

LEO-LEO 微波掩星探测温度和水汽廓线研究进展*

张志华^{1,2}, 王 鑫^{✉1}, 吕达仁^{1,2}
(1 中国科学院大气物理研究所 北京 100029
2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 低地球轨道卫星间 (LEO-LEO) 微波掩星探测技术利用水汽吸收线附近信号, 通过测量信号的折射和吸收作用, 能够在没有辅助背景信息的情况下独立反演温度和水汽廓线, 从而克服 GNSS-LEO 无线电掩星技术在大气中低对流层存在的“温度-水汽模糊”问题。目前, 国内外还没有实现在轨的 LEO-LEO 掩星探测。为了促进我国 LEO-LEO 掩星探测技术发展, 本文对 LEO-LEO 微波掩星探测温度和水汽廓线研究前沿及进展进行了回顾和总结。首先介绍了 LEO-LEO 掩星探测技术的发展历史, 阐述了 LEO-LEO 掩星探测的基本原理和探测频点选择, 重点介绍了 LEO-LEO 微波掩星探测温度和水汽廓线的反演技术研究动态, 并介绍了 LEO-LEO 掩星探测任务国际进展, 最后进行了总结和展望。本研究可为实现 LEO-LEO 掩星空间探测技术提供基本科学理论参考。

关键词: LEO-LEO; 微波掩星探测; 反演; 温度廓线; 水汽廓线

中图分类号: P412.27 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2022)01-0001-12

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211109001

引用格式: 张志华, 王鑫, 吕达仁. LEO-LEO 微波掩星探测温度和水汽廓线研究进展[J]. 遥测遥控, 2022, 43(1): 1-12.

Progress of temperature and water vapor profiles detected by LEO-LEO microwave occultation

ZHANG Zhihua^{1,2}, WANG Xin¹, LYU Daren^{1,2}

(1. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: LEO-LEO microwave occultation measurement technique uses the frequencies near the water vapor absorption line to measure both refraction and absorption of the signals, enabling simultaneous retrieval of the temperature and water vapor profiles without an auxiliary background field, which overcomes the "temperature-humidity ambiguity" problem of GNSS-LEO radio occultation technique in the middle and low troposphere. At present, there is no any LEO-LEO occultation exploration mission in the space. In order to promote of LEO-LEO occultation measurement technique, the research frontiers and progress of temperature and water vapor profile detected by LEO-LEO microwave occultation are reviewed and summarized in this paper. Firstly, the development history of LEO-LEO occultation measurement technique is introduced, and the basic principle of LEO-LEO occultation detection and the frequencies selection are explained. Secondly, the research trends of retrieval technique of LEO-LEO microwave occultation detection temperature and water vapor profiles is emphasized, and the progress of LEO-LEO occultation missions is introduced. Finally the paper summarizes and offers a prospect. This study can provide basic scientific and theoretical reference for the realization of LEO-LEO occultation space exploration mission.

Key words: LEO-LEO; Microwave occultation measurement; Retrieval; Temperature profiles; Water vapor profiles

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211109001

Citation: ZHANG Zhihua, WANG Xin, LYU Daren. Progress of temperature and water vapor profiles detected by LEO-LEO microwave occultation[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(1): 1-12.

*基金项目: 中科院战略性先导科技专项空间科学背景型号项目 (XDA15021000)

✉通讯作者: 王鑫 (wangx2003@mail.iap.ac.cn)

