

行星大气 1~3000 GHz 微波-亚毫米波辐射模拟^{*}

付佳 王振占

(中国科学院国家空间科学中心 微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 为模拟行星大气在微波-亚毫米波波段的辐射传输特性, 利用逐线积分方法计算行星大气中各气体成分在 1~3000 GHz 的吸收系数. 基于 HITRAN 数据库中各气体分子的跃迁频率及线强等参数, 有效模拟了各气体分子在此频段内的吸收特征, 并与常用的微波-亚毫米波大气辐射传输模式进行对比. 分析地球大气的组成及特性, 利用辐射传输方程模拟临边探测方式下不同频段的大气辐射亮温. 研究结果可为后续地球乃至行星大气成分探测模拟、频带选择以及大气成分廓线反演提供模型及理论依据.

关键词 逐线积分, 吸收系数, HITRAN 数据库, 大气辐射传输特性

中图分类号 P 353

Simulation of Microwave and Sub-millimeter Wave Radiation from 1 to 3000 GHz of Planetary Atmosphere

FU Jia WANG Zhenzhan

(Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract In order to simulate the radiative transfer characteristics of planetary atmosphere in the microwave and sub-millimeter wave bands, the absorption coefficient from 1 to 3000 GHz of the gases in planetary atmosphere are calculated by using line-by-line integration method. Based on the parameters of gas molecules in HITRAN database, such as the transition frequency, line strength and so on, the absorption feature of each gas molecule is simulated and compared with the common atmosphere radiative transfer model in microwave and sub-millimeter wave bands. As an example, the radiation transport characteristics of Earth's atmosphere are analyzed, and the atmospheric radiation brightness temperature of different frequency band using limb sounding method is simulated using the radiative transfer equation. The results can provide the model and theoretical basis for

* 中国科学院国家空间科学中心五个重点培育方向“极端天气与全球变化卫星遥感观测研究”项目资助

2016-03-13 收到原稿, 2016-12-13 收到修定稿

E-mail: fujia_ucas@163.com

atmospheric composition detection simulation, the selection of detection frequency band and the retrieval of atmosphere profiles of Earth and other planets.

Key words Line-by-line integration, Absorption coefficient, HITRAN database, Atmospheric radiative transfer characteristics

0 引言

包含大气的太阳系行星有地球、火星、木星及金星等, 各行星具有不同的大气成分和结构. 地球大气由 N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O , O_3 , Ne 等多种气体分子组成, 其中最主要的成分为 N_2 和 O_2 . 地球大气的气体密度随着高度的增加而逐渐变小. 地球大气温度随着海拔高度的增加, 总体呈现先减小后增加再减小又增加的变化趋势. 火星大气的主要成分为 CO_2 , 其含量随高度的增加而减少^[1]. 火星大气比地球大气稀薄, 密度不到地球大气的 1%. 火星表面的大气压为 5.6 mbar (560 Pa), 相当于地球大气 37 km 高度处的压力. 火星表面温度平均约为 210 K, 变化范围为 140~300 K^[2-4]. 火星大气温度随着海拔高度的增加, 先减小, 然后不变, 然后再增加. 研究模拟行星大气辐射传输过程对行星大气成分探测及环境变化监控等具有重要意义.

微波-亚毫米波 (简称微波) 是遥感行星大气和表面的重要手段之一. 微波波段通常可以穿过大气, 方向性好, 而且不依赖于光源, 可以进行全天时和全天候观测. 同时, 其也具有瞬态性、宽带性、相干性、低能性及透视性等特征^[5]. 另外, 行星大气成分在微波波段都存在一定的吸收谱线, 利用吸收谱线的特性, 可以对行星大气进行遥感探测. 例如对地遥感中, 可以利用 183.31 GHz 的水汽吸收峰进行大气湿度廓线探测, 利用 50~60 GHz 和 118.75 GHz 氧气吸收峰进行大气中氧气及温度廓线探测^[6]. 此外, 利用大气痕量气体在微波波段的特征吸收线, 可以进行大气成分的临边探测^[7].

对于大多数地球大气层的微波遥感观测, 低层大气是重点关注的区域, 因为其包含了整个大气质量的大部分, 对地球表面遥感观测具有很大影响. 在对地微波遥感中, 对大气微波辐射过程起主要作用的大气成分包括氧气、水汽及氮气等. 由于其他气体含量非常稀少, 作用影响较小. 因此, 普遍使用微波-亚毫米波大气吸收模式 (MPM/PWR 等^[8]) 模拟大气吸收,

只考虑氧气谱线、非谐振氧气吸收、水汽谱线、水汽连续吸收谱、氮气、悬浮云雾粒子以及雨的吸收和散射系数.

但是, 当研究地球中高层大气或者其他行星的表层大气时, 采用这些简化模型是不够的, 必须考虑 O_3 及 SO_2 等其他气体在微波波段吸收谱线的影响. 国外一些微波波段的大气辐射传输模型, 例如 ARTS^[9], LBLRTM^[10], LinePak^[11], MODTRAN^[12], RTTOV^[13] 等都考虑了除氧气、水汽、氮气外的其他气体^[14].

针对探测地球中高层大气成分或者其他行星的表层大气需求, 本文采用逐线积分方法计算气体在微波-亚毫米波波段的吸收系数, 并进行地球大气辐射亮温模拟. 具体方法为: 基于 HITRAN 数据库, 采用逐线积分方法, 计算在特定温度、压强和密度下每种气体的吸收系数, 分析各种气体在微波-亚毫米波波段的吸收特性; 利用地球的大气廓线数据, 对地球大气探测系统亮温进行仿真, 进而为各种气体成分探测频段选择及大气信息反演提供模型及理论依据.

