

一种高效计算高光谱分辨率红外大气辐射传输的方法

白文广^{1,2}, 张鹏^{2*}, 张文建², 李俊²

(1. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏 南京 210044;

2. 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要:传统的大气辐射传输计算方法受计算资源和效率的限制已无法满足星载高光谱分辨率红外大气遥感资料处理的需要, 基于单色波长辐亮度计算加权组合的方法, 开发了一种快速准确的高光谱分辨率红外大气辐射传输的计算模型 FFRTM_IR. 利用 FFRTM_IR 模型, 针对研制中的 FY-3D 红外高光谱大气探测仪 (HIRAS) 的光谱指标, 模拟计算了仪器的观测通道亮温, 并用独立样本对模拟亮温进行了验证和比较, 结果显示: FFRTM_IR 对 HIRAS 所有通道的模拟亮温偏差均小于 0.06 K, 标准差有效控制在 0.1 K 以内; 在同等计算精度下, FFRTM_IR 的计算速度略快于目前国际上通用的快速辐射传输计算模型 CRTM. 利用 FFRTM_IR 模型, 采用解析计算方法可以进一步得到温度廓线、水汽廓线、二氧化碳、臭氧廓线以及地表参数的雅克比矩阵, 计算结果与扰动法计算结果一致性较好, 有较高的计算精度. 计算和分析结果表明, 初步建立了一种高效的红外大气辐射传输计算模型, 可用于星载高光谱红外大气探测仪器的观测仿真和资料处理.

关键词: 红外大气辐射传输; 高光谱分辨率; 快速计算; 单色波长辐亮度加权

中图分类号: P407.6 文献标识码: A

An efficient method for hyper-spectral infrared atmospheric radiation transfer calculation

BAI Wen-Guang^{1,2}, ZHANG Peng^{2*}, ZHANG Wen-Jian², LI Jun²

(1. School of Atmosphere Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. National Satellite Meteorology Center, Beijing 100081, China)

Abstract: The traditional atmospheric radiative transfer calculation method has been unable to meet the needs of space-borne hyper-spectral infrared atmospheric remote sensing data processing because of the limitation of the computing resources and efficiency. Based on the optimal spectral sampling method, this paper developed a fast and accurate high spectral resolution infrared atmospheric radiative transfer model FFRTM_IR. This model was used to simulate the measurement of hyper-spectral infrared radiance atmosphere sounder (HIRAS) aboard on FY-3D satellite. Independent profiles validation results show that the bias of FFRTM_IR were less than 0.06 K and the standard deviation were no more than 0.1 K for all HIRAS channels. Under the same calculation environment, the speed of FFRTM_IR was slightly faster than the general radiative transfer model, such as CRTM. Along with the FFRTM_IR model, an analytical method was used to drive the temperature, water vapor, carbon dioxide and ozone profiles jacobian matrix, which agree well with results obtained from accurate perturbation method. All these validation and analysis results showed that the developed initial efficient infrared atmospheric radiative transfer model can be used in space-borne hyper-spectral infrared atmospheric sounding instrument simulation and data processing.

Key words: infrared radiation transfer, hyper-spectral resolution, fast radiative transfer algorithm, optimal spectral sampling

收稿日期: 2015-03-20, 修回日期: 2015-05-13

Received date: 2015-03-20, revised date: 2015-05-13

基金项目: 基于静止卫星组网观测估算全球主要沙漠沙尘排放量 (41475031)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (41475031)

作者简介 (Biography): 白文广 (1982-), 男, 河北石家庄人, 助研, 硕士, 主要从事大气辐射传输相关研究. E-mail: baiwg@cma.gov.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: zhangp@cma.gov.cn

PACS: 42. 68. Ay, 92. 60. Vb

引言

红外大气探测是气象卫星使用的一项传统技术,主要利用红外二氧化碳吸收谱线和水汽吸收谱线获取大气温度和湿度的垂直廓线信息^[1]. 进入上个世纪九十年代,随着数值预报卫星资料同化技术的发展和全球大气成分观测的需求,美国和欧洲气象卫星组织先后研制了红外高光谱大气探测仪器,并投入业务应用,如美国 2002 年发射的 AQUA 卫星上的大气红外探测仪 AIRS^[2]、欧洲 2006 年发射的 METOP 卫星上的高光谱红外干涉探测仪 IASI^[3]、美国 2011 年发射的 Suomi NPP 卫星上的红外高光谱干涉仪 CrIS^[4]等. 传统的红外大气辐射计算方法受到计算资源和计算效率的限制,已无法满足星载高光谱分辨率红外大气遥感资料处理的需要. 为此欧美科学家提出了快速大气辐射传输计算的概念^[5],并组织开发了目前国际上通用的快速大气辐射传输计算模型,如 RTTOV 和 CRTM^[6-7].

我国自第二代极轨气象卫星风云三号 A 星 (FY-3A) 上开始利用滤光片式红外大气探测仪 IRAS 进行红外大气探测^[8],在后续的第四颗卫星风云三号 D 星 (FY-3D) 将装载干涉式高光谱红外大气探测仪 HIRAS,实现红外波段的高光谱观测,最高光谱分辨率可达 0.625 cm^{-1} . 此外,我国还计划于 2017 年左右发射的静止卫星风云四号上装载红外高光谱探测仪器,提供高时间分辨率的红外大气探测信息^[9]. 在大气辐射传输理论和计算方面,国内也开展了一些工作^[10-12],但是在面向实际应用的快速、高效的辐射传输计算方法方面,国内的工作还不多见.

红外大气辐射传输计算的核心是透过率的计算. 对于红外波段的大气透过率计算,吸收气体在每个吸收带均包含了大量的独立吸收谱线,每个吸收线形状随大气高度的气压变化均产生变化,因此红外波段气体吸收的计算是非常繁杂和耗时的一项工作. 大气红外辐射传输计算中,最准确的方法是采用逐线积分 (Line By Line) 的方式,即计算给定波数区间内所有吸收线的贡献,其计算精度可以达到 0.5%^[13]. 美国 AER 公司的 LBLRTM、哈佛大学的 Anu Duhdia 开发的 RFM^[14]、法国 LMD 实验室和 NOV-ELTIS 公司联合开发的 4A 模式^[15]以及卡尔斯鲁厄气象气候研究所开发的 KOPRA^[16]等都采用逐线积

分的方式实现高光谱红外辐射传输的计算,具有较高的精度. 国内石广玉、张华等开发的 ZS2000 实现了非常高的计算精度^[10-11],已经广泛应用于气候模式的辐射研究. 虽然目前计算机已达到很高的计算速度,使得用逐线积分方法计算某一吸收气体很宽波段的吸收系数成为可能,但计算量巨大而需要消耗大量计算时间,不适用于卫星遥感数据处理业务运行的时效需求^[17].