收稿日期: 2021-11-09 收修改稿日期: 2021-12-16

引 言

近些年来, 台风、海啸、暴雨等极端天气的频发带来巨大灾害, 已使全球气候变化与应对策略成为关乎国家发展与人民生活的极端重要科学问题。温度和水汽是描述地球大气状态的两个重要参数, 具有明显的四维时空变化特性, 直接影响太阳短波辐射与地-气系统长波辐射的相互作用, 进而影响全球的辐射能量收支平衡。政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第六次评估报告显示, 相对于 1850–1900 年, 2010–2019 年全球地表平均温度已上升约 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 并指出从未来 20 年的平均温度变化来看, 全球温升预计将达到或超过 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]。报告预估, 在未来几十年里, 所有地区的气候变化都将加剧。水是地球大气中唯一能以固、液、气三相态存在的物质, 且存在三相态互相变化, 在云的演变、降水的发生及变化中都起着重要的作用。水汽在地球大气中所占比例很小 (仅 0.1%~3%), 却是大气中最活跃的部分, 对地球生态系统有重大影响^[2]。水汽还是地球大气的主要温室气体, 它对于太阳短波是透明的, 但能够吸收地球的长波辐射, 从而使大气温度升高^[3]。认识和了解温度和水汽的时空分布与变化规律, 特别是高垂直分辨率、高精度、长期稳定的垂直分布特征, 是研究认识大气能量物质交换、全球变化等重大问题的科学基础, 对气候变化研究、天气现象分析及数值天气预报等都具有重要意义。

1960 年 4 月, 美国国家航空航天局 (NASA) 成功发射第一颗气象卫星 Tiros-1, 开创了空间探测科学研究的新纪元, 卫星遥感技术具有视野开阔、观测范围广、观测时次多等优点, 成为探测地球大气的有力手段^[4]。利用卫星探测地球大气垂直结构, 经历了多个发展阶段, 从初期仅有少数几个红外宽波段通道、低空间分辨率观测, 逐步发展到红外仪器、微波仪器同平台跨卫星轨道扫描和较高空间分辨率观测。然而, 红外探测设备不能穿透云层, 地球上大约有三分之二的区域覆盖了云, 这给红外遥感系统造成了基本的采样困扰, 全球对流层的红外采样本质上是不完整的和偏干的, 例如 AIRS 像素的 90%~95% 受到云污染^[5]。另外, 强对流天气系统通常形成在多云区域, 而红外仪器无法穿透, 无法满足尽可能早地捕获强对流天气系统的愿望。被动微波探测器能够穿透云层, 例如卫星微波辐射计, 通过被动接收大气辐射的微波信号, 探测辐射亮温信息, 从而获得大气温度和湿度廓线。但由于大陆地表温度的多变性和复杂性, 此技术用于海洋表面的遥感比陆地更为适合, 且卫星微波辐射计的垂直分辨率有限, 例如先进微波探测仪 (AMSU-B), 其垂直分辨率约为 2 km。此外, 被动微波临边探测仪 (MLS) 可以提供对流层中上层的大气廓线, 垂直分辨率约为 2 km~3 km, 但容易受冰云散射的限制, 反演得出的对流层采样不完整且有偏^[6,7]。

二十世纪九十年代初, 美国的全球定位系统 GPS (Global Positioning System) 星座的建成为无线电掩星探测地球大气创造了条件^[8]。全球导航定位系统 GNSS (Global Navigation and Positioning System) 无线电掩星探测可以实现大气折射率、温度和水汽等大气参数的高垂直分辨率、高精度探测, GNSS 导航信号穿越大气层时, 不受云、雨和气溶胶的影响, 弥补了卫星可见光、红外遥感在这方面的缺陷, 具有真正全天候的优势^[9]。此外, GNSS-LEO 无线电掩星 GRO (GNSS-LEO Radio Occultation) 探测是自定标系统, 具有自校准能力, 卫星成功运行后, 不再需要进行校正和调整, 具有长期稳定的特点^[10]。GNSS-LEO 无线电掩星技术作为目前最先进的空间探测技术之一, 探测资料已被各大数值天气预报中心同化到数值天气预报模式中, 对天气预报和气候研究产生了积极的影响。然而, 在对流层低层较暖区域, 水汽比较丰富, 仅使用 GNSS 导航信号进行掩星探测, 无法准确区分温度和水汽对折射率的贡献, 存在“温度-水汽模糊”问题^[11,12]。针对这一问题, 二十世纪九十年代末, 低地球轨道卫星间 (LEO-LEO) 微波掩星探测的概念被提出。LEO-LEO 微波掩星 LMO (LEO-LEO Microwave Occultation) 采用水汽吸收线附近的微波信号^[12], 基于电磁波在大气中传播时的折射和吸收效应, 获取电磁波信号的相位延迟和振幅衰减信息, 能够在没有辅助大气背景场的情况下独立反演温度和水汽廓线。