1 原理

当微波在大气中传播时, 会受到大气自身辐射以及大气衰减的影响. 大气微波辐射的特征可以用大气吸收谱来描述^[15]. 在微波段许多大气分子都有吸收谱线.

理想情况下, 只考虑大气微波辐射的发射和吸收过程. 对于行星表面的微波-亚毫米波大气探测系统, 可依据如下公式计算行星表面频率为 ν 的微波辐射强度^[16]:

$$I_{\nu}(0) = I(s_0)e^{-\tau(0,\infty)} + \int_0^{\infty} \alpha_{\nu}(s)B_{\nu}(s)e^{-\tau(0,s)}ds. \quad (1)$$

其中: $I_{\nu}(0)$ 为行星表面频率为 ν 的微波辐射强度, 单位为 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot Hz^{-1}$, 在媒质中沿着传播方向传

播; 在边界 $s = s_0$ 处结束时, $I(s_0)$ 为微波辐射强度的起始值; $\alpha_\nu(s)$ 为 s 点吸收系数; $\tau(0, s)$ 为 0 点到 s 点的光学厚度; $B_\nu(s)$ 为 s 点黑体辐射强度 (s 表示位置), 有

$$B(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1)}. \quad (2)$$

其中, T 为热力学温度, c 为光速, ν 为频率, h 为 Planck 常量, k 为 Boltzmann 常量.

因此, 仿真行星大气传输正向过程时, 必须提供大气的吸收系数廓线. 对于混合气体其总吸收系数为每种气体的吸收系数之和. 每种气体在微波波段的吸收系数可以通过简化模型进行计算, 例如常用的微波大气吸收模式 MPM/PWR 模型. 但是 MPM/PWR 具有一定局限性, 只能得到水汽、氧气及氮气在 1~1000 GHz 的吸收系数, 无法满足其他气体成分或更高频率吸收特性的仿真需求. 因此, 本文基于 HITRAN 数据库, 利用逐线积分方法计算各种气体的吸收系数^[17].

逐线积分法是处理行星大气非均匀路径及吸收带重叠等大气辐射传输问题最精确的方法. 在微波频段, 各气体分子有较多的光谱线. 当已知单条谱线的线强与线型时, 单条谱线的吸收系数为

$$\alpha(\nu) = nsf(\nu). \quad (3)$$

其中, n 为分子数密度, s 为谱线强度, $f(\nu)$ 为谱线线型.

压力增宽、多普勒频移及压力增宽加上多普勒频移三种效应会影响吸收谱线的宽度和形状, 使吸收谱线发生谱线展宽. 通常情况下, 压力增宽效应采用洛伦兹函数估计谱线线型, 多普勒频移效应采用多普勒函数估计线型. 在压力增宽和多普勒频移影响都很强的区域, 采用 Voigt 线型函数来近似. 图 1 中给出了利用 1976 年美国标准大气中的地球大气廓线数据计算的不同海拔下臭氧在 240.018 GHz 谱线的洛伦兹线宽及多普勒线宽. 根据经验, 多普勒展宽在地球中间层较为重要, 而压力加宽在平流层占主导地位. 在计算地球大气吸收时, 30 km 以下的低层大气采用洛伦兹线型; 70 km 以上的高层大气采用多普勒线型; 30~70 km 之间大气采用伏伊特线型. 在向上观测的几何中, 利用平流层线宽对压力的依赖性, 可反演得出化合物的混合比廓线. 但是, 多普勒宽度不依赖于压力, 因此 70 km 以上的中间层无法获得高度信息.

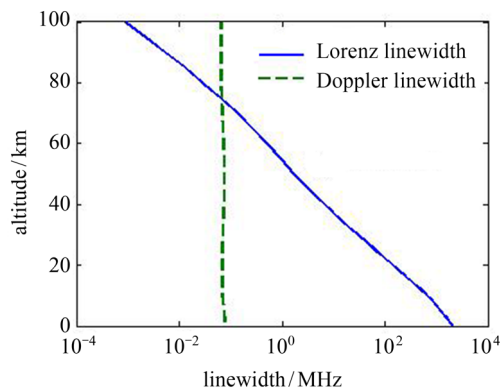


图 1 臭氧在 240.018 GHz 谱线的洛伦兹线宽及多普勒线宽

Fig. 1 Lorentz linewidth and Doppler linewidth of the ozone line at 240.018 GHz

如果已知一种气体分子每条谱线的形状和强度信息, 则频谱上任意点 ν 处的吸收系数就是所有谱线在该点处的贡献总和, 即

$$\alpha(\nu) = \sum_i \alpha_i(\nu). \quad (4)$$

2 仿真及结果

2.1 吸收系数仿真

这里吸收系数及亮温仿真均使用 HITRAN2012 数据库中的光谱信息^[18]. 高分辨率传输分子光谱数据库 (High-resolution Transmission Molecular Spectroscopy Database, HITRAN) 对多种气体的光谱参数进行了汇总, 主要用于 0~20 000 cm^{-1} 频带的大气研究^[19].

图 2 给出了利用逐线积分方法计算气体吸收系数的流程. 首先根据输入的大气参数及 HITRAN 数据库的光谱参数, 选择合适的线型, 计算单条谱线吸收截面和气体分子密度, 进而计算出单一气体单条谱线的吸收系数. 然后利用逐线积分方法, 计算单一气体的吸收系数. 本文仿真中, 如无特殊说明, 光谱分辨率取为 0.01 cm^{-1} , 即 0.3 GHz.