在大气透过率的计算中最耗时的莫过于吸收系数的计算,根据实际应用的需求,科学家提出了多种快速红外透射率计算方法. 其中带模式是简化谱透射率的传统方法,假定光谱区间内的吸收线服从某种分布,从而整个区间的气体吸收可以依据平均线强和平均半宽采用简单的统计公式计算得到,如单线模式、规则带模式、随机带模、Malkmus 带模式等^[1]. 带模式主要用于气候系统模式中的辐射过程计算,可以较好的计算均匀路径下的气体吸收,处理非均匀路径需等效为均匀路径,无法充分考虑非灰大气吸收中压力造成的影响^[18],处理多次散射问题遇到困难. 最近十几年,气候模式中多使用 K 分布和相关 K 分布方案处理辐射过程^[19-23]. K 分布方案可以同时考虑气体非灰吸收、云和气溶胶吸收散射作用的问题,相关 K 分布则将 K 分布方法延伸到非均匀路径的计算. K 分布方案基于光谱区间内的平均透射率与特定吸收系数 k 在区间内出现的具体位置没有关系,而是与吸收系数在 $k-k+dk$ 之间所出现的频率有关这一基本事实,通过积分转换用有限几项来表示积分结果,简化计算并提高了效率^[24-25].

随着卫星红外被动遥感技术的发展,特别是卫星红外高光谱仪器的发展,卫星通道的辐射传输模拟需要考虑通道响应函数内谱线以及谱线展宽的总吸收,K 分布方案在实际大气计算中需要引入非均质层相关性假设,其精度尚不能满足红外高光谱通道辐亮度计算的需求^[23]. 目前国际上,为满足实时卫星数据处理高精度、高时效的工程需求,数值同化业务系统中辐射传输计算通常采用了 OPTRAN 的大气透射率快速计算方案^[26-27]. 例如欧洲预报中心开发的 RTTOV^[6],美国大气海洋管理局 (NOAA) 开发的 CRTM^[7]等. OPTRAN 方案的基本原理是,基于典型大气廓线库的大气透射率的逐线积分计算结果,建立卫星仪器通道透射率与大气状态、观测几何

条件等预报因子的统计关系. OPTRAN 方案的优点是通过统计回归和预报实现大气透射率计算, 计算效率非常高, 计算精度有保证, 同时该快速透射率计算方案可以方便的用于云、气溶胶简化散射模型的快速处理. 但实际计算过程中预报因子的选择依赖于经验, 并且在复杂吸收波段(如臭氧 9.6 μm 波段, 15 μm 的 CO_2 吸收带)计算精度有限. 文献[28, 29]中提出了基于单色波长辐亮度加权组合的快速辐射方法(OSS), 基本原理是通过对卫星观测通道光谱响应波段内单色波长逐线计算结果权重组合, 得到该通道辐亮度计算结果. 建立在统计方法上的 OSS 方法, 实际计算中计算效率较高, 且在复杂吸收波段通过单色波长逐线计算节点的自适应调整, 可以实现较高的计算精度. 目前 NOAA 官方 CrIS 反演产品的处理将采用 OSS 方法进行正演计算^[30]. 该方法直接进行单色波长逐线积分辐亮度的加权组合, 避开了卫星仪器通道大气透射率的快速计算, 在晴空处理中比较有效. 本研究将尝试将这种新的计算方法应用于正在研制中的 FY-3D 红外高光谱大气垂直探测仪的高精度辐射传输模拟, 并利用独立廓线逐线积分结果对模拟的辐亮度观测、大气和地表参数的各类雅克比矩阵进行检验和验证, 分析计算的精度和速度, 对该方法在高光谱红外对地观测数据处理的应用前景进行深入研究.

1 红外大气辐射传输的快速计算

1.1 单色的红外辐射传输及雅克比方程

晴空无散射条件下, 忽略太阳辐射作用, 大气顶向上红外单色大气辐射传输计算, 离散化表示为:

$$R_v = \sum_{i=1}^N (T_{v,i-1} - T_{v,i}) B_{v,i} + \varepsilon_{\text{ts}} T_{v,N} B_{v,s} + (1 - \varepsilon_{\text{ts}}) T_{v,N} \sum_{i=1}^N (T_{v,i}^* - T_{v,i-1}^*) B_{v,i}, \quad (1)$$

其中 R_v 表示大气顶观测辐亮度, v 表示频率, i 表示层数, $B_{v,i}$ 表示第 i 层大气普朗克函数, $B_{v,s}$ 表示地表大气普朗克函数, ε_{ts} 为地表发射率, $T_{v,N}$ 为传输路径上地表到大气顶的透射率, $T_{v,i}$ 和 $T_{v,i}^*$ 分别为传输路径上大气顶以及地表到第 i 层大气透射率, N 为总大气分层数(第一层为大气顶, 第 N 层为大气底层). 对于卫星遥感, 在利用公式(1)开展辐射传输正演模拟的同时, 还要对大气辐射对各种变量的变率进行计算, 获得雅克比方程以进行遥感反演敏感性分析. 从式(1)分别对大气温度、湿度、吸收成分

廓线以及地表参数(地表温度和地表发射率)取偏微分, 可以得到相应参数的雅克比矩阵表示为:

$$\frac{\partial R_v}{\partial X_l} = \frac{\partial \tau_{v,l}}{\partial X_l} \left\{ [T_{v,l} B_{v,l} + \sum_{i=l+1}^N (T_{v,i} - T_{v,i-1}) B_{v,i} - T_{v,N} \varepsilon_{\text{ts}} B_{v,s} - (1 - \varepsilon_{\text{ts}}) T_{v,N} \sum_{i=1}^N (T_{v,i}^* - T_{v,i-1}^*) B_{v,i}] \sec \theta_{\text{obs}} + [(1 + \varepsilon_{\text{ts}}) T_{v,N} T_{v,l-1}^* - (1 - \varepsilon_{\text{ts}}) T_{v,N} \sum_{i=1}^{l-1} (T_{v,i}^* - T_{v,i-1}^*) B_{v,i}] \sec \theta_d \right\}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial R_v}{\partial \Theta_l} = \frac{\partial B_{v,l}}{\partial \Theta_l} (T_{v,i-1} - T_l) + (1 - \varepsilon_{\text{ts}}) T_{v,N} \frac{\partial B_{v,l}}{\partial \Theta_l} (T_{v,i}^* - T_{v,i-1}^*), \quad (3)$$

$$\frac{\partial R_v}{\partial \Theta_s} = \varepsilon_{\text{ts}} T_{v,N} \frac{\partial B_{v,s}}{\partial \Theta_s}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial R_v}{\partial \varepsilon_{\text{ts}}} = T_{v,N} B_{v,s} - T_{v,N} \sum_{i=1}^N (T_{v,i}^* - T_{v,i-1}^*), \quad (5)$$

$\frac{\partial R_v}{\partial X_l}$, $\frac{\partial R_v}{\partial \Theta_l}$, $\frac{\partial R_v}{\partial \Theta_s}$ 和 $\frac{\partial R_v}{\partial \varepsilon_{\text{ts}}}$ 分别表示辐射量对吸收成分大气廓线、温度廓线、以及地表温度、发射率的雅克比矩阵. l 表示层数, $B_{v,l}$ 表示第层大气普朗克函数, $T_{v,l}$ 和 $T_{v,i}^*$ 分别为传输路径上大气顶以及地表到第 l 层大气透射率, X_l 表示第 l 层各大气成分廓线浓度; $\tau_{v,l}$ 表示第 l 层的光学厚度, θ_d 和 θ_{obs} 分别表示向下辐射以及观测角度; Θ_l 表示第 l 层大气温度; Θ_s 表示地表温度. 为了计算方便以及计算效率的提高, 式(3)中忽略了因温度变化造成的光学厚度变化即 $\frac{\partial \tau_{v,l}}{\partial \Theta_l}$. 本文中采用式(2~5)中解析的方法进行雅克比矩阵计算, 并与逐层扰动方法计算结果比较进行验证.