LEO-LEO 微波掩星探测具有高精度、高垂直分辨率、高稳定性、全天候、全球分布等特点^[13,14], 它独立于现有的探测方法, 是现有地球大气探测手段的重要补充。发展 LEO-LEO 掩星探测技术, 对提高我国在大气领域的探测能力和相关研究水平具有重要的科学意义和应用价值。到目前为止, 国内外还

没有实现在轨的 LEO-LEO 掩星探测卫星, 回顾 LEO-LEO 微波掩星探测技术的发展过程和研究其未来发展趋势, 可以更好地促进我国 LEO-LEO 微波掩星探测技术的发展。

本文重点对 LEO-LEO 微波掩星探测温度和水汽廓线的研究进展进行了介绍和总结。首先介绍了 LEO-LEO 掩星探测技术的发展历史, 阐述了 LEO-LEO 掩星探测的基本原理和微波掩星探测温度、水汽廓线的技术途径与反演方法, 其次介绍了国际 LEO-LEO 掩星探测计划的前沿进展, 最后进行了总结和展望。

1 LEO-LEO 掩星探测技术发展历史

掩星技术最早可以追溯到十八世纪^[15], 天文学家利用月球和行星掩星技术进行时间测定, 在行星掩星观测过程中发现, 当恒星光线进入行星大气层时, 强度会逐渐变弱, 这个变弱的过程与行星大气标高有关, 由此提出利用自然光源如太阳或星光进行掩星行星大气探测。二十世纪六十年代, 星际飞行器问世, 利用无线电掩星技术探测行星大气廓线的设想得以实现。在地震波反演地层结构技术的基础上, 无线电掩星技术的数学方法被提出, 用于行星大气参数廓线的探测反演研究, Abel 变换法被引入到从弯曲角到折射率的反演过程中^[16]。随后, NASA 进行了一系列太阳系行星探测计划, 通过水手号、海盗号和先驱者号等探测器, 成功进行了行星大气的掩星观测, 获得了几乎所有太阳系行星及其卫星的大气廓线^[17]。然而, 利用无线电掩星技术探测地球大气的设想一直没有实现, 主要原因是掩星探测要求信号的发射端和接收端都必须在被探测体之外, 而在地球周围一直没有找到合适的观测点, 缺乏廉价信号源使得它的性价比远低于当时其他的大气探测手段, 导致没有相关的探测项目得以实施^[8]。二十世纪七十年代, 美国和苏联出于军事考虑, 开始筹建各自的全球定位系统——GPS 系统和 GLONASS 系统。二十世纪九十年代初, 美国 GPS 导航星座建成, 为地球大气掩星观测提供了无线电发射端, 以相对较低的成本为掩星技术探测地球大气创造了条件。1995 年 4 月 3 日, 搭载 GPS 接收机的 Microlab-1 低轨实验卫星被成功发射, 首次从工程方面验证了 GPS 掩星探测地球大气的可行性, 为无线电掩星技术探测地球大气拉开了序幕^[8]。

GPS/MET 掩星观测试验仪器在轨运行了约两年, 成功进行了相当数量的掩星观测, 获得了大量气压、温度和水汽廓线等宝贵大气资料。Kursinski 等研究认为^[9,18], 在低对流层较暖区域 ($>240\text{ K}$), 水汽比较丰富, 温度和水汽对总折射率的贡献无法准确区分, 造成“温度-水汽模糊性”问题。如果忽略水汽, 利用实部折射率方程、流体静力方程和理想气体状态方程, 可求解得到干空气假设下气压、密度和温度廓线, 干空气的温度通常在 7 km 以下比实际温度偏低; 如果不忽略水汽, 三个方程约束密度、压力、温度和水汽四个未知变量, 在不引入辅助先验温度信息时, 无法反演得到水汽廓线^[19]。Poli 等 (2002) 提出将一维变分 (1D Var) 同化反演方法应用于湿大气廓线的反演^[20], 以数值模式数据作为辅助背景场, 可同时反演得到温度和水汽廓线, 但其反演精度非常依赖模式初始场和模式误差, 不同的模式数据有其固有的系统偏差, 采用不同的模式数据作为背景场会导致不同的结果^[21,22]。