计算吸收系数时, 在不影响计算精度的前提下, 为尽量提高计算速度, 将线型进行截断. 通常, 截断是随半宽变化而变化的, 即截断波数 $\nu_c = \beta\gamma_L$, 这里 β 为常数. 在洛伦兹线型的情况下, 由于线型的远翼区较强, 线翼截断对计算结果影响很大. 图 3 给出

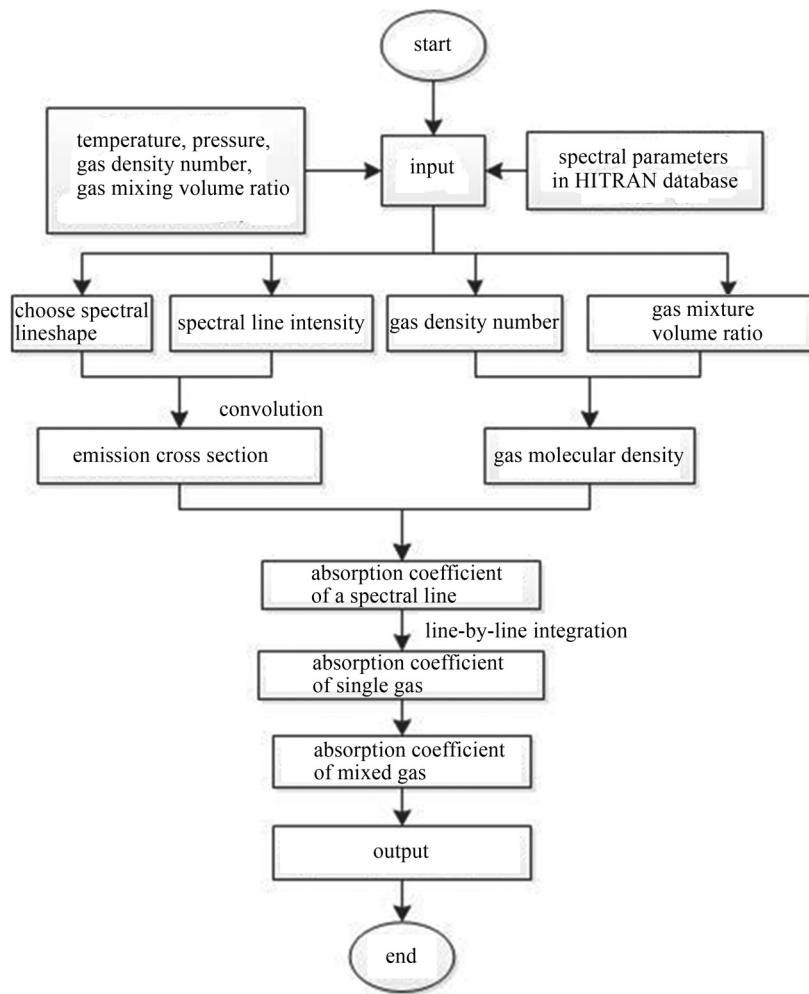


图 2 气体吸收系数的仿真流程

Fig. 2 Simulation procedure of absorption coefficient of gas

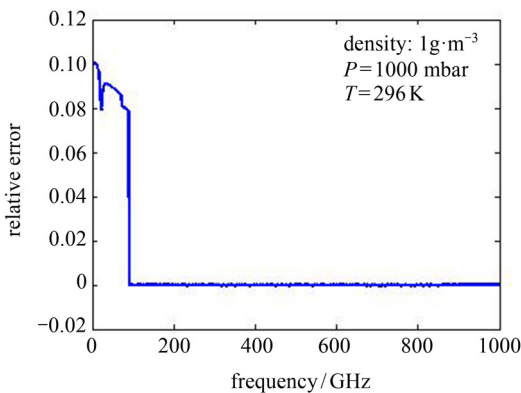


图 3 截断波束为 900 GHz 时 H₂O 分子吸收系数的相对误差

Fig. 3 Relative error of the absorption coefficient of H₂O as the truncated beam is 900 GHz

了 1000 mbar, 296 K 条件下, 气体密度为 $1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, 截断波束为 $\nu_c = 30 \text{ cm}^{-1}$ 即 900 GHz 时, H₂O 分子在 1~1000 GHz 吸收系数的相对误差.

从图 3 可以看出, 在 1~100 GHz 频率以内, H₂O 分子吸收系数产生较大相对误差. 这是由于 H₂O 分子在 32.9537 cm^{-1} (988.611 GHz), 32.3662 cm^{-1} (970.986 GHz) 及 30.5602 cm^{-1} (916.806 GHz) 频率处的吸收谱线相对于 1~100 GHz 频段的吸收谱线而言较强, 影响 1~100 GHz 频率处的吸收. 当截断为 900 GHz 时, 这些谱线在 1~100 GHz 的影响被忽略, 进而产生了较大的误差. 图 4 给出了截断波束为 $\nu_c = 33 \text{ cm}^{-1}$ 即 990 GHz 时的相对误差. 显然相对误差较小, 基本可以忽略. 因此, 本文的仿真取截断为 33 cm^{-1} .

