要参考依据。一般将完整的遥感器成像模拟工作分为 3 部分: (1) 地表场景模拟; (2) 大气辐射传输过程的模拟; (3) 传感器成像系统模拟。本文重点围绕中红外(3~5 μm)大气辐射传输过程进行探讨, 完成地表-大气耦合过程的数值计算, 获得入瞳处的图像; 另外两部分不在此阐述, 下文中的中红外均指 3~5 μm。

目前大气辐射传输模拟方法有三种<sup>[1-6]</sup>: (1) 采用大气辐射传输理论, 求解热红外大气辐射传输方程, 根据计算出的大气透过率、大气层辐射、大气下行辐射等逐像元计算出大气顶层入瞳处的辐射亮度值图像, 参数的计算一般采用 LOWTRAN7 或 MODTRAN4 软件; (2) 将大气作用的效果定义为大气调制传递函数, 可将其近似为湍流和气溶胶调制传递函数之积。由于大气调制传递函数不容易实现不同大气状况、观测几何条件下大气辐射传输模拟, 加之无法计算各辐射分量及邻近像元贡献, 很难开发成通用的大气辐射传输模拟方法; (3) 采用蒙特卡罗方法模拟大气辐射传输过程,

但由于其每次计算需要通过发射大量光子, 才能获得具有统计意义的结果, 很难直接用于大范围的成像模拟; 而且将其应用到中红外还存在一定争议。所以, 目前绝大多数大气辐射传输模拟方法都是基于辐射传输理论建立起来的。

一般将非目标像元对目标像元辐射亮度的贡献称之为“邻近像元影响”(Adjacency effect)或称为“大气的交叉辐射影响”(Cross radiance)<sup>[7, 8]</sup>。通常认为无论在热红外(8~12 μm)或中红外都忽略交叉辐射贡献。实际计算表明: 正常情况下热红外波段交叉辐射贡献占总辐射的比例小于 1%, 故可以不予考虑; 而其中红外波段的贡献比例达到 3%, 是需要加以考虑的。

本文正是在此基础上建立的大气辐射传输解析模型, 充分考虑了中红外大气辐射传输特点, 并加入了邻近像元贡献计算。模型可根据每个像元对应的卫星-像元-太阳观测几何条件和大气参量, 进行像元级的大气辐射传输模拟。最后对模型进行了验证和分析, 能够为遥感器设计、性能分析提供参考, 为大气纠正和相关算法验证提供了新途径。

## 1 中红外大气辐射传输解析模型及成像模拟

### 1.1 中红外大气辐射传输解析模型

为实现模拟地表-大气-传感器间红外辐射传输的复杂过

收稿日期: 2007-10-20, 修订日期: 2008-01-26

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-338-2, kzcx2-yw-303), 国家重点基础研究发展规划项目“973”(2007CB714401), 对地观测技术国家测绘局重点实验室经费项目(200815)资助

作者简介: 杨贵军, 1976年生, 国家农业信息化工程技术研究中心助理研究员 e-mail: guijun.yang@163.com

程,需要建立准确的数值计算模型来仿真完整的遥感成像过程。实际上,建立大气辐射传输解析模型最为关键,起着承前启后的重要作用,也是影响大气校正或成像模拟的主要环节。文中涉及的地表和传感器相关信息均已知,重点研究中红外大气辐射传输的特点和计算方法。在中红外波段,大气并不是完全透明的。考虑到中红外波段太阳发射的能量和地表发射的能量在一个数量级上,所以在计算传感器信号时,必须考虑太阳辐射贡献及大气吸收、发射及散射贡献<sup>[9]</sup>。所以,中红外大气辐射传输方程通常为

$$R_i(\theta, \phi) = f_i(\lambda) \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} B(T_s) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi + \iint f_i(\lambda) B(T, p) \frac{\partial(\cos \theta)}{\partial p} dp d\theta + f_i(\lambda) \iint b(\theta, \phi, s, s') \cdot L_s(\theta, \phi) t(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi + f_i(\lambda) \iint b(\theta, \phi, s, s') \cdot L_{sun}(\theta, \phi) t(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (1)$$