1.2 通道带宽的红外辐射传输快速计算

卫星观测的通道辐亮度可以表示为单色辐亮度与该通道光谱响应函数的卷积:

$$\bar{R} = \int_{\Delta v} \phi(v) R_v dv / \int_{\Delta v} \phi(v) dv, \quad (6)$$

$\phi(v)$ 表示通道光谱响应函数; \bar{R} 表示通道观测辐亮度; v 表示带宽. 卫星通道辐亮度计算需要引入逐线计算光谱积分, 计算量太大, 实际计算中常采用参数化的快速辐射计算, 解决光谱积分问题.

通道有效光学厚度参数化的计算方案(如 OPTRAN)引入卫星仪器通道的平均透射率概念, 表示为单色逐线透射率与光谱响应函数的卷积:

$$\bar{T} = \int_{\Delta v} \phi(v) T_l dv / \int_{\Delta v} \phi(v) dv, \quad (7)$$

\bar{T}_l 表示通道平均透射率. 在此基础上对通道有效光

学厚度进行参数化,表示为:

$$\tau_{eff}(l) = -\ln \frac{\bar{T}_l}{T_{l-1}} = \sum_{j=1}^n a_{jl} X_{jl} \quad , \quad (8)$$

τ_{eff} 为通道有效光学厚度, a_{jl} 为统计系数, X_{jl} 为预报因子, n 表示预报因子个数.建立通道有效光学厚度与大气状态、观测几何条件等预报因子的统计关系,从而每个通道只需进行一次常规辐射传输计算,避免了逐线光谱积分.该方法计算效率较高,已广泛应用于 HIRS、AIRS、IASI 等卫星红外仪器的快速辐射模拟.但该方法需要对宽带通道进行亮温的普朗克订正^[31],且不同通道预报因子的选择复杂,回归结果仍存在数值不稳定的危险.在 9.6 μm 臭氧、15 μm CO_2 复杂吸收带表现并不理想^[27].

另外一类快速辐射传输算法直接对通道透过率参数化,表示为单色辐射透过率的权重组合:(如相关 K 分布方法(CKD)、指数求和拟合透过率(ESFT)方法等).

$$\bar{T}_l \cong \sum_{i=1}^N T_{v,l} W_i \quad , \quad (9)$$

W_i 表示单色频率 v 处透射率权重系数, $T_{v,l}$ 为单色透过率, N 为总个数. CKD 和 ESFT 方法在单一大气层,单一吸收气体辐射传输计算中精度较高.实际大气辐射传输计算时,需要引入通道透射率在垂直层之间(不同压强、温度层)的很好相关性以及重迭吸收气体非相关的假设,计算精度受到很大限制.

1.3 基于单色波长辐亮度加权的计算方案

单色波长辐亮度加权组合算法的基本原理是假设卫星仪器通道的辐亮度可以表示为该通道光谱响应函数内某些单色逐线计算辐亮度的权重组合,表示为:

$$\bar{R} \approx \sum_{i=1}^N W_i R(v_i) \quad , \quad (10)$$

即卫星通道量辐亮度表示为该通道响应函数内 N 个单色波长辐亮度 $R(v_i)$ 的权重组合,权重系数为 W_i .单色波长辐亮度加权组合算法直接利用单色波长辐亮度拟合通道辐亮度,一方面避免了逐线积分,另一方面避免了通道有效透射率在垂直层之间(不同压强、温度层)的很好相关性以及重迭吸收气体非相关的假设.与 K 分布方法相比,该方法不需要对组合节点的吸收系数选择,仅需要确定合适频率节点及其对应吸收系数组合.其优势是避免了 K 分布方法中需要得到每种吸收成分吸收系数在所有层分布函数的问题,具有更强的可操作性,实际操作中容易根据计算精度的要求进行单色波长选择.此

算法弱化了 K 分布方法中明确的积分转化物理概念,具体频点组合及其权重计算需要建立在典型大气数据库统计基础上.相应卫星通道大气、地表参数雅克比矩阵可以采用相同的权重系数对式(2-5)加权组合得到.

1.3.1 光谱积分和单色波长权重系数确定

如式(10),单色波长辐亮度加权组合算法重点需要进行单色波长选择及其权重系数的统计计算.常用的大气典型廓线库有欧洲预报中心的 ECMWF 83 条廓线库,马里兰大学的 UMBC 48 条廓线库,数据库大气分层为典型 101 层,基本覆盖全球真实大气状态的变化.将 ECMWF 83 条廓线库作为基础训练库,UMBC 48 条廓线库为独立检验大气数据库.为覆盖实际卫星观测角度路径情况,基于 LBLRTM 计算 ECMWF83 条廓线在 5 个观测角度(0.0°, 36.87°, 48.19°, 55.15°以及 60.0°)下的逐线单色波长辐亮度,每条廓线的地表发射率由 0.85 ~ 1.0 随机产生,地表压强由 850 ~ 100 pHa 之间随机产生,总共形成 415 个统计样本.为了满足实际大气廓线观测不平滑的特性,大气温度廓线以及主要大气成分廓线每层含量随机加入平均值 5% 的随机波动.

权重计算中对卫星仪器通道逐一考虑,假设该通道辐亮度可以表示为该通道光谱相应函数内个单色波长逐线积分辐亮度(记为)权重组合,基于训练数据库可以得到矩阵方程:

$$AW' = B \quad , \quad (11)$$

其中 A 代表训练库 415 条廓线 N 个单色波长逐线积分节点辐亮度矩阵(维数为 $415 \times N$); W' 为该通道 N 个单色波长权重值向量; B 为训练库卫星通道条廓线辐亮度向量.在单色波长组合确定的情况下,可以通过线性最小二乘法得到超定方程组(10)的解,即该通道各单色波长权重系数值.训练库权重组合计算结果均方根误差可以表示为:

$$\epsilon_N = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{s=1}^S [\bar{R}_s - \sum_{i=1}^N w_i R_s(v_i)]^2} \quad , \quad (12)$$