利用逐线积分方法, 在 1000 mbar, 296 K 条件下, 取截断波束为 33 cm^{-1} (990 GHz), 水汽密度为 $1\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, H_2O 和 O_2 分子在 1~3000 GHz 范围内的吸收系数如图 5 所示. 为了突出计算细节, 图 6 给出了 H_2O 分子在 183.3 GHz 处的吸收峰. 从图 6 可以看出, 183.3 GHz 水汽吸收峰具有对称吸收特性. 图 7 给出了根据 1976 年美国标准大气中地球大气廓线数据计算的 O_2 在 50~70 GHz 范围内的吸收系

数, 垂直高度分别为 0, 6, 12, 18 km, 对应压强分别为 1013, 472, 194, 75.65 mbar. 从图 7 可以看出, 随着压强减小, 50~60 GHz 频段范围内的一些细小吸收峰显现出来. 这是因为底层大气中氧气的洛伦兹线宽较大, 无法将各谱线区分开来. 随着高度的增加, 压强减小, 洛伦兹线宽越来越小, 因此各谱线开始区分开来.

在 1000 mbar, 296 K 条件下, 假设 H_2O 密度为

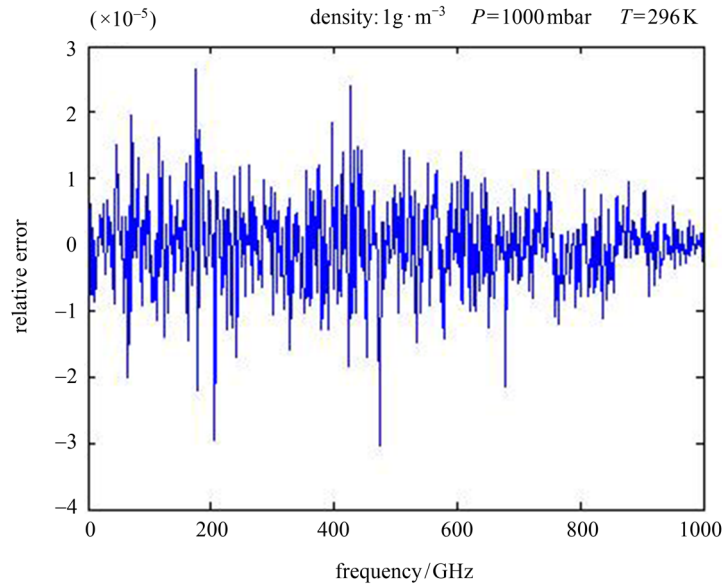


图 4 截断波束为 990 GHz 时 H_2O 分子吸收系数的相对误差

Fig. 4 Relative error of the absorption coefficient of H_2O as the truncated beam is 990 GHz

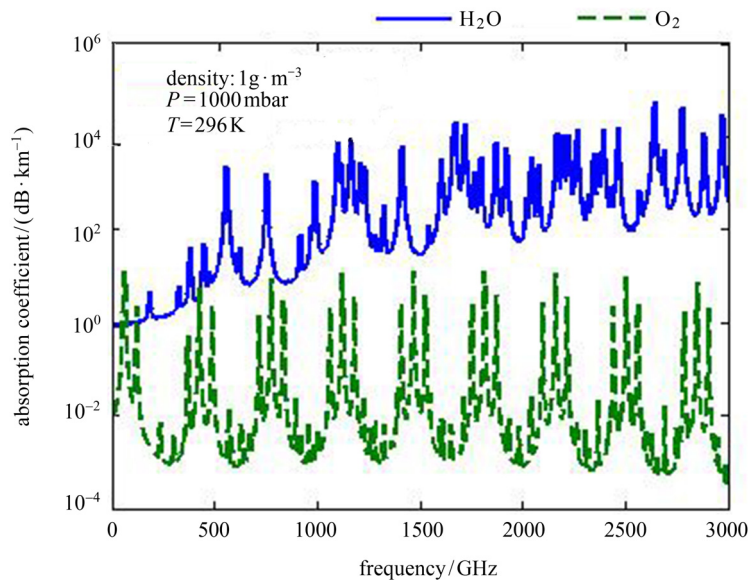


图 5 H_2O 和 O_2 的吸收系数

Fig. 5 Absorption coefficient of H_2O and O_2

$1\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 将用逐线积分方法得出的吸收系数与常用微波大气吸收模式 MPM89, MPM93, PWR98 及 PWR04 在 1~1000 GHz 的吸收系数进行对比, 结果如图 8 所示. 从图 8 可以看出, 在 1~800 GHz 范围内, 利用逐线积分方法计算得到的水汽吸收系数与通过 MPM 和 PWR 得出的水汽吸收系数在吸收峰处吻合度良好, 反向验证了逐线积分方法的可行性. MPM 和 PWR 模型只能计算 1~1000 GHz 的水汽、氧气及氮气分子的吸收, 因此在定量计算水汽、氧气及氮气在 1000 GHz 以上频率的吸收或其他分子的吸收时, 需要利用逐线积分方法.

利用逐线积分方法, 可以计算在特定温度、压强及浓度下 1~3000 GHz 范围内各种气体的吸收系数. 以 O_3 为例, 在 1000 mbar, 296 K 条件下, 假设 O_3 密度为 $1\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, O_3 在 1~3000 GHz 范围内的吸收系数