式中:  $L_s$  表示大气的下行辐射;  $R_i$  表示传感器接收的总辐射;  $B(T)$  表示温度为  $T$  时的黑体辐射;  $b$  表示地表比辐射率;  $t$  表示整层大气的总透过率;  $b$  表示地表的散射相函数;  $f_i(\lambda)$  表示传感器第  $i$  通道的波长响应函数;  $\theta, \phi$  分别表示传感器的天顶角和方位角,  $\theta, \phi$  分别表示大气下行辐射的天顶角和方位角,  $L_{sun}(\theta, \phi)$  为太阳在大气层顶的辐射亮度,  $t(\theta, \phi)$  为大气在太阳光照射方向的透过率。方程中右边第一项表示地表中红外辐射经大气吸收衰减后到达传感器的辐射,第二项表示大气上行辐射项;第三项表示大气下行辐射项经地表反射后通过大气传输到传感器的辐射;最后一项是太阳辐射经过地表反射对于传感器信号的贡献。

如果将上式简化为经过波段相应函数积和不同角度积分后的表达式,且将大气作用分为向上、向下两个分量,则到达入瞳处的辐亮度  $I_i(\theta, \phi)$  为

$$I_i(\theta, \phi) = L_i(\theta, \phi) + R_{a_i}(\theta, \phi) + R_{s_i}(\theta, \phi) \quad (2)$$

$$L_i(\theta, \phi) = \frac{R_{a_i}(\theta, \phi) + R_{s_i}(\theta, \phi)}{b_i(\theta, \phi, s, s')} + E_i \cos \theta \sin \theta \quad (2)$$

其中:  $L_i$  为地表总辐射;  $R_{a_i}$  为大气自身程辐射;  $R_{s_i}$  为大气散射的太阳辐射;  $T_s$  为地表发射率和地表温度;  $B_i(T_s)$  为根据普朗克定律计算的黑体辐射;  $R_{a_i}$  为下行的大气自身程辐射;  $R_{s_i}$  为下行太阳漫射辐射;  $b_i$  为地表双向反射率;  $E_i$  为大气顶层太阳辐照度;  $\theta, \phi, s, s'$  分别为传感器观测和太阳入射方向的天顶角和方位角。其中直接和大气散射作用相关的辐射项中隐含了交叉辐射,即这些辐射项第一次被大气散射后,一部分直接进入传感器,还有一部分经过邻近像元作用后才进入传感器。

显然,若采用传统的大气辐射传输方程解法(例如 MODTRAN4 中的 N 流近似和离散坐标法等),很难用于大场景范围内逐像元的遥感成像模拟。在充分保证计算精度的前提下,对方程进行一定程度的近似和简化是一种有效手段,且现有的大气成像模拟也均采用此方式来实现;只要建立的解析模型经过验证后符合应用需求的精度即可<sup>[1-3]</sup>。