S 代表样本数, \bar{R}_m 表示第 m 个样本的卫星通道量辐亮度, $R_m(v_i)$ 表示第 m 个样本在频率 v_i 处的辐亮度, W_i 为权重系数,均方根残差 ϵ_N 可以做为精度判断的标准,指导和限定 ξ_n 组合的选择,实现计算精度的要求.该方法可以方便的设定模型计算精度,并根据计算精度进行不同的单色波长组合方式,有较高的灵活性.理论上同一精度下复杂吸收波段将需要较多的单色计算波长进行组合,在不考虑组合单色波长个数的情况下,该方法可以得到高精度计

算结果,在极限推广下,选择通道光谱响应函数下所有逐线单色波长作为组合,则相当于响应函数的作用,计算结果可以实现逐线积分计算的精度。

在实际辐射传输计算中,需要在满足计算精度的要求下尽量减少组合的单色波长数目,以提高计算效率,满足实际卫星数据处理快速计算的要求。对每一通道逐线单色波长最优组合的选择,通常有三种办法:全局搜索法,逐一单色权重最大增加法和蒙特卡罗实验法。其中全局搜索法理论上可以得到最少的满足计算精度的单色波长组合,但该方法需要群举所有可能的单色组合,因选择太多而计算量太大,不适用于实际计算。逐一单色权重最大增加法原理是逐一增加权重最大的单色波长,保证每一新节点的增加都实现最大程度地减小值。该方法的优点是每一新单色波长的加入都能满足收敛性要求,逐步减小训练库的值,但该方法容易造成局地最小化,从而引入具有重复信息的节点组合。蒙特卡罗实验法是在逐一单色权重最大增加法的基础上,增加新加单色波长选择的随机性(较小几率引入非收敛性节点),实现一定程度避免局地最小化。该方法存在增加节点非收敛的问题,需要大量计算波长的试验,并且对于卫星不同带宽的通道,需要设置的试验次数不同,实际操作过程依赖于经验和多次测试。本研究在逐一单色权重最大增加法基础上,采用最大化重复通道的使用并剔除重复信息节点的方式,减少总体单色波长计算数目来实现较高的计算效率。实际计算过程中,对每一通道的单色波长选择尽量选择前一通道相同的计算波长(相邻通道高光谱光谱响应函数存在交叉)进行处理,并剔除实际计算中负值节点重新选择单色计算,有效避免重复信息的引入。该方法保留了逐一单色权重最大增加法节点增加的收敛特性,快速实现不同通道满足计算精度要求单色波长组合的选择,同时避免部分重复信息的引入,减少了总计算单色波长数,有效提高计算效率。

1.3.2 单色波长吸收系数、光学厚度快速计算

在 2.3.1 的基础上,快速辐射传输需要对选择的单色波长进行光学厚度的计算:

$$\tau_l = \tau_w + \sum_M \tau_m = (k_w^* + \bar{q}_w \delta k_w) u_w + \sum_M k_m u_m \quad (13)$$

τ_l 表示第 l 层光学厚度, M 表示考虑的干空气种类数, τ_w 和 τ_m 分别表示第 1 层光学厚度水汽以及干空气吸收成分 m 的光学厚度; u_w 和 u_m 分别表示该

层水汽和吸收成分 m 的浓度; k_m 为吸收成分 m 的吸收系数; \bar{q}_w 表示该层水汽混合比浓度; k_w^* 和 δk_w 分别表示水汽吸收系数随水汽混合比变化线性拟合截距和斜率。水汽光学厚度的计算与其它吸收成分有所不同,主要是考虑水汽连续吸收的影响,假定其随水汽混合比浓度呈线性关系,此假定会造成单色逐线计算水汽吸收线中心以及翼区的计算误差,但随着仪器函数卷积的作用对卫星通道辐亮度的影响并不明显。公式(13)中干空气二氧化碳吸收系数是分子吸收和连续吸收的贡献之和,均匀混合气体氮气(连续吸收波段 2 085 ~ 2 670 cm^{-1})和氧气(连续吸收波段 1 340 ~ 1 850 cm^{-1})的吸收系数主要是连续吸收的作用。

红外波段水汽只通过其含量影响干空气光学厚度,仅考虑单色节点吸收系数与温度、压强关系。为了提高该方法计算的速度,可以提前利用 LBLRTM 逐线积分模式建立单色节点各成分(k_m, k_w^* , 以及 δk_w)在辐射传输所有压强层以及不同温度下(本文采用 10 个温度值,覆盖尽可能的温度变化)的查找表。实际计算中在温度 Θ 在区间 $[(\Theta_{i+1} + \Theta_i)/2, (\Theta_{i+1} + \Theta_i)/2]$ 的吸收系数 $k(\Theta)$ 可以通过 3 点拉格朗日插值得到:

$$k(\Theta) = \frac{(\Theta - \Theta_i)(\Theta - \Theta_{i-1})}{(\Theta_{i-1} - \Theta_i)(\Theta_{i-1} - \Theta_{i+1})}(k_{i-1} - k_{i+1}) + \frac{(\Theta - \Theta_i)(\Theta - \Theta_{i+1})}{(\Theta_i - \Theta_{i-1})(\Theta_i - \Theta_{i+1})}(k_i - k_{i+1}) + k_{i+1} \quad (14)$$

Θ_i 表示第 i 个温度值, k_i 表示第 i 个温度值处的吸收系数。研究表明因温度插值造成的误差小于 0.05 K^[28]。

2 针对 FY-3D HIRAS 的观测亮温模拟及精度检验

2.1 FY-3D HIRAS 光谱参数介绍

FY-3D 上将搭载有红外高光谱大气探测仪(HIRAS),仪器采用迈克尔逊干涉的方式实现红外波段的高光谱探测。探测波段为长波 650 ~ 1 136 cm^{-1} ,光谱分辨率 0.625 cm^{-1} ;中波 1 210 ~ 1 750 cm^{-1} ,光谱分辨率 1.25 cm^{-1} ;短波 2 155 ~ 2 550 cm^{-1} ,光谱分辨率 2.5 cm^{-1} 。总共通道数达 1 370 个。其中长波波段覆盖 11 μm 的大气窗区,15 μm 二氧化碳吸收带以及 9.6 μm 臭氧吸收带;中波波段主要是水汽吸收作用,短波波段主要存在二氧化碳、水汽吸收。该仪器将提供丰富的大气、地表参数的高光

谱观测信息,有利于提高大气、地表参数的定量反演精度,改进数值预报精度。

2.2 FFRTM_IR 快速辐射计算模型

针对 HIRAS 光谱波段、分辨率以及傅里叶变换的数据处理方式,将 1.3 节中介绍的单色波长辐射量权重组合的方法应用于该红外高光谱仪器的快速辐射传输模拟,开发了 FFRTM_IR (Fengyun Fast Radiation Transfer Model) 模型。该模型采用固定气压分层的方式将 1 100 ~ 0.005 hPa 大气分成 101 层,与 1.3 中典型廓线库大气分层相同。每层气压值为:

$$P_{lev}(i) = (Ai^2 + Bi + C)^{7/2}, \quad (15)$$

其中 i 表示层数, P_{lev} 表示第 i 层气压值, A 、 B 、 C 为常数,通过 $P_{lev}(1) = 1\ 100$, $P_{lev}(38) = 300$ 和 $P_{lev}(101) = 0.005$ 来确定。该分层方式能够保持层与层之间光学厚度的平滑变化,并有效减小由于辐射传输计算的离散化引入的误差^[27]。