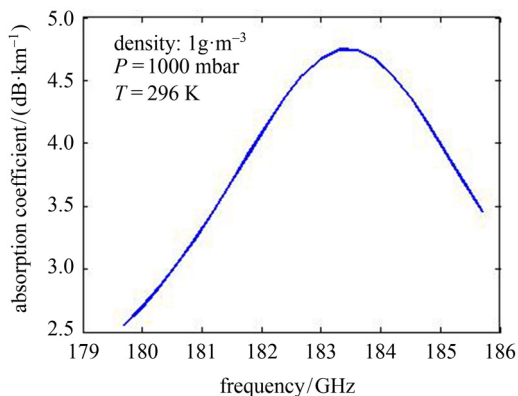


图 6 H_2O 分子在 183.3 GHz 处的吸收峰

Fig. 6 Absorption peak of H_2O at 183.3 GHz

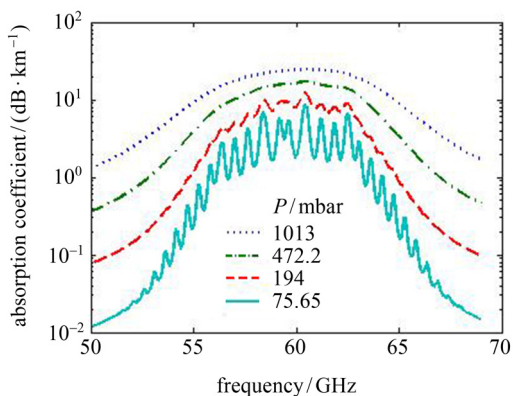


图 7 O_2 在 50~70 GHz 范围内的吸收系数

Fig. 7 Absorption coefficient of O_2 in the range of 50~70 GHz

如图 9 所示. 从图 9 可以看出, O_3 在微波波段存在多个吸收峰, 可以选择合适的吸收频带对特定气体进行探测. 例如, O_3 分子在 237.90 GHz 处有较强吸收, 如图 10 所示, 光谱分辨率为 0.15 GHz. 在选择气体

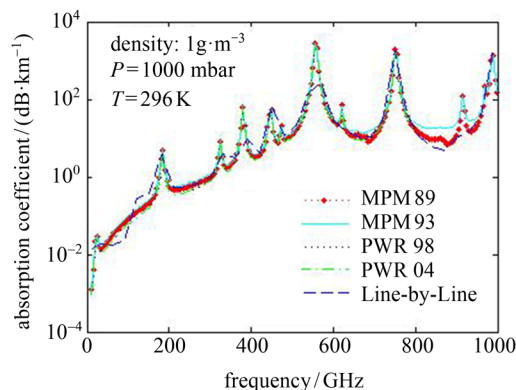


图 8 不同模型 H_2O 的吸收系数

Fig. 8 Absorption coefficient of H_2O by different models

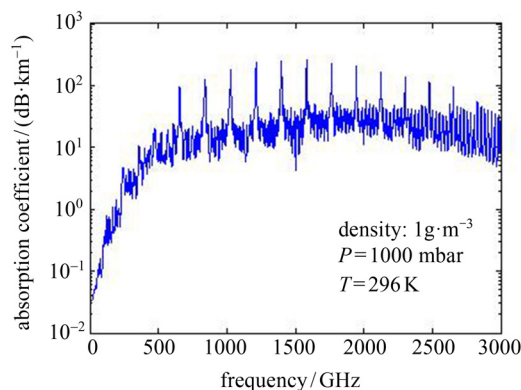


图 9 O_3 气体吸收系数

Fig. 9 Absorption coefficient of O_3

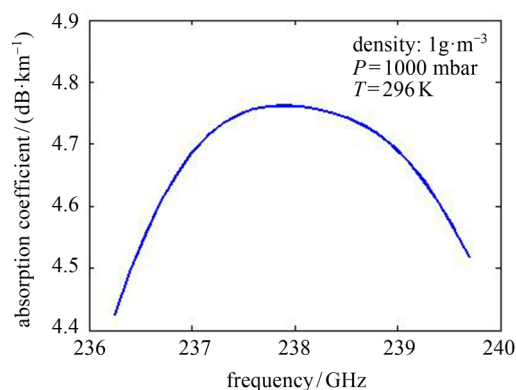


图 10 O_3 在 237.90 GHz 的吸收峰

Fig. 10 Absorption peak of O_3 at 237.90 GHz

探测频带时,除考虑该气体的明显吸收峰外,还需考虑可能在该频段对该气体探测产生干扰的其他气体吸收.并且当有多条谱线可选时,需考虑是否可与其他成分实现共同观测.

数据库中光谱参数的不确定性会影响大气中吸收系数、光学厚度等的计算,从而使大气混合体积比、温湿度廓线反演存在系统误差.利用 HITRAN2012 数据库中给出的谱线强度和空气半展宽的不确定性,分析仿真的大气分子吸收系数不确定度.

表 1 列出了 HITRAN2012 数据库中谱线强度和空气半展宽的不确定度代码.为定量计算吸收系数的不确定度,使用每条谱线的不确定度参数.当不确定度代码大于 3 时,不确定度的值取为不确定度范围的中间值.例如,当不确定度代码为 5 时,不确定度的值设置为 7.5%.当不确定度代码为 3 时,不确定度的值设置为 20%.当不确定度代码小于 3 时,使用所有比 2 大的不确定度代码的均值.

以 H_2O 分子为例,计算由光谱参数的不确定性引起的 1~1000 GHz 的吸收系数相对误差,结果如图 11 所示.图 11 中实线表示线强和空气半展宽的不确定度最大值引起的相对误差.虚线表示线强和空气半展宽的不确定度最小值引起的相对误差.从图 11 可以看出,光谱参数不确定性引起的吸收系数相对误差在 5% 以内.与图 5 对比发现, H_2O 分子吸收峰所在频率的吸收系数相对误差较小.但在吸收谱线的窗区,误差相对较大.例如,在 183.31 GHz 的

表 1 HITRAN2012 中谱线强度和空气半展宽的不确定度代码

Table 1 Uncertainty codes of intensity and halfwidths of spectral lines in HITRAN2012