假设地表为朗伯体,按照图 1 建立相应大气辐射传输解

析模型为

$$L_g = B(T_s) (1 - a) \quad (3)$$

$$L_{pth} = L_{pth0} + g_{pth} a + B(T_{sa}) (1 - a) S_{pth}$$

$$L_{psc} = (L_{psc0} + g_{psc} a) d$$

$$L_{dir} = L_{dir0down} \frac{\cos \theta_{iii}}{\cos \theta_{sz}} b d$$

$$L_{dth} = (L_{dth0down} + g_{dth} a + B(T_{sa}) (1 - a) S_{dth}) S$$

$$L_{dsc} = (L_{dsc0down} + g_{dsc} a) S_{hay} d$$

$$L = L_g + L_{pth} + L_{psc} + L_{dir} + L_{dth} + L_{dsc}$$

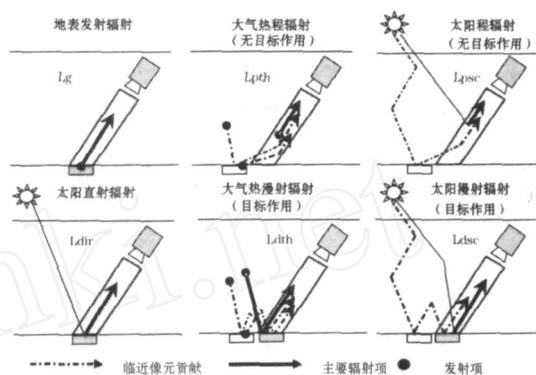


Fig 1 The components of derived from at-sensor total radiance

其中:  $L$  为入瞳处总辐射;  $L_g$  地表发射辐射;  $L_{pth}$  大气热程辐射(含临近像元发射贡献);  $L_{psc}$  太阳散射路径辐射;  $L_{dir}$  直射反射辐射;  $L_{dth}$  大气红外漫射辐射(含临近像元发射贡献);  $L_{dsc}$  太阳散射漫射辐射。  $B(T_s)$  是目标温度为  $T_s$  的热红外辐射;  $B(T_{sa})$  是临近像元平均温度为  $T_{sa}$  时的中红外辐射;  $t$  是从地表到传感器的大气透过率;  $a$  为视场 IFOV 内地表的反射率;  $a$  是视场 IFOV 周围环境像元的平均反射率;  $\theta_{iii}$  是太阳的天顶角;  $\theta_{sz}$  是观测天顶角;  $d$  是天文单位日地平均距离的平方;  $b$  是目标遮挡因子,当地表被遮挡处于阴影内时设为 0,否则,设为 1;  $S$  和  $S_{hay}$  天空观测因子,由观测几何和 DEM 计算得到;  $S_{pth}$ ,  $S_{dth}$  是临近像元发射贡献因子;  $L_{pth0}$  与  $L_{psc0}$  当地表反射率为 0 时在传感器处的中红外和太阳散射路径辐射;  $L_{dir0down}$  是地表的下行直射反射辐射;  $L_{dth0down}$  和  $L_{dsc0down}$  是中红外大气下行漫射辐射和太阳散射漫射辐射;  $g_{pth}$ ,  $g_{psc}$ ,  $g_{dth}$  和  $g_{dsc}$  为反射率线性化因子。通过对现有 MODTRAN4 程序的修改可以直接计算并输出  $L_g$ ,  $L_{pth}$ ,  $L_{psc}$ ,  $L_{dir}$ ,  $L_{dth}$ ,  $L_{dsc}$ , 等分量,模型解算及相关模拟计算都是在此基础上进行。

模型中临近像元平均温度为  $T_{sa}$  和平均反射率  $a$ ,是无法利用 MODTRAN4 计算得到的,需要通过交叉辐射计算得到,而且在成像模拟时,各像元对应的  $T_{sa}$  和  $a$  均不同。所以,邻近像元贡献的计算对实现大气辐射传输模拟也非常关键。关于具体中红外邻近像元效应模型与邻近贡献计算方法,已发表在另外一篇文献<sup>[10]</sup>,在此不再赘述。

## 1.2 模型验证

大气辐射传输解析模型是对复杂的大气辐射传输过程的一种近似。由于其计算过程中受多种因素影响(不同观测几

何、不同大气条件、不同波段范围等), 模型必定存在一定误差; 加之 MODTRAN4 本身也存在一些不足, 最终导致利用解析模型模拟大气辐射传输过程时会带来一定的误差<sup>[11, 12]</sup>。所以, 需要对解析模型的进行相关验证。给定相同的观测几何和大气条件, 分别用解析模型和 MODTRAN4 模拟不同地表发射率/反射率、地表温度下(目标和邻近像元设置相同)的 TOA 处辐射亮度值, 对两种结果进行比较。

图 2 中, 模型误差为解析模型计算值减去 MODTRAN4 计算值, 地表温度设为 300 K, 地表反射率从 0.0~0.9 变化, 根据基尔霍夫定律, 地表发射率 = 1 - 地表反射率, 计算单元为单个波数间隔。可以看出采取单个波数间隔计算, 中红外波段的模型误差很小, 且地表反射率的变化对模型计算精度影响大致相同, 均不超过 ±0.6%。经过对其他影响因素分析后, 模型最大误差接近 0.8%。

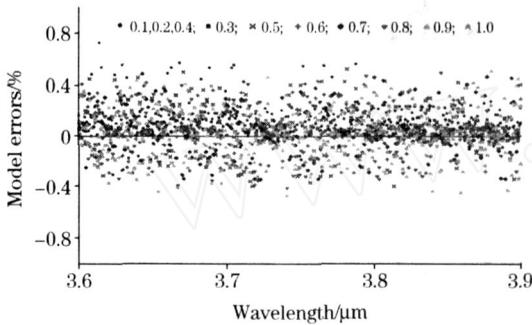


Fig 2 Errors of atmospheric radiative transfer analytic model based on different reflectance

