

文章编号: 2095-4980(2015)06-917-04

“am”大气模型及其临边遥感特性分析

苏兴华¹, 任梦飞²

(1.中国航天科技集团公司 上海航天电子通讯设备研究所, 上海 201109;

2.中国人民解放军南京陆军指挥学院, 江苏 南京 210045)

摘 要: 临边地球大气遥感是实现上层大气微量气体成份探测和分析的重要手段, 即通过对地球大气剖面下遥感数据—特性谱线下亮温值的获取, 结合相适应大气模型, 通过反演获取相应气体成份的全球分布, 从而为大气科学研究及全球气候变化提供科学数据及决策依据。本文从星载临边亚毫米波遥感结构建模以及地球标准大气模型出发, 利用“am”综合仿真工具, 给出了其特征谱线在其不同临边遥感切角下的性能仿真, 从而定量分析了遥感系统综合指标。

关键词: “am”大气模型; 临边亚毫米波遥感; 特征谱线; 综合仿真

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201506.0917

Atmosphere limb remote sensing features with “am” atmosphere model

SU Xinghua¹, REN mengfei²

(1.Shanghai Institute of Electronic Commutation Instrument, China Aerospace Science and Technology Corporation,

Shanghai 201109, China; 2.Nanjing Army Command College of PLA, Nanjing Jiangsu 210045, China)

Abstract: Limb atmosphere remote sensing is a very important method to implement the detection and analysis to trace gas in upper atmosphere, which acquires the remote sense data in global atmospheric profile—brightness temperature under featured spectra, combines the corresponding atmosphere model, and obtains the global distribution of corresponding gas composition through inversion. Then it can provide scientific data and decision basis for atmospheric research and the global climatic variation. Basing on the modeling of satellite borne limb sub-millimeter wave remote sense structure and the standard earth atmospheric models, this work utilizes “am” comprehensive simulation tool to perform performance simulation of its featured spectra under different limb remote sense corner cuts, thus quantitatively analyzes the integrated index of remote sense system.

Key words: “am” atmosphere model; limb sub-millimeter remote sense; featured spectra; comprehensive simulation

南极臭氧(O₃)层空洞的发现, 特别是环境问题的日益严重以及极端气候的频繁出现, 促使人们对大气顶层物质的长期变化进行深入研究。越来越多的证据显示, 人工排放的一些气体会导致臭氧层破坏, 如大量排放的制冷剂、推进剂、发泡剂以及喷雾剂所含的氟氯烃物质, 会分解并产生 CIO, 而 CIO 正是破坏臭氧层的元凶, 是参与臭氧层反应的关键物质。在平流层和中间层, 含羟基的物质是使臭氧层发生化学反应的重要催化剂。基于多方面的任务需求以及基于对流层探测局限性, 上层空间临边大气示踪成份气体的探测是研究大气气候变化的一个主要方面, 也越来越为各国航天科学家所重视^[1-2]。2004 年 NASA(美航天局)发射的 AURA 卫星中 EOS-MLS^[3](Microwave Limb Sounder)探测器通过贯穿同温层的测量以验证对同温层大气化学成份的理解, 并提供新的见识和尽早地探测(预期的或者不曾预料的)同温层化学成分的变化。2009 年 JAXA(日本航天局)在空间站上搭载的 SMILES(Sub-Millimeter wave Limb Emission Sounder)亚毫米波探测器^[4], 同样针对同温层大气在临边探测方式下采用超导技术以实现更高灵敏度的成份变化探测。

基于大气模型进行的计算仿真是进行大气遥感系统设计的基础, 不同的遥感任务需建立其相适应的正向模型, 并以此为基础转化为遥感载荷所对应的综合指标, 这是遥感总体方案论证必须做的工作。在对地球大气以

收稿日期: 2014-10-28; 修回日期: 2015-01-19

基金项目: 上海航天核心攀登工程及上海科委资金资助项目(C1006-YY-014-1)

及其他行星、小行星和宇宙星云的遥感探测过程中,其分子谱线的分辨和确定,各分子的热辐射和吸收特性的研究一直是推动微波、毫米波、亚毫米波以及 THz(太赫兹)探测在遥感中应用的主要动力。地球大气混合物中各种气体成份在微波、毫米波、亚毫米波以及 THz 频段表现出各自不同的辐射特性,大气无源遥感正是基于相应成份表现的辐射亮温特性而进行的差分识别。然而,各种气体成份所表现的特征谱线很多,在地球大气中相互重叠和影响,只有建立相适应的大气模型并进行计算仿真才可分辨出可实现的最佳频点,并根据灵敏度指标确定相应的技术路径。