为了克服“温度-水汽模糊性”问题, 独立反演获得温度和水汽廓线, 在 GNSS-LEO 无线电掩星探测技术的基础上, 1995 年, 美国亚利桑那大学的研究人员开始考虑利用高于 GPS 的信号频率来测量因 22 GHz 水汽共振线引起的水汽吸收, 探索其进行掩星探测的可能性^[14,23]。1997 年, 美国喷气推进实验室和亚利桑那大学的研究人员对 22 GHz 附近频率进行掩星探测的性能进行了初步评估。1998 年, 前期相关研究成果被总结成两大提案提交给 NASA, 即 AMORE 任务和 ATOMS 任务。其中, ATOMS 提案获得资助, 研究人员对 22 GHz 和 183 GHz 水汽吸收线附近的微波掩星探测能力进行了评估研究^[23]。Feng 等 (2001) 和 Kursinski 等 (2002) 在 GNSS-LEO 无线电掩星实部折射率反演算法的基础上^[11,12], 发展了 LEO-LEO 微波掩星虚部折射率反演算法, 利用相邻频率的信号强度比消除散焦、闪烁和衍射等非吸收效应, 得到仅由吸收引起的大气差分透过率和大气的吸收系数。2005 年, 在前期研究基础上, ATOMMS 计划被提出, 用以实现近地面到中间层大气温度、水汽和气压的高精度、高垂直分辨率探测^[9]。2007 年,

Kursinski 等提出研制 ATOMMS 原型机, 并进行飞机对飞机掩星演示试验, 但由于资金限制, 飞机演示试验未得到实施, 仅成功研制了 ATOMMS 原理样机。2010 年 3 月, Kursinski 等在亚利桑那大学校园内进行了 ATOMMS 原型机“高频段”182 GHz~205 GHz 的屋顶试验, 得到了水汽吸收光谱的时间序列, 由于无法测量没有水汽吸收的“大气顶”的信号强度, 没有得到绝对水汽含量, 仅得到沿路径上水汽含量随时间的变化, 试验证明了 ATOMMS 仪器对吸收光谱线形状的敏感性^[24]。2010 年 8 月, Kursinski 等在亚利桑那州图森市北部相距约 5.4 km 的两山之间进行了 ATOMMS 原型机“低频段”22 GHz 通道的山顶试验。2011 年 8 月, 又在两山之间进行了第二次山顶试验, 在晴朗、多云和雷暴天气条件下, 测量了 ATOMMS 仪器在信号频率 24.4 GHz 和 198.5 GHz 的水汽吸收光谱, 得到了高达 17 的光学厚度条件下的精确水汽结果, 在该光学厚度以上, 信号已不可检测^[25]。

在欧洲, 早在 1996 年就提出通过添加 Ku 波段信号来分离温度和水汽。2001 年, WATS 计划被提出, 用以探测对流层和平流层的水汽和温度垂直分布, 并对 22 GHz 附近频率掩星探测的性能进行了初步评估^[26]。2002 年, ACE+计划被提出, 它由 WATS 计划的 LEO-LEO 微波掩星任务与 ACE 计划的 GRO 任务合并而成, 两颗小卫星携带 X 和 K 波段的发射机, 另外两颗小卫星携带 X 和 K 波段的掩星接收机, 测量 LEO-LEO 链路之间的电波相位和振幅变化^[6]。2004 年, ACCURATE 计划被奥地利格拉茨大学魏格纳气候研究中心提出, 目标是对上对流层-下平流层 (UTLS) 区域大气气候化学和气候趋势进行探测, 它不仅继承了 ACE+计划的 LEO-LEO 微波掩星探测技术, 还进行低轨道卫星间红外激光掩星探测 (LIO), 构成 LEO-LEO 微波掩星和红外激光掩星 (LMIO) 概念^[27,28]。2010 年, ACCURATE 计划得到进一步资金支持, 开展了红外激光掩星原型机的研制, 并于 2013 年进行了地面验证实验^[29]。