1.3 像元级大气辐射传输成像模拟

为了将上述大气辐射传输解析模型用于逐个像元的成像模拟, 需要根据各个像元输入的大气及观测几何参数进行方程的求解, 显然这样模拟一幅完整的图像要耗费很长时间。所以, 需要根据大气辐射传输解析模型建立不同大气条件、观测几何条件下的 LUT(Look-Up Table)<sup>[13-15]</sup>, LUT 中存储了输入的变量参数和求解得到的方程系数。成像模拟流程图见图 3 所示。

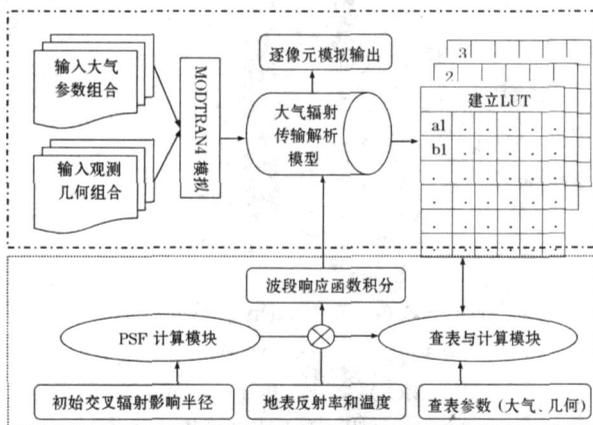


Fig 3 The simulation workflow of pixel atmospheric radiative transfer

本文构造以大气能见度、水汽含量、卫星天顶角及太阳天顶角 4 个变量的查找表(LUT), 相应变量个数为 5, 7, 9, 10, 波段范围(2 550~2 850 波数), 利用奔腾 4 计算机(1.8 G CPU, 512M 内存), 共花费 100 多个机时, 结果文件达到 220M。建立 LUT 后, 只需输入每个像元的 4 个参量, 即可很快检索并插值出所需的方程未知项,  $L_g, L_{pth0}, g_{pth}, S_{pth}, L_{psc0}, g_{psc}, L_{dir\downarrow}, L_{dih0\downarrow}, g_{dih}, S_{dih}, L_{dsc0\downarrow}, g_{dsc}$  及 TOTAL(L) 等, 且全部以单个波数间隔存储。

按照图 3 中下部虚线框内表示的像元级大气辐射传输模拟流程, 其实现步骤为: (1) 给出成像模拟区域的各种输入参数, 关键大气参数和观测几何参数都需要提供像元级的输入, 且空间分辨率与成像模拟要求一致; (2) 根据每个像元所提取出的输入参数组合, 到 LUT 中进行查找并插值, 再进行波段响应积分, 得到大气辐射传输解析方程中各未知项的积分值。利用积分结果按照后面 MODTRAN4 交叉辐射计算方法得到交叉辐射贡献比例  $Q$ ; (3) 调用 PSF 模型, 给定初始交叉辐射影响半径, 并将前面由查表计算得到的相关大气参数(透射率、相关下行辐射项等)一同输入 PSF 模型中, 计算出相应的交叉辐射贡献比例 SUM; (4) 通过改变不同的影响半径, 计算出相应的 SUM。并将获得的 PSF 分布结合输入地表温度、发射率图像, 计算得到相应的邻近地表平均温度、发射率, 再将二者重新带入步骤 2, 重新计算得到  $Q$  值; (5) 通过这种交互式的计算, 直至 SUM 和  $Q$  相等(小于给定的无穷小量时), 得到大气辐射传输解析模型所需的邻近地表平均温度和发射率值; (6) 利用输入的目标像元温度、发射率, 计算得出的邻近区域平均温度、发射率, 重新带入大气辐射传输解析模型, 计算得到像元的 TOA(top of atmosphere) 辐射亮度值。(7) 依次对各个像元重复 1~6 步, 得到完整的大气辐射传输模拟图像。

2 成像模拟试验与分析

设待模拟传感器载荷设置分别为 2 000 探元线阵和 2 000 × 2 000 探元面阵两种, 成像方式分别为线阵推扫和面阵画幅式, 空间分辨率为 10 m。利用 2001 年 4 月 17 日由 AMTIS(airborne multi-angle TIR/ MR imaging system) 获取的北京顺义地区数据, 经过定量反演得到地表发射率和温度产品, 并将其分辨率重采样至星载成像方式下的 10 m, 在此基础上结合同步测量的大气廓线进行大气辐射传输的模拟。最后对模拟结果进行了分析和评价。实际上 AMTIS 只能覆盖待模拟场景范围的 1/4, 文中选取左上角 1/4 区域作为模拟子区, 分别对两种成像方式、不同大气条件、不同观测角度进行了成像模拟。