不确定度代码	线强及空气半展宽参数的不确定度范围
0	未报告或者不可用
1	默认或者常数
2	平均或者估计
3	$\geq 20\%$
4	$\geq 10\%$ 且 $< 20\%$
5	$\geq 5\%$ 且 $< 10\%$
6	$\geq 2\%$ 且 $< 5\%$
7	$\geq 10\%$ 且 $< 2\%$
8	$< 2\%$

水汽吸收峰上,谱线强度和空气半展宽的不确定度最大值引起的相对误差只有 0.37%,基本可以忽略不计.在 522.0 GHz 处,谱线强度和空气半展宽的不确定度最大值引起的相对误差达到 4.30%.实际上对于每一条谱线,谱线强度和空气半展宽的不确定度造成的最大值或最小值不总是同时达到的,而且相关光谱区谱线的线强和空气半展宽同时达到不确定度造成的最大值或最小值的可能性非常小,因此这里的仿真不确定度是理论上的最大值,远大于实际值,但是此值说明了系统误差的存在及其在对应频率上的大小.

2.2 亮温仿真

当已知行星大气廓线参数时,利用逐线积分方法计算大气总吸收系数,然后分层计算各层的光学厚度及透过率,并利用微波辐射传输方程,进行行星表面观测系统的亮温仿真,仿真过程如图 12 所示.

在向上观测时,底层大气的压力高、密度大,而且水汽、氧气含量较多,使得大气的光学厚度较大,透过率很小. O_3 等痕量气体的含量少,其辐射不易透过底层大气到达探测器,因此其对亮温的影响较小.为了模拟痕量气体明显的吸收峰,进行地球临边探测系统亮温信号模拟,分析研究其相对于大气成分(变化)的敏感性.首先,设观测点所处高度为 100 km,观测切线高度分别为 20 km, 30 km 及 40 km,输入大气模式为 1976 年美国标准大气中 H_2O , O_2 , O_3 , N_2O , ClO , NO , CO_2 , SO_2 及 CH_4O 的大气廓线.亮温仿真结果如图 13 所示.图 13 分别给出了 105~135 GHz, 180~210 GHz, 225~255 GHz 及 630~660 GHz 范围内的亮温.