考虑到 HIRAS 光谱波段和光谱分辨率设计, FFRTM_IR 同时考虑了六种主要大气成分 (H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 N_2O 、 CO 、 CH_4) 的吸收作用以及 H_2O 、 O_2 和 N_2 的连续吸收作用。针对该傅里叶变换的数据处理方式,在 1.3.1 的典型数据库生成中,先利用 LBL-RTM 逐线积分计算辐亮度,经过傅里叶变换还原成干涉图,经 Blankman-Harry 切趾函数切趾后做傅里叶逆变换得到该仪器通道辐亮度。有研究表明,Blankman-Harry 的切趾函数能够有效保留光谱中的有用信息^[30]。

根据 1.3 的计算方案, FFRTM_IR 主要分为两个独立部分:针对仪器光谱特性的系数生成模块和辐射传输计算模块。系数生成模块针对 HIRAS 仪器参数,利用训练数据库计算选择通道单色波长位置及相应权重系数,同时生成六种大气成分吸收系数查找表文件;辐射传输模块根据第一部分生成的 HIRAS 系数文件信息进行单色辐射传输以及雅克比矩阵计算,并加权组合单色波长计算结果得到 HIRAS 通道辐亮度以及相关参数雅克比矩阵。其中第一部分利用 LBLRTM 生成针对 HIRAS 的 415 条廓线亮温模拟数据库,在逐一单色权重最大增加法的基础上优先选择相邻通道相同单色计算节点,并根据式(11-12)进行通道单色节点组合的尝试,同时计算数据库亮温残差。多次实验给出满足计算精度需求的最少节点组合以及对应的权重值。同时将选择的单色波长处的六种大气成分不同温度状态下的吸收系数进行保存,生成吸收系数查找表文件。第二部分在针对 HIRAS 各通道辐射量计算单色波长选

择、权重系数以及大气成分吸收系数计算的基础上,利用式(14)可得到单色波长处的单色光学厚度,根据式(1-5)、(10)可计算得到 HIRAS 通道辐亮度以及相关参数雅克比矩阵。两个部分相互独立, FFRTM_IR 采用此种框架设计易于进行其它类似仪器模拟的扩展。图 1(a)为利用 FFRTM_IR 计算得到的 FY-3D HIRAS 观测角 36.87° 下的仪器观测模拟亮温。4 种典型大气廓线分别为热带、中纬度夏季、中纬度冬季和极地夏季,地表压强分别为 1 070、777.8、986.1 和 827.4 hPa,地表发射率分别为 0.88、0.86、0.82 和 0.96,地表温度分别为 263.194、312.596、265.666 和 295.113 K。图中可以清楚看到 $15\ \mu\text{m}$ 二氧化碳、 $9.6\ \mu\text{m}$ 臭氧、 $6.7\ \mu\text{m}$ 水汽等吸收带以及 $11\ \mu\text{m}$ 窗区波段。图 1(b)为对应通道单色波长数目的选择情况,红色点代表每个通道实际需要的单色波长数,绿色点代表去重复后每个通道所需要的平均单色波长数(辐射传输模拟精度为 0.1 K)。可以看到,复杂吸收通道如 $15\ \mu\text{m}$ 、 $9.6\ \mu\text{m}$ 波段需要较多的单色节点计算,而 $11\ \mu\text{m}$ 窗区通道由于吸收简单,较少的单色波长组合即可满足计算精度,与理论分析一致。通道去重复后,通道平均单色波长数由 8.67 减为 4.94,大大提高了计算效率。

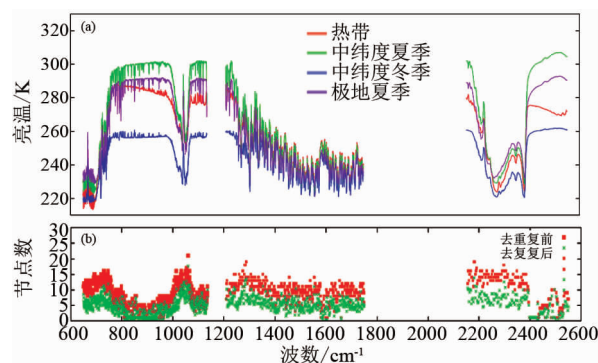


图 1 FFRTM_IR 模拟红外高光谱大气探测仪观测, (a) 模拟亮温; (b) 单色节点

Fig. 1 HIRAS measured bright temperature simulation by FFRTM_IR, (a) bright temperature simulation; (b) nodes number using

2.3 FFRTM_IR 亮温模拟精度检验

利用 1.3.1 中生成的 UMBC 48 条独立数据库对 FFRTM_IR 快速计算结果进行检验,结果如图 2 所示。(a)、(b)、(c) 分别代表卫星观测角 0.0° 、 36.87° 和 48.19° 验证结果,横坐标为波数,纵坐标为 FFRTM_IR 计算结果与逐线计算结果的标准差。三个角度验证结果显示:除个别通道外,亮温偏差均小于 0.06 K,标准差基本控制在 0.1 K 以内,且模拟精

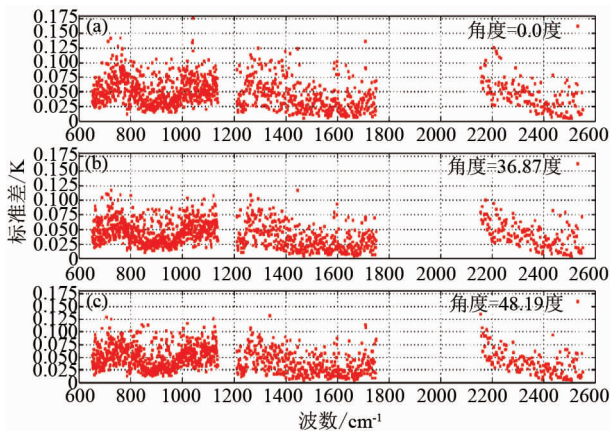


图2 FFRTM_IR 模拟亮温精度检验, (a)扫描角:0.0°, (b)扫描角:36.87°, (c)扫描角:48.19°

Fig. 2 Validation of FFRTM_IR bright temperature simulations. The scan angle is (a) 0.0°, (b) 36.87°, and (c) 48.19°, respectively