国内对 LEO-LEO 掩星探测技术的研究起步较晚。2007 年, 杜晓勇等分析了发射卫星和接收卫星的轨道高度、倾角、近地点角距、升交点赤经等轨道参数对 LEO-LEO 掩星事件数量和分布的影响^[30]。吕华平等仿真研究了一天及一个月 LEO-LEO 掩星事件的数量及分布, 并对 LEO-LEO 掩星探测频点选择进行了初步研究^[31,32]。孙立刚等对 LEO-LEO 掩星事件持续时间及卫星间相对角速度进行了仿真分析^[33]。2017 年, 中国科学院大气物理所吕达仁等提出了我国首个 LEO-LEO 掩星探测任务——CACES (Climate and Atmospheric Components Exploring Satellites) 计划, 旨在通过低地球轨道卫星间微波与红外激光掩星探测手段, 获取特定频率与谱段的信号相位和振幅变化, 反演得到气压、温度和水汽等大气参数廓线, 以及 H₂O、CO₂、CH₄ 和 O₃ 等多种气体成分廓线。中国科学院国家空间科学中心研制了 LEO-LEO 微波掩星原理样机, 探测频点在 22.23 GHz 水汽吸收线附近^[34]。2018 年, 冯梓宸等进行了 LEO-LEO 掩星信号接收技术研究^[35], 设计研制了一套针对 60 km~90 km 大气探测的 LEO-LEO 掩星接收机原理样机。

自 LEO-LEO 掩星探测概念提出以来, 依托上述提出的掩星探测计划, 研究人员开展了相关载荷研制和原理样机地面试验验证等工作, 并在 LEO-LEO 掩星轨道设计、频率选择评估、反演算法改进、探测性能分析等方面开展了一系列仿真模拟研究, 为 LEO-LEO 掩星探测技术的实现打下了坚实的基础, 积累了宝贵的经验。但由于技术条件、风险控制和预算调整等多种原因, 上述提出的计划后续均未得到在轨实施, 目前国际上仍没有实现的 LEO-LEO 掩星空间探测任务。发展 LEO-LEO 掩星探测技术, 使我国相关研究能力达到国际前沿水平, 还需从硬件研制、反演技术等方面进行大量且深入的研究。

2 LEO-LEO 微波掩星探测原理

2.1 LEO-LEO 掩星探测方式

LEO-LEO 掩星探测是基于卫星的双雷达系统, 以主动临边扫描方式探测地球大气层。LEO-LEO 掩星事件是指两颗低轨卫星 LEO (Low Earth Orbit) 分别运动到地球的两侧, 其中一颗作为发射卫星, 另一颗作为接收卫星。由发射卫星发出电波信号, 穿过地球大气到达接收卫星, 由于两颗 LEO 卫星之间的相对运动, 发射信号从大气层顶逐渐切过整层地球大气直到地球表面。或者相反, 从切过地球表面直到切过大气层顶, 称为发生了一次 LEO-LEO 掩星事件^[8]。LEO-LEO 掩星探测技术的发射和接收卫星轨

道高度一般都在 300 km~900 km 高度范围,收发距离约 6 000 km,相比 GNSS-LEO 无线电掩星探测距离相对较短,并且发射信号源的特性可以控制,能够提供较高的信噪比^[36]。