2.1 两种成像方式模拟结果

设置相同的卫星观测角度( $\theta = 0.5^\circ, \theta = 0.5^\circ, \theta = 0.1^\circ$ ), 分别为卫星观测的 3 个指向角, 即航向偏角、垂直航向偏角和卫星平台旋转角度), 分别采用两种不同的成像方式进行成像模拟, 结果如图 4 所示。

分析得出, 成像方式差异导致各像元观测参量变化, 尤其是观测像元的卫星天顶角变化较大, 由此导致大气辐射传

输各分量变化较大;此外,方位角的变化也有一定影响。TOA 模拟图像差异与相应的卫星观测天顶角差异趋势基本相同。

### 2.2 相同成像方式不同观测角度模拟结果

以画幅式成像为例,在两种不同卫星观测角度下分别模拟 TOA 图像,结果见图 5。同样主要是由于观测几何改变导

致卫星观测像元天顶角变化较大,变化差异达到原始辐射亮度值的 1/10。

### 2.3 不同大气条件模拟结果

选择大气参量中影响较大的大气能见度作为模拟变量,大气能见度由前面的 25 km 调整为 5.0 km,模拟结果见图 6。在两种能见度下,TOA 图像差异变化的量级约为 1/20。

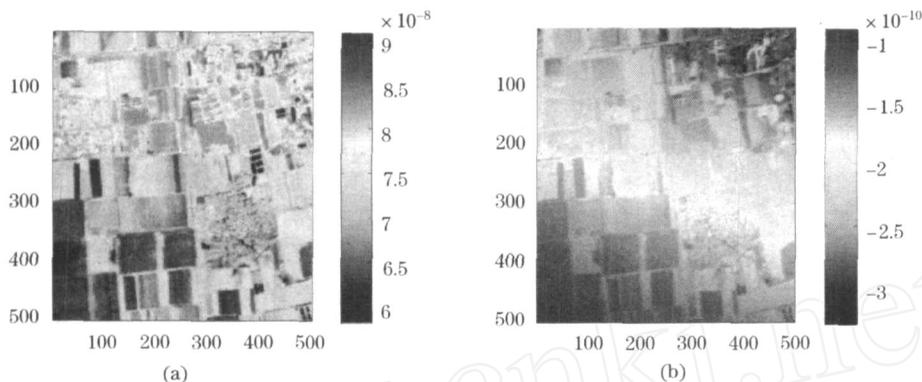


Fig. 4 Difference between these two imaging mode on TOA imagery( $w \cdot sr^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot cm^{-1}$ )  
(a); Results of push mode of CCD line; (b); Difference between push and frame mode

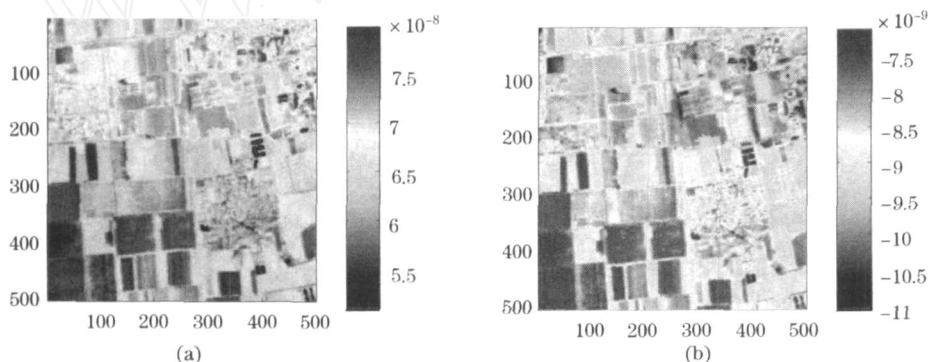


Fig. 5 Simulated TOA images of different view angles under frame imaging mode( $w \cdot sr^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot cm^{-1}$ )  
(a); Off-nadir simulated TOA image; (b); TOA radiance comparing of two view angles