度受扫描角度影响不明显. 11 μm 窗区绝大部分通道标准差小于 0.05 K, 模拟精度略高于二氧化碳、臭氧、水汽等复杂吸收波段; 中波 1 210 ~ 1 750 cm^{-1} 波段(6.7 μm 水汽吸收带)大部分通道精度优于 0.075 K, 1 210 ~ 1 400 cm^{-1} 波段个别通道模拟精度略差(略高于 0.1 K); 9.6 μm 臭氧以及 15 μm 、4.3 μm 二氧化碳强吸收带通道标准差基本在 0.025 到 0.1 K 之间; 微量成分氧化亚氮基带(1 284.91 cm^{-1})、基带(2223.76 cm^{-1})以及甲烷的基带(1 310.76 cm^{-1})各通道模拟满足 0.1 K 精度要求. 图 2 中 FFRTM_IR 各通道模拟精度与图 1 中平均通道单色波长的个数分布基本一致, 即复杂吸收通道, 需要较多的单色波长组合且拟合偏差较大. 理论上, FFRTM_IR 模拟误差来源主要有两个方面: 吸收系数插值误差和单色波长辐射量组合权重拟合的误差. 其中吸收系数插值误差可以通过增加查找表温度节点减小, 单色波长组合权重拟合偏差可以通过增加组合单色波长数减小. 两种策略势必增加计算量, 降低计算效率. FFRTM_IR 单色波长辐射量加权组合的快速辐射传输计算方法, 具有很好的灵活性, 可以根据实际计算时效对计算精度进行调整. 将来根据高信噪比卫星观测仪器的发展以及大气微量成分混合比高精度的反演需求, 可以通过增加相应通道单色波长节点数目来实现更高的计算精度.

3 针对 FY-3D HIRAS 的雅克比矩阵的计算精度验证

3.1 主要大气参数廓线雅克比矩阵计算及检验

红外辐射传输大气廓线雅克比矩阵精确计算, 需要采用逐层扰动的方法. 该方法需要多次进行辐射传输计算, 效率太低. 根据 1.1 节中辐射传输理论分析, FFRTM_IR 采用解析的方法进行计算. 如图 3 为 FFRTM_IR 解析法与扰动法计算温度、水汽、臭氧和二氧化碳廓线雅克比比较(图示采用了热带标准廓线, 地表发射率 0.88, 卫星观测角 36.87°). 实线为解析法计算结果, 圈线为扰动法计算结果, 不同颜色表示对不同通道的计算结果. 总体上, FFRTM_IR 解析法计算与扰动法计算结果一致性较好, 能够很好的得到卫星观测值对大气参数廓线的敏感性变化. 根据文献[32-33], 可以用值的方法对解析法雅克比的计算精度进行验证. 值可以表示为:

$$M = 100 \times \sqrt{\frac{\sum (J_i - J_i^{ref})^2}{\sum (J_i^{ref})^2}} \quad (16)$$

其中, J_i 代表在 i 层的雅克比值; J_i^{ref} 表示层的精确值, 本研究采用 FFRTM_IR 扰动计算的结果. $M < 5$ 是非常好的计算, $5 < M < 15$ 是比较好的结果, $5 < M < 25$ 是比较正常的结果, 当 $M > 25$ 时认为偏差较大, 计算存在问题.

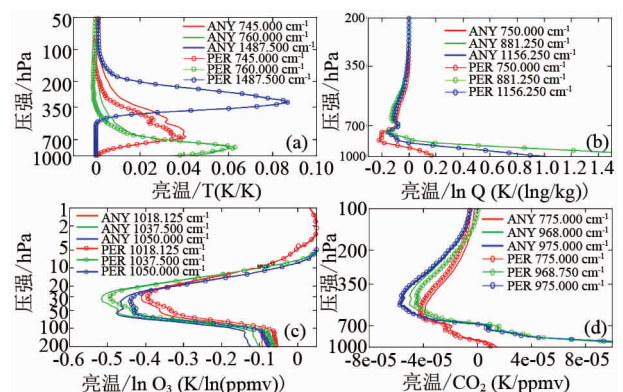


图3 FFRTM_IR 雅克比计算比较, (a)温度; (b)水汽; (c)臭氧; (d)二氧化碳

Fig. 3 Validation of FFRTM_IR Jacobian matrix simulations. (a) Temperature, (b) Water Vapor, (c) Ozone, (d) CO_2

图 4 给出了现代数值同化预报常用的 9 个通道(793.75、871.25、1 074.4、1 322.5、1 331.2、1 427.5、1 543.8、1 563.8 和 1 576.2 cm^{-1}) M 值在 UMBC 48 条独立廓线上的计算结果. 图 5(a)、(b) 分别为温度廓线和水汽廓线的 M 值. 验证结果显示: 对于温度廓线雅克比的 M 值, 除 793.75、1 322.5 cm^{-1} 通道在个别廓线处略高外(小于 20), 其它通道 M 值均控制在 5 以内, FFRTM 解析法温度廓线雅克比计算结果非常理想, 与扰动法计算结果一致性非常好; 对

于水汽廓线雅克比的值,除 793.75、1 331.2 和 1 576.2 cm^{-1} 通道外在个别廓线处略高外(小于 25),其它通道 M 值基本控制在 15 以内,FFRTM_IR 解析法水汽廓线雅克比有比较好的计算结果,能够满足 HIRAS 大气温、湿度廓线反演、数据同化的精度需求。

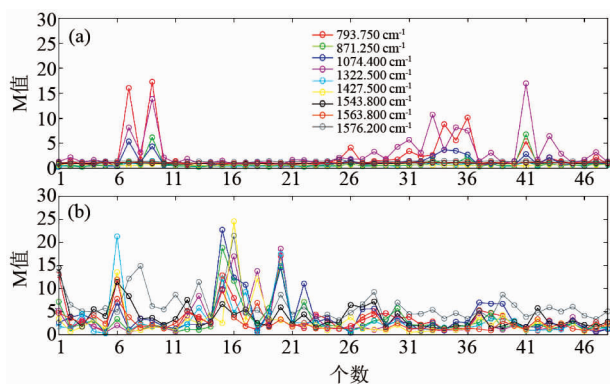


图4 温度廓线和水汽廓线雅克比矩阵验证,(a) 温度廓线;(b) 水汽廓线

Fig. 4 Validation of FFRTM_IR Jacobian matrix simulations for (a) Temperature and (b) water vapor profiles

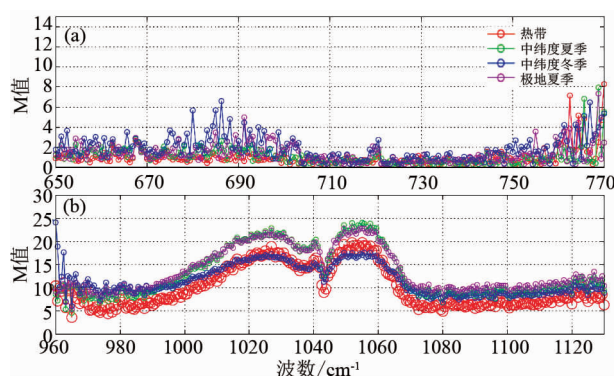


图5 二氧化碳和臭氧廓线雅克比矩阵验证,(a) 二氧化碳;(b) 臭氧

Fig. 5 Validation of FFRTM_IR Jacobian matrix simulations for (a) CO_2 and (b) ozone profiles