GNSS-LEO 无线电掩星探测技术使用导航卫星信号探测地球大气,GNSS 信号频点最初的选择是为了最大限度地减少大气信息的影响,用于气象观测会受到特定波长(L 波段,1 GHz~2 GHz)的限制。与 GNSS-LEO 无线电掩星探测不同,LEO-LEO 微波掩星探测技术可采用 22.23 GHz 和 183.31 GHz 水汽吸收中心线附近的频率作为发射频率探测地球大气,如图 1 所示,微波信号从发射卫星穿过地球大气层时被折射和吸收,其传播速度和路径发生变化,还会引起电波信号衰减,这些效应的综合导致电波信号的相位和振幅发生变化。通过测量电波信号的相位延迟和振幅衰减信息,可以在没有辅助大气背景信息的条件下同时反演得到密度、气压、温度、水汽等大气参数廓线。

2.2 LEO-LEO 微波掩星探测频点选择

GNSS-LEO 掩星探测技术是利用 LEO 上搭载的接收机接收 GNSS 导航信号,发射频点固定,不需要考虑发射机的信号频率。但 LEO-LEO 微波掩星不同,它除了需要在一颗 LEO 上搭载接收机,还需要在另外一颗 LEO 上搭载发射机,发射机频率通道的选择是 LEO-LEO 掩星探测技术需要考虑的重要问题之一。

LEO-LEO 微波掩星的信号穿过地球大气时,会造成信号相位延迟和大气损耗,总的大气损耗由散焦和吸收两部分引起,一般分开考虑。在各种大气成分中,水汽和氧气对电波信号的吸收衰减起主要作用。在 200 GHz 以下,存在 22.23 GHz 和 183.31 GHz 两条水汽吸收中心线。通常,在频率 f_0 处靠近共振吸收频率的气体(水汽)吸收系数 $k(f)$ 可以表示为^[37]

$$k(f) = \frac{8\pi^3 M \delta}{3cKT} |\mu_{ij}|^2 f^2 \frac{1}{\pi} \left[\frac{\gamma}{(f - f_0)^2 + \gamma^2} + \frac{\gamma}{(f + f_0)^2 - \gamma^2} \right] \quad (1)$$

其中, $|\mu_{ij}|^2$ 是偶极子矩阵元素的平方,与分子能级 i 到能级 j 的跃迁有关, M 是每单位体积的分子数, δ 是处于跃迁最低能态的分子分数, c 和 K 分别是光速和玻尔兹曼常数, T 是绝对温度, γ 是线宽, f 是工作频率,参数 δ 和 μ_{ij} 可从光谱数据表中获得。

大气中的水汽含量在整个对流层和平流层的变化超过几个数量级,不同吸收线在不同高度的吸收强度明显不同,因此必须将大气分成几个高度区域,为每个高度区域选择适当的探测频率。Yunck 等(2000)评估分析了 22.23 GHz 水汽吸收线探测大气湿度的能力^[10],结果表明,23 GHz 频率通道对探测相对干燥的上对流层大气很重要,而 10 GHz、14 GHz 和 18 GHz 频率通道对探测潮湿的下对流层大气很重要。Eriksson 等(2003)评估分析了利用 10 GHz~35 GHz 频率通道探测对流层和平流层水汽的性能^[26],研究表明,10.3 GHz、17.2 GHz、22.6 GHz 足够用于水汽信息探测,27.4 GHz 和 32.9 GHz 对热噪声更敏感,水汽反演精度更差。Herman 等(2003)利用毫米波传播模型(MPM93)计算并分析了 200 GHz 以下频率通道在不同湿度条件下的吸收光谱,包括水汽和氧气在近地面、约 15 km、30 km 和 50 km 高处的吸收衰减,研究结果表明,183.31 GHz 水汽吸收线的吸收系数更大,被用于探测水汽含量低的高空,而 22.23 GHz 水汽吸收线被用于探测水汽含量丰富的中低对流层。由于散焦、衍射和闪烁等误差影响,一般选择两个或更多频率同时测量信号衰减,靠近水汽吸收线中心的频率作为主频率,测量强信号吸收,