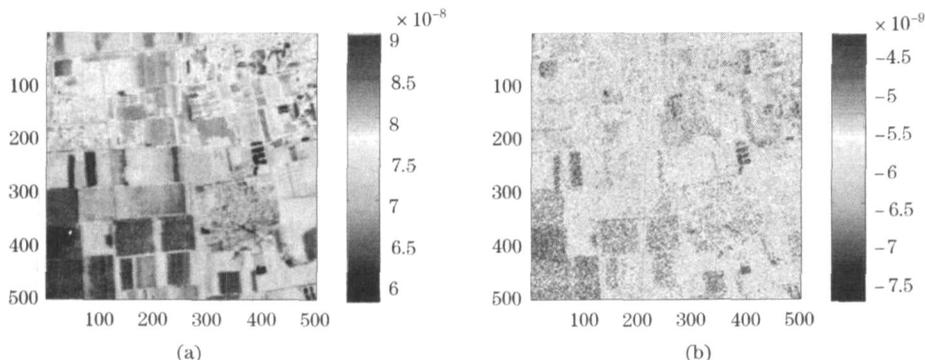


Fig. 6 Simulated TOA images of different visibility ranges under push mode( $w \cdot sr^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot cm^{-1}$ )  
(a); TOA images about different visibility ranges; (b); Results of comparing with TOA images

## 3 结论与讨论

基于大气辐射传输理论,在地表朗伯体假设条件下,建立了中红外大气辐射传输解析模型,模型中充分考虑了邻近

像元效应。并结合 MODTRAN4 建立了不同大气条件、观测几何条件下的查找表,利用 LUT 实现了快速的 TOA 图像模拟,还对模型进行了验证工作,证明模型可以满足成像模拟需求。最后,利用航空获取中红外地表温度和反射率数据,进行了不同条件下的成像模拟。本文主要结论归纳如

下:

(1) 建立的中红外大气辐射传输模型, 充分考虑了地表大气的耦合过程, 抓住了大气辐射传输中的主要因素, 并将大气辐射传输解析模型与邻近效应模型耦合进行成像模拟, 弥补了中红外遥感成像模拟的空缺。

(2) 将邻近像元效应耦合到大气辐射传输解析模型中去, 对开发一套实用、高效的成像模拟工具是非常必要的。

(3) 建立的 TOA 成像模拟流程是切实可行的, 只需提供观测几何、地表和大气参数, 就可模拟出相应的图像, 并基于 VC++ 和 Matlab 开发出了大气辐射成像模拟原型系统 ARTISS (atmosphere radiation transfer imaging simulation

system)。

还有一些问题值得讨论。首先, 模型没有考虑地表的方向性特性。到目前为止, 还没有见到将地表方向性特性直接用于大场景成像模拟的报道。其原因是会导致成像模拟方法变得非常复杂, 计算量将会剧增, 难以具体实施。应该考虑通过其他途径加以解决, 例如建立三维辐射传输模型。其次, 将 TOA 成像模拟与传感器成像模拟结合起来, 才能够为传感器设计提供有效参考, 在后继工作中, 将在此方向开展研究; 并同时考虑地表辐射场景模拟, 建立完整的航天遥感成像模拟系统。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Börner A, Wiest L. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2001, 55(6) : 299.
- [ 2 ] Sadot D, et al. Opt. Eng., 1994, 33(3) : 881.
- [ 3 ] Verhoef Wout, Bach Heike. Remote Sensing of Environment, 2003, 87 : 23.
- [ 4 ] CHEN Liang-fu, ZHUANG Jia-li, XU Xi-ru, et al(陈良富, 庄家礼, 徐希孺, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2000, (4) : 261.
- [ 5 ] Castellur Etchegorry Martin E, Gascon F. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(1) : 73.
- [ 6 ] XIAO Qing, LIU Qin-huo, LI Xiao-wen, et al(肖青, 柳钦火, 李小文, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2005, 9(6) : 3.
- [ 7 ] HU Bao-xin, LI Xiao-wen, ZHU Chong-guang(胡宝新, 李小文, 朱重光). Journal of Image and Graphics(中国图象图形学报), 1996, A1(1) : 19.
- [ 8 ] Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. Modtran4 User's Manual. Air Force Research Laboratory Space Vehicles Directorate. 2000, Air Force Materiel Command, MA 01731-3010.
- [ 9 ] WANG Gang, YU Bing-xi(王刚, 禹秉熙). Journal of System Simulation(系统仿真学报), 2002, 14(6) : 755.
- [ 10 ] LI Yun, ZHANG Tian-xu(黎云, 张天序). Journal of Huazhong University of Science and Technology · Nature Science(华中科技大学学报·自然科学版), 2002, 30(2) : 78.
- [ 11 ] Ientilucci Emmett J, Brown Scott D. Proc SPIE, 2003, 5075 : 110.
- [ 12 ] SANG Nong, CHEN Yan-fei, ZHANG Tian-xu(桑农, 陈艳菲, 张天序). Journal of Huazhong University of Science and Technology · Nature Science(华中科技大学学报·自然科学版), 2005, 33(5) : 55.
- [ 13 ] YANG Gui-jun, LIU Qin-huo, HUANG Hua-guo, et al(杨贵军, 柳钦火, 黄华国, 等). Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报), 2007, 26(1) : 15.
- [ 14 ] YANG Gui-jun, LIU Qin-huo(杨贵军, 柳钦火). Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报), 2007, 27(1) : 10.
- [ 15 ] LU Yong-jun, QU Yan-ling, SONG Min(芦永军, 曲艳玲, 宋敏). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(5) : 877.