图5 (a)给出了二氧化碳廓线 650 ~ 770 cm^{-1} 波段雅克比计算 M 值在 4 种典型大气廓线下(热带、中纬度夏季、中纬度冬季以及极地夏季)的计算结果。可以看到 M 值基本控制在 8 以内,说明 FFRTM_IR 解析法计算的二氧化碳廓线雅克比与扰动法计算结果有比较好的一致性,计算精度较高。图 5 (b)给出了臭氧廓线在 960 ~ 1 130 cm^{-1} 波段相同大气廓线下的值计算结果,相比二氧化碳,臭氧 M 值计算偏高,解析法臭氧廓线雅克比计算结果与扰动法比较一致性略差。但值小于 25,即 FFRTM_IR

解析法臭氧廓线雅克比计算精度属正常范围,可以用于臭氧廓线的反演,因此而引起的反演误差还有待进一步研究。

3.2 地表参数雅克比计算精度验证

相比大气参数廓线的雅克比计算,如式(4-5),地表参数(地表温度、地表发射率)的雅克比计算比较简单,解析法便能得到精确的计算结果。图 6 (a)给出 FFRTM_IR 计算热带大气廓线地表温度、发射率的雅克比示例(地表发射率 0.887,地表温度 263.194 K,地表温度波动 -1 K,发射率波动 0.01)。红线、绿线分别为地表发射率与地表温度的计算结果。窗区通道如 11 μm 波段卫星观测对地表温度、发射率比较敏感,水汽 6.7 μm 几乎不受地表特性的影响,与理论分析一致。图 6 (b)给出了 UMBC 48 条独立廓线 FFRTM_IR 解析法与扰动法比较结果(红点、绿点分别代表地表发射率与地表温度雅克比均方根偏差),两者偏差小于 $2.0\text{E}-6$ K,均方根偏差小于 $5.0\text{E}-6$ K,计算精度较高,解析法结果完全可以取代扰动法进行实际的反演计算。

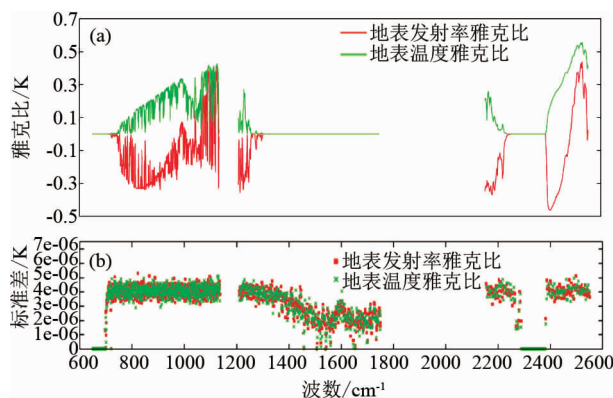


图6 FFRTM_IR 地表参数雅克比矩阵计算验证,(a) 地表温度、发射率雅克比计算;(b) 均方根偏差

Fig. 6 Validation of FFRTM_IR Jacobian matrix simulations for surface temperature and emissivity. (a) Jacobian for surface temperature and emissivity; (b) stand deviation

4 FFRTM_IR 计算速度测试

快速辐射传输模式需要在保证计算精度的条件下满足快速计算的实际需求。本节对 FFRTM_IR 的计算速度进行测试,并在相同条件下与 CRTM V2.05 计算速度进行比较,比较结果见表 1。由于 CRTM 目前不支持 FY-3D HIRAS 的模拟,选择与 HIRAS 通道设置相似的 CrIS 仪器模拟测试结果进行比较(CrIS 通道数略小于 FY-3D 高光谱大气探测仪)。表 1 中单独计算辐亮度用 CRTM (F), FFRTM (F) 表

示;辐亮度以及雅克比矩阵同时计算的用 CRTM(F+J),FFRTM(F+J)代表.FFRTM_IR 支持不同精度条件下的计算,较低的计算精度需要的平均单色波长数较少,计算速度较快.表 1 中同时给出 FFRTM_IR 在 0.1 K 以及 0.15 K 计算精度下需要的时间.在只计算辐亮度的情况下,FFRTM_IR 在 0.1 K 精度下的计算速度与 CRTM 计算速度基本相当,每条廓线计算时间约 0.06 秒;FFRTM_IR 在 0.15 K 精度下的计算速度略快,每条廓线计算时间约 0.05 秒.在辐亮度与雅克比矩阵同时计算的条件下,0.1K 精度 FFRTM_IR 每条廓线计算时间约 0.28 秒,0.15K 精度每条廓线计算时间约为 0.24 秒,均小于 CRTM 每条廓线 0.3 秒的计算时间.总体比较,FFRTM_IR 相比 CRTM V2.05 有更高的计算效率,理论上能够满足业务运行的需求.

5 结论

基于单色波长辐亮度加权组合的计算方案,发展了针对 FY-3D HIRAS 的红外高光谱快速辐射传输模型 FFRTM_IR.与 OPTRAN 快速辐射传输方案中 6.7 μm 水汽以及 9.6 μm 臭氧复杂吸收带模拟偏差相对较大相比,该模型可以通过自适应节点数调整的方式实现所有通道与逐线积分计算结果均方根误差控制在 0.1 K 的精度,并且能够实现对仪器不同扫描角度的同等模拟精度.FFRTM_IR 采用的解析法计算得到的温度、水汽廓线、二氧化碳、臭氧廓线以及地表参数的雅克比矩阵与扰动法计算结果一致性较好,满足大气参数定量反演、数值同化的精度需求.在相同计算条件下,该模式计算效率略优于 CRTM V2.05,有望用于星载高光谱红外大气探测仪器的实时数据处理.与 CRTM、RTTOV 相比,FFRTM_IR 需要读入较大的系数文件,为保证计算速度,需要较大的运行内存,并且目前该模式只适用于晴空辐射计算,不能给出通道有效光学厚度以及通道平均透射率,很难与现有的云、气溶胶散射模型直接耦

合.未来工作需要考虑在 FFRTM_IR 高精度辐射传输计算的基础上引入云、气溶胶散射计算模型.