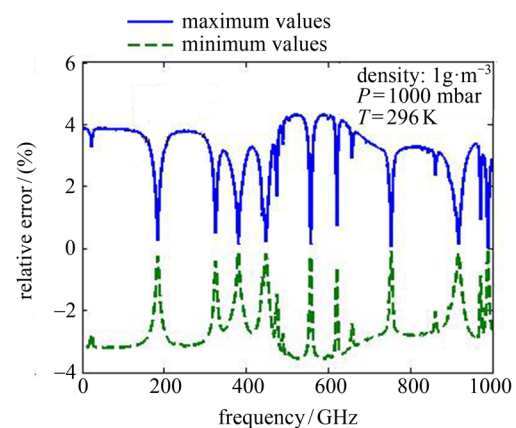


图 11 吸收系数的相对误差

Fig. 11 Relative error of the absorption coefficient

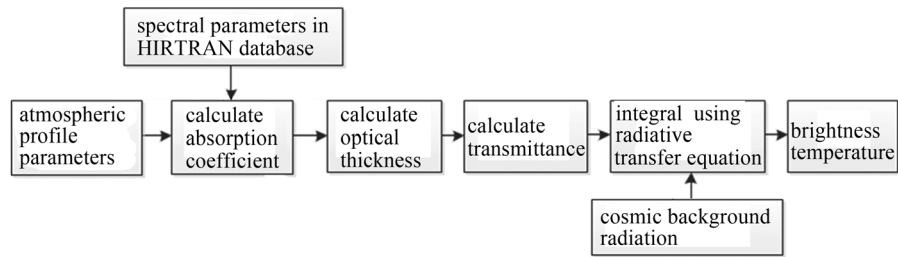


图 12 辐射传输正向过程

Fig. 12 Forward process of radiation transfer

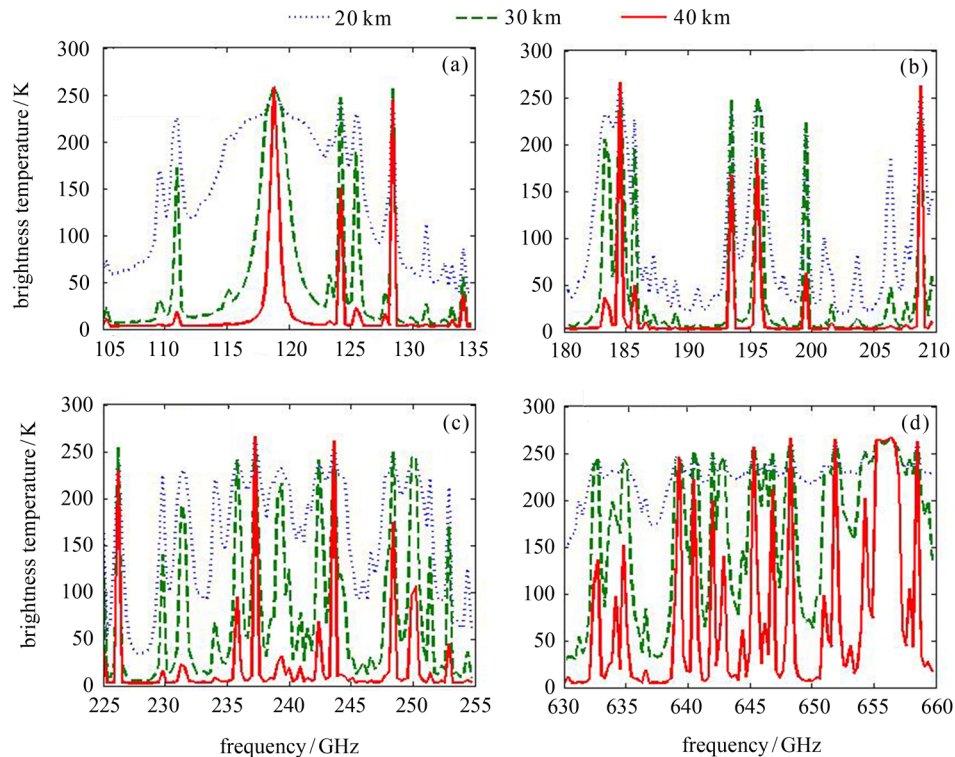


图 13 临边观测系统的亮温

Fig. 13 Brightness temperature of limb observation system

从图 13 可以看出, 每个频率段都有多个亮温峰值. 通过与数据库中各气体分子谱线的跃迁频率和线强对比分析, 发现了对峰值起主要作用的分子. 图 13(a) 在 118.8 GHz 处有明显的亮温峰值, 该峰值是氧气谱线造成的. 图 13(b) 在 20 km 切高处, 183.3 GHz 的亮温峰值为 231.78 K, 该峰值主要是由 H_2O 分子跃迁频率为 183.437 01 GHz 处的谱线造成的; 201.0 GHz 的峰值是 N_2O 分子的作用; CLO 分子在 204.0 GHz 的吸收谱线也显现出来; 206.4 GHz 的吸收峰是 O_3 造成的. 图 13(c) 中的亮温峰值多

为 O_3 分子作用的结果. 例如 235.8 GHz, 233.4 GHz, 229.8 GHz 的峰值均由 O_3 分子的谱线造成. 图 13(d) 中 649.0 GHz 的峰值是 CLO 分子引起的. 此外, N_2O 分子也在 652.2 GHz 处产生了影响. 通过对不同切高亮温进行对比可以发现, 随着切点高度的增加, 一些亮温峰值在减小. 有些在较低高度显现出来的弱谱线的亮温峰随着临边切点高度变大而消失.

为分析气体成分的亮温敏感性, 以亮温差值大于 0.5 K 为基本探测精度, 分析目标气体的可选探测频率. 以 N_2O 气体为例, 选取切高为 20 km, 输入标

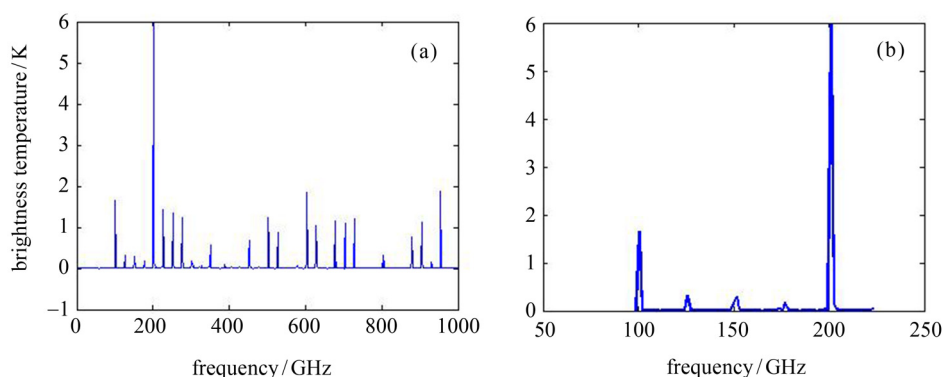


图 14 N_2O 廓线增加 10% 的亮温差 (a) 及 50~250 GHz 内的细节 (b)

Fig. 14 Brightness temperature difference as the N_2O profile increases by 10% (a) and details of the 50~250 GHz frequency range (b)

准大气廓线得到亮温, 将 N_2O 廓线增加 10%, 模拟得到亮温, 二者相减之后得到 N_2O 变化 10% 的亮温差, 结果如图 14 所示. 从图 14 可以看出, 亮温差的最大值为 5.9752 K, 出现在 201.0 GHz 处. 此外, 100.5 GHz 处也存在 1.6651 K 的亮温差. 因此, 选择 N_2O 气体临边探测频率时, 需要综合考虑探测频率硬件实现难易程度、探测精度以及与其他气体共同探测的可能性.

3 结论

目前常用的微波-大气吸收模式 MPM/PWR 只能得到水汽、氧气及氮气在 1~1000 GHz 的吸收系数, 无法满足其他气体成分或更高频率吸收特性的仿真需求. 本文基于 HITRAN2012 数据库的光谱参数, 利用逐线积分方法, 可以得到特定条件下大气中各气体成分 1~3000 GHz 的吸收系数.

在逐线积分过程中, 针对不同压强温度下谱线线型的选择进行分析. 为了在不影响精度的前提下提高计算速度, 采用线型截断的方法. 分析发现, 将截断波束设为 33 cm^{-1} 时, 其对精度的影响可以忽略. 对逐线积分方法与 MPM/PWRM 模型得出的 H_2O 分子的吸收系数进行对比, 发现二者在吸收峰处的吻合度良好. 此结论反向验证了逐线积分方法的可行性. 以 H_2O 分子为例, 定量分析了 HITRAN2012 数据库中谱线强度和空气半展宽不确定性带来的系统误差, 发现吸收峰所在频率的相对误差较小, 而吸收谱线窗区的相对误差较大. 利用辐射传输方程, 正向模拟了临边观测时的大气辐射亮温, 并进行了目标气体

的敏感性分析.