1 “am” 大气模型简介

“am”是由SAO(Smithsonian Astrophysical Observatory)亚毫米波接收实验室编制的一款计算大气传输辐射的专用工具,适用于微波、毫米波、亚毫米波以及 THz 波段的谱分析以及路径辐射、吸收、饱和和深度等参数计算^[5-6]。“am”首先是作为空间天文观察应用来计算地球大气的影响,在Mauna Kea(美夏威夷)等多个项目中得到很好的应用。“am”基于静态大气分层理论进行C语言编程,并结合HITRAN^[7-8]数据库谱线参数进行逐线、逐层计算仿真,具有高的分辨和精确度。图1反映了“am”的基本结构。

作为基础性的模型分析工具,只要知道目标特性,以及路径中的大气参数,利用“am”仿真工具,则可分析出各种状态下的大气以及目标遥感特性。

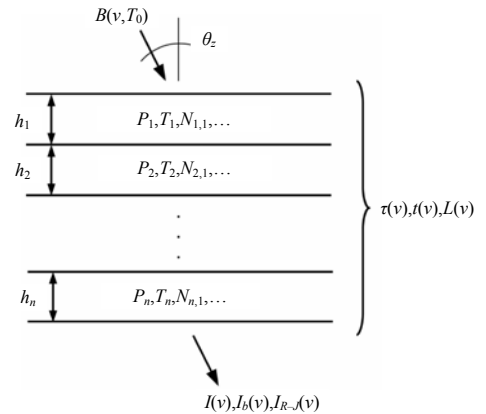


Fig.1 The ‘am’ layer model
图1 “am”基本结构图

2 临边遥感结构模型及其参数建立

针对临边大气遥感探测,卫星载荷所观察的是针对不同的切高(Z)下的全部视场路径中的能量场的积分,结合上述“am”分析,首先必须建立相对地球各大气分层的传输路径参数。

模式大气主要分为水平大气参数、热带大气、中纬度夏、冬季大气、极地夏、冬季大气以及美国标准大气^[9]等。虽然不同地区模式大气分层有所区别,为计算方便而不影响技术分析,本文仅选用美标准大气参数作参考进行综合分析。在美标准大气模型中,对流层、平流层、中间层均采取了等分分层原则,并给出各分层中的大气压、环境温度以及各成份比,因而计算每层的路径及其大气参数相对简单。按照图2所表明的临边探测路径,并通过式(1)计算出经过特定第N层的路径长度。

$$H_n = 2(\sqrt{2(R+Z)N\Delta Z} - \sqrt{2(R+Z)(N-1)\Delta Z}), (N \geq 1) \quad (1)$$

临边需分析的大气成份很多,出于对程序编程复杂度考虑,本文仅针对临边O₃探测进行综合分析,大气的其他固定成份选择“am”中的干燥大气模型。按照式(1),结合美标准大气模型,计算给出2种切高下(MLS中最低点和最高点)的各层路径参数以及平均柱密度,分别如表1、表2所示。表中所计算的参数构成了“am”设计仿真的基础,通过“am”计算出相对应状态下的遥感参数(亮温)。

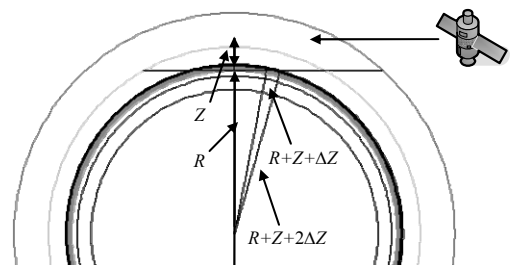


Fig.2 Limb sounding geometry
图2 临边遥感示意图

3 “am” 大气模型下的编程和仿真分析

按照上面所分析的结构参数进行独立任务下的结构程序设计(程序略)并进行仿真,之后将仿真结果进行Matlab后处理,其结果如图3所示。

在编制了2种切高下的仿真前提下,仿真了无O₃下的频谱特性,以区别于水汽谱线能量贡献。

从图3中的仿真结果可以看出,在618 GHz~635 GHz范围,明显的吸收谱线有7条,但可用于特征成份O₃临边探测还需具备下列要求:a) 全过程探测其他成份(主要是水汽)能量贡献较少,最好是没有;b) 全过程探测中谱线亮温未达到饱和;c) 为降低后续系统设计难度,有利于系统指标分解,要求全过程探测中,具有相当高