References

- [1] Liou K N. *An Introduction to Atmospheric Radiation II* [M]. San Diego: Academic Press, 2002, 383-403.
- [2] Parkinson C L. Aqua: an Earth-Observing Satellite mission to examine water and other climate variables[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2003, **41**(2): 173 - 183.
- [3] Shephard M W, Clough S A, Payne V H, et al. Performance of the line-by-line radiative transfer model (LBLRTM) for temperature and species retrievals: IASI case studies from JAIVEx [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2009, **9**:7397 - 7417.
- [4] Tobin D, Henry R, Robert K, et al. Suomi-NPP CrIS radiometric calibration uncertainty[J], *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2013, **118**(10):589 - 600.
- [5] McMillin L, Fleming H. Atmospheric transmittance of an absorbing gas: a computationally fast and accurate transmittance model for absorbing gases with constant mixing ratios in inhomogeneous atmospheres [J], *Appl. Opt.*, 1976, **15**:358 - 363.
- [6] Han H J, Sohn B J, Hung L H, et al. An improved radiance simulation for hyperspectral infrared remote sensing of Asian dust [J]. *J. Geophys. Res.*, 2012, **117**:D09211.
- [7] Ding Shou-Guo, Yang Ping., Weng Fu-Zhong., et al. Validation of the community radiative transfer model [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, **112**(6):1050 - 1064.
- [8] ZHANG Peng, YANG Jun, DONG Chao-Hua, et al. General introduction on payloads, ground segment and data application of Fengyun 3A [J]. *Front. Earth Sci. China*, 2009, **3**(3):367 - 373.
- [9] ZHANG Peng, PASCAL B, DONG Chao-Hua, et al. Study of hyperspectral IR atmospheric sounding with an accurate forward simulation [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张鹏, Pascal Brunel, 董超华等. 卫星高光谱红外大气探测的正演模拟研究. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(6):414 - 418.
- [10] ZHANG Hua, SHI Guang-Yu, LIU Yi. A comparison between the two line-by-line integration algorithms [J]. *Adv. Atmos. Sci.* (张华, 石广玉, 刘毅. 两种逐线积分辐射模式大气吸收的比较研究. *大气科学*). 2005, **29**(4): 581 - 593.
- [11] ZHANG Hua, SHI Guang-Yu. A fast and efficient line-by-line calculation method for atmospheric absorption [J].

表 1 FFRTM_IR 与 CRTM V2.05 计算速度比较

Table 1 Calculation speed comparison between FFRTM_IR and CRTM V2.05

	CRTM(F)	CRTM(F+J)	FFRTM (F) 0.1 K	FFRTM(F+J) 0.1 K	FFRTM(F) 0.15 K	FFRTM(F+J) 0.15 K
CPU	Intel (R) Xeon CPU E5-2609 2.40GHZ					
内存	64 G	64 G	64 G	64 G	64 G	64 G
系数文件	25 M	25 M	320 M	320 M	254 M	254 M
通道数	1305	1305	1370	1370	1370	1370
时间(S)	6.4-6.5E-2	0.307-0.308	6.3-6.5E-2	0.278-0.288	5.01-5.12E-2	0.237-0.240

- Adv. Atmos. Sci.* (张华, 石广玉, 一种快速高效的逐线积分大气吸收计算方法, *大气科学*), 2000, **24** (1): 111 - 121.
- [12] DUAN Min-Zheng, MIN Qi-Long, LI Jiang-Nan. A fast radiative transfer model for simulating high-resolution absorption bands. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, D15201.
- [13] Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, *et al.* Atmospheric radiative transfer modeling; a summary of the AER codes [J], *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2005, **91**:233 - 244.
- [14] Illingworth S M, Remedios J J, Boesch H, *et al.* ULIRS, an optimal estimation retrieval scheme for carbon monoxide using IASI spectral radiances: sensitivity analysis, error budget and simulations [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2011, **4**:269 - 288.
- [15] Scott N A, Chedin A, A fast line-by-line method for atmospheric absorption computations: The Automated Atmospheric Absorption Atlas [J]. *J. Appl. Meteor.*, 1981, **20**:802 - 812.
- [16] Griessbach S, Hoffmann L, H? pfner M, *et al.* Scattering in infrared radiative transfer: A comparison between the spectrally averaging model JURASSIC and the line-by-line model KOPRA. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2013, **127**:102 - 118.
- [17] SHI Guang-Yu. *Atmospheric Radiation [M]*. Beijing: Science Press (石广玉. 大气辐射学 北京: 科学出版社), 2007, 302 - 318.
- [18] Lacis A A, Oinas V. A description of the correlated k distribution method for modeling nongray gaseous absorption, thermal emission, and multiple scattering in vertically inhomogeneous atmospheres [J], *J. Geophys. Res.* 1991, **96**:9027 - 9063.
- [19] Edwards D P, Francis G L. Improvements to the correlated-k radiative transfer method; application to satellite infrared sounding [J]. *J. Geophys. Res.* 2000, **105**:18135 - 18156.
- [20] Fu Q, Liou K N. On the correlated k-distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres [J]. *J. Atmos. Sci.* 1992, **15**:2139 - 2156.
- [21] SHI Guang-Yu. On the k-distribution and correlated distribution Models in the Atmospheric radiation calculations [J]. *Adv. Atmos. Sci.* (石广玉. 大气辐射计算的吸收系数分布模式. *大气科学*), 1998, **22**(4): 659 - 676.
- [22] ZHANG Hua. 1999 *Ph. D. Dissertation [D]* (Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [张华. 非均匀路径相关 k-分布方法的研究. 1999 博士学位论文 (北京: 中国科学院大气物理研究所)].
- [23] FENG Xuan. 2008 *Ph. D. Dissertation [D]* (Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences) [冯绚. 高光谱分辨率大气辐射传输模式的研究. 2008, 博士学位论文. 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院].
- [24] Ambartsumian V. The effect of the absorption lines on the radiative equilibrium of the outer layers of the stars [J]. *Publ. Obs. Astron. Univ. Leningrad*, 1936, **6**:7 - 18.
- [25] Arking A, Grossman K. The influence of line shape and band structure on temperatures in planetary atmospheres [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1972, **29**:937 - 949.
- [26] Thomas J K, Van D P, Larry M M, *et al.* Atmospheric Transmittance of an Absorbing Gas. 6. OPTRAN Status Report and Introduction to the NESDIS/NCEP Community Radiative Transfer Model [J], *Appl. Opt.*, 2004, **43**: 3103 - 3109.
- [27] Strow L L, Hannon S E, De Souza-Machado S, *et al.* An Overview of the AIRS Radiative Transfer Model [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2003, **41**(2):303 - 313.
- [28] Moncet J L, Gennady U, Alan E L, *et al.* Infrared Radiance Modeling by Optimal Spectral Sampling [J]. *J. Atmos. Sci.*, 2008, **65**:3917 - 3934.
- [29] Lipton A E, Moncet J L, Boukabara S A, *et al.* Fast and Accurate Radiative Transfer in the Microwave With Optimum Spectral Sampling [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, **47**(7):1909 - 1917.
- [30] Murty D, Christopher B, Xu L, *et al.* The CrIMSS EDR algorithm: Characterization, optimization, and validation [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014, **119**:4953 - 4977.
- [31] MA Gang, ZHANG Peng, QI Chen-Li, *et al.* An improvement in fast radiative transfer calculation of FengYun satellite by Plank weighting correction [J]. *Acta Phys. Sin.* (马刚, 张鹏, 漆成莉, 等. 普朗克权重订正对风云卫星快速正演精度的改进. *物理学报*) 2014, **63** (17): 179503.
- [32] Garand L, Turner D S, Larocque M, *et al.* Radiance and Jacobian intercomparison of radiative transfer models applied to HIRS and AMSU channels [J], *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(24):017 - 031.
- [33] CHEN Yong, HAN Yong, VAN D P, *et al.* On water vapor Jacobian in fast radiative transfer model [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**:D12303.