# Mid-Infrared Atmosphere Radiation Transfer Analytic Model and Remote Sensing Images Simulation

YANG Gui-jun<sup>1,2</sup>, LIU Qir-huo<sup>2</sup>, LIU Qiang<sup>2</sup>, XIAO Qing<sup>2</sup>, GU Xing-fa<sup>2</sup>, HUANG Wen-jiang<sup>1</sup>

1. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract** In order to establish a complete set of simulation system for high-resolution mid-infrared remote sensing and provide a powerful reference for spacecraft design and related works, the importance of atmospheric radiative transfer simulation in this system was considered, and a reasonable and high precision imaging numerical simulation method was expected. Taking into account the characteristics of MIR, including scattering and thermal emission, terms of atmospheric radiative transfer were decomposed based on radiative transfer principle, and images of top of atmosphere (TOA) were simulated according to MODTRAN4 and look-up table method. Besides, adjacency effect caused by atmospheric scattering of neighboring pixels radiation was considered, and an extended point spread function in mid-infrared was coupled with analytical model of atmospheric radiative transfer to simulate TOA images. Finally, a preliminary test and simulation results show that the simulation model has better accuracy. If parameters of observation geometry and atmosphere were given and the land surface temperature/emissivity was determined, the calculation of pixel-level atmospheric radiative transfer was to be achieved.

**Keywords** Mid-infrared; Imaging simulation; Atmospheric radiative transfer; Analytical model; Adjacency effect

(Received Oct. 20, 2007; accepted Jan. 26, 2008)

## 《光谱学与光谱分析》对来稿英文摘要的要求

来稿英文摘要不符合下列要求者, 本刊要求作者重写, 这可能要推迟论文发表的时间。

1. 请用符合语法的英文, 要求言简意明、确切地论述文章的主要内容, 突出创新之处。

2. 应拥有与论文同等量的主要信息, 包括四个要素, 即研究目的、方法、结果、结论。其中后两个要素最重要。有时一个句子即可包含前两个要素, 例如“用某种改进的 ICP-AES 测量了鱼池水样的痕量铅”。但有些情况下, 英文摘要可包括研究工作的主要对象和范围, 以及具有情报价值的其他重要信息。在结果部分最好有定量数据, 如检测限、相对标准偏差等; 结论部分最好指出方法或结果的优点和意义。

3. 句型力求简单, 尽量采用被动式, 通常应有 2000 个印刷字符, 300 个英文单词为宜, 不能太短; 也不要太长。用 A4 复印纸单面隔行打印。

4. 摘要不应有引言中出现的内容, 换言之, 摘要中必须写进的内容应尽量避免在引言中出现。摘要也不要对论文内容作解释和评论, 不得简单重复题名中已有的信息; 不用非公知公用的符号和术语; 不用引文, 除非该论文证实或否定了他人已发表的论文。缩略语、略称、代号, 除相邻专业的读者也能清楚地理解外, 在首次出现时必须加以说明, 例如用括号写出全称。