的能量及能量差(亮温差)。

经综合比较, 625.3 GHz 附近谱线是最为合适的探测频点, 这也与 NASA 的 EOS-MLS 选择该频点作为临边 O₃ 探测相一致(虽然 633.3 GHz 附近谱线也能满足上面 3 个条件, 但其谱线能量相对较窄, 尤其在 60 km 切高下更弱, 对系统设计不利)。

进一步仿真分析以确定 O₃ 相对变化时的探测灵敏度特性。如图 4, 分析了在所选最佳探测频点(625.3 GHz)于 30 km 切高时 O₃ 减少 2%(EOS-MLS 期望值指标)情况下亮温值变化。

从仿真结果可以看出, 其基本温差值可达 1 K。因而可以认为, 实现 2%变化率有效探测, 需保证探测器灵敏度技术指标优于 1 K。

表 1 30 km 切高下的分层参数

Table1 Stratified parameters at a tangent-altitude of 30 km($R=6\ 400$ km, $Z=30$ km)

number of layers	H/km	P/mbar	T/K	$\text{H}_2\text{O}/(\text{ppmV})$	$\text{O}_3/(\text{ppmV})$	condition
layer1	358.61	9.985 00	228.25	4.780	6.96	stratified parameters at a limb sounding between 30 km and 50 km ($\Delta Z=2.5$ km)
layer2	148.50	6.873 00	233.25	4.870	7.86	
layer3	114.00	4.948 00	239.70	4.925	7.82	
layer4	96.10	3.510 00	246.65	4.990	7.55	
layer5	84.65	2.470 00	253.85	5.090	6.75	
layer6	76.53	1.780 00	260.75	5.190	5.73	
layer7	70.39	1.290 00	267.40	5.240	4.68	
layer8	65.52	0.940 00	270.70	5.240	3.60	
layer9	119.72	0.610 00	265.80	5.170	2.45	stratified by $\Delta Z=5$ km above the limb-sounding of 50 km
layer10	108.24	0.322 00	253.90	4.930	1.45	
layer11	99.53	0.164 00	240.20	4.480	0.90	
layer12	92.65	0.081 00	226.45	3.850	0.50	
layer13	87.01	0.038 00	214.00	3.170	0.28	
layer14	82.31	0.018 00	203.50	2.440	0.28	
layer15	78.28	0.007 70	193.75	1.690	0.40	
layer16	74.80	0.003 10	187.90	1.090	0.60	
layer17	71.73	0.001 30	187.70	0.700	0.70	
layer18	69.02	0.000 54	191.80	0.470	0.55	

表 2 60 km 切高下的分层参数

Table2 Stratified parameters at a tangent-altitude of 60 km($R=6\ 400$ km, $Z=60$ km)

number of layers	H/km	P/mbar	T/K	$\text{H}_2\text{O}/(\text{ppmV})$	$\text{O}_3/(\text{ppmV})$	condition
layer1	508.33	0.164 00	240.20	4.48	0.90	stratified parameters at a limb sounding between 60 km and 100 km ($\Delta Z=5$ km)
layer2	210.56	0.081 00	226.45	3.85	0.50	
layer3	160.57	0.038 00	214.00	3.17	0.28	
layer4	136.20	0.018 00	203.50	2.44	0.28	
layer5	120.00	0.007 70	193.75	1.69	0.40	
layer6	108.49	0.003 10	187.90	1.09	0.60	
layer7	99.76	0.001 30	187.70	0.70	0.70	
layer8	92.86	0.000 54	191.80	0.47	0.55	