需要指出的是, 本文中模拟计算得到的亮温是理想状态下到达探测器天线端的亮温, 并没有考虑大气散射及天线波束宽度等问题. 而这些问题在仪器实际设计以及数据资料处理中是必须考虑的. 另外, 计算亮温时使用了 Planck 黑体辐射定律的 Rayleigh-Jeans 近似, 其在高频时会带来一定误差, 需要进一步考虑.

利用逐线积分方法, 可以模拟向上观测、天底观测以及临边观测模式下任何行星大气 1~3000 GHz 的辐射亮温, 为气体探测频带的选择和各种大气信息反演提供模型及理论依据. 由于其他行星的大气廓线数据有限, 本文仅模拟了地球大气的辐射亮温, 有关其他行星, 例如火星大气辐射过程模拟等将是未来进一步研究的重点.

致谢 HITRAN2012 数据库由 Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics Atomic and Molecular Physics Division 提供.

参考文献

- [1] WU Ji, ZHU Guangwu, ZHAO Hua, *et al.* Overview of scientific objectives of China-Russia Joint Mars exploration program YH-1[J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(5): 449-455 (吴季, 朱光武, 赵华, 等. 萤火一号火星探测计划的科学目标[J]. *空间科学学报*, 2009, **29**(5): 449-455)
- [2] OWEN T, BIEMANN K, RUSHNECK D R, *et al.* The composition of the atmosphere at the surface of Mars[J]. *J. Geophys. Res.*, 1977, **82**(28): 4635-4639
- [3] BARTH C A. The atmosphere of Mars[J]. *Ann. Rev.*

- Earth Planet. Sci.*, 1974, **2**(1): 333-367
- [4] SEIFF A. Structure of the atmospheres of Mars and Venus below 100 kilometers [J]. *Adv. Space Res.*, 1987, **7**(12): 5-16
- [5] LI Xiaoying, CHEN Liangfu, SU Lin, *et al.* Overview of sub-millimeter limb sounding [J]. *J. Remote Sens.*, 2013, **17**(6): 1325-1344 (李小英, 陈良富, 苏林, 等. 亚毫米波临边探测发展现状 [J]. *遥感学报*, 2013, **17**(6): 1325-1344)
- [6] LI J, ZHANG S W, JIANG J S, *et al.* In-orbit performance of Microwave Humidity Sounder (MWS) of the Chinese FY-3 meteorological satellite [C]//Proceedings of 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Honolulu, HI: IEEE, 2010: 574-577
- [7] LIVESEYN J, VAN SNYDERW, READW G, *et al.* Retrieval algorithms for the EOS Microwave Limb Sounder (MLS) [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2006, **44**(5): 1144-1155
- [8] LIEBE H J. An updated model for millimeter wave propagation in moist air [J]. *Radio Sci.*, 1985, **20**(5): 1069-1089
- [9] BUEHLER S A, ERIKSSON P, KUHN T, *et al.* ARTS, the atmospheric radiative transfer simulator [J]. *J. Quantit. Spectrosc. Radiat. Trans.*, 2005, **91**(1): 65-93
- [10] CLOUGH S A, SHEPHARD M W, MLAWER E J, *et al.* Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes [J]. *J. Quantit. Spectrosc. Radiat. Trans.*, 2005, **91**(2): 233-244
- [11] GORDLEY L L, MARSHALL B T, CHU D A. LINEPAK: Algorithms for modeling spectral transmittance and radiance [J]. *J. Quantit. Spectrosc. Radiat. Trans.*, 1994, **52**(5): 563-580
- [12] TAN K, LIAO Z, DU P, *et al.* Land surface temperature retrieval from Landsat 8 data and validation with geosensor network [J]. *Earth Sci.*, 2017, **11**: 20
- [13] HOCKING J, RAYER P, RUNDLE D, *et al.* RTTOV v11 Users Guide [M]. 2013: 1-110
- [14] BAO Jinghua. The Principle of FY-3C Satellite Microwave Humidity and Temperature Sounder and Preliminary Analysis on Its In-orbit Performance [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014: 18-20 (鲍靖华. FY-3C 卫星微波湿温探测仪原理及在轨性能初步分析 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2014: 18-20)
- [15] SHI Guangyu. Atmospheric radiative transfer theory [J]. *Adv. Earth Sci.*, 1991, **6**(5): 71-73 (石广玉. 大气辐射传输学 [J]. *地球科学进展*, 1991, **6**(5): 71-73)
- [16] WANG Zhenzhan, BAO Jinghua, LI Yun, *et al.* Study on retrieval algorithm of ocean parameters for the HY-2 scanning microwave radiometer [J]. *Eng. Sci.*, 2014, **16**(6): 70-82 (王振占, 鲍靖华, 李芸, 等. 海洋二号卫星扫描辐射计海洋参数反演算法研究 [J]. *中国工程科学*, 2014, **16**(6): 70-82)
- [17] ENCRENAZ TH, BÉZARD B, CROVISIER J, *et al.* Detectability of molecular species in planetary and satellite atmospheres from their rotational transitions [J]. *Planet. Space Sci.*, 1995, **43**(12): 1485-1516
- [18] LU P, ZHANG H, JING X W. The effects of different HITRAN versions on calculated long-wave radiation and uncertainty evaluation [J]. *Acta Meteor. Sin.*, 2011, **26**(3): 389-398
- [19] ROTHMAN S, GORDONI E, BABIKOVY, *et al.* The HITRAN2012 molecular spectroscopic database [J]. *J. Quantit. Spectrosc. Radiat. Trans.*, 2013, **130**: 4-50