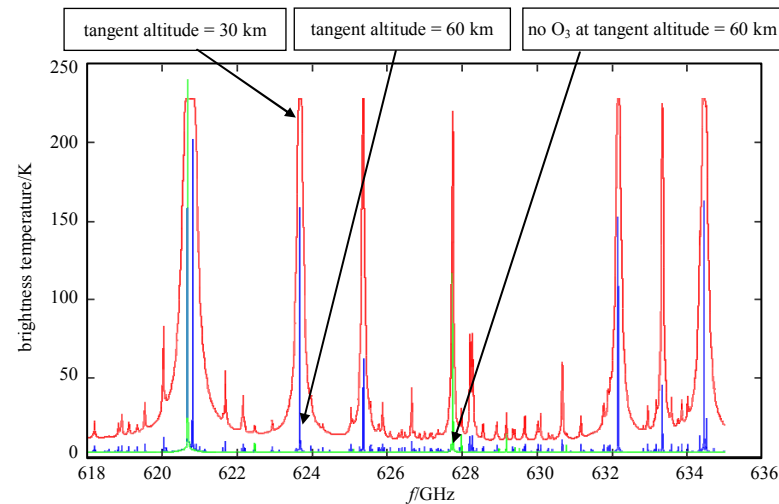


Fig.3 Results of two limb-soundings at different tangent altitudes
图 3 临边遥感 2 种切高下的仿真结果

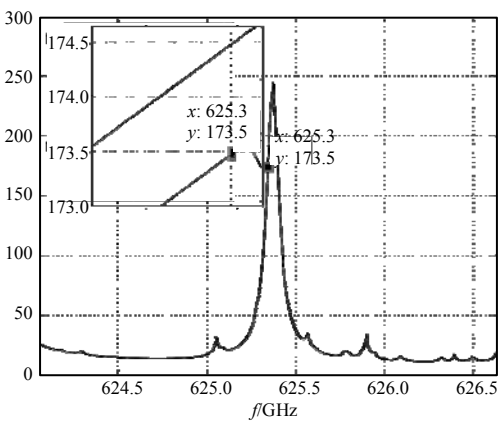


Fig.4 Brightness temperature at tangent-altitude of 30 km with the 2% change of O₃
图 4 30 km 切高下 O₃ 变化 2% 时的亮温值

4 结论

本文通过临边模型化结构设计,利用“am”模型仿真工具,初步再现和验证 MLS 相关技术指标,为载荷总体设计提供相应的数据支持。“am”模型仿真工具最早于 2006 年 AER 工程报告进行了报导,在工程应用中取得了良好的效果,“am”模型还专门设置了边带辐射计接收仿真分析,并能很好地切入 HITRAN 数据库^[8-9]文件,非常适用于辐射计遥感需求,再现了辐射定标亮温特性。并且模型具有灵活适用和性能扩展,不失是高分辨遥感的专用工具。

本文仅对正向建模设计做了一些前期工作,并将设计方法和结果进行展示,其方法仍需完善。作为遥感系统设计及技术指标分解,完成模型化的参数仿真仅仅是一个开始,还需结合任务平台进行综合考虑。另外,为完成整个临边任务的建模仿真,仍有很多工作要做。

参考文献:

- [1] LI Xiaoying, CHEN Liangfu, SU Lin, et al. Overview of sub-millimeter limb sounding[J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(6):1325-1334.
- [2] Siegel P H. THz for space: The golden age[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest(MTT), 2010. Anaheim, CA: IEEE, 2010:816-819.
- [3] Joe W Waters. An overview of the EOS MLS experiment[R]. California: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 1999.
- [4] Takahashi Chikako, Kasai Yasuko, Ochiai Satoshi, et al. JEM/SMILES limb-sounding of stratospheric trace species I: retrieval algorithm and simulator[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4152:274-282.
- [5] Scott Paine. The am atmospheric model[R]. Cambridge, Massachusetts, USA: Smithsonian Astrophysical Observatory, 2014.
- [6] Scott Paine. Atmospheric Radiometry for Astronomy and Climate Science[R]. Washington, DC: Smithsonian Climate Change Research Symposium, 2011.
- [7] 卢昌胜, 吴振森, 李海英, 等. 基于 HITRAN 的太赫兹波大气吸收特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(3):346-349. (LU Changsheng, WU Zhensen, LI Haiying, et al. Atmospheric absorption characteristics of Terahertz-wave based on HITRAN[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(3):346-349.)
- [8] Roman L S, Gordon I E, Barbe A, et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2009, 110(9-10):533-572.
- [9] Phillips Laboratory. Hawks(HITRAN atmospheric work station)[R]. North Andover, MA: Ontar Corp, 1998.

作者简介:



苏兴华(1966-), 男, 安徽省贵池市人, 硕士, 研究员, 主要研究方向为微波、毫米波、THz 遥感系统工程. email:suxinghua698229@sohu.com.

任梦飞(1991-), 男, 安徽省蚌埠市人, 在校硕士研究生, 主要研究方向为军事气象及战场指挥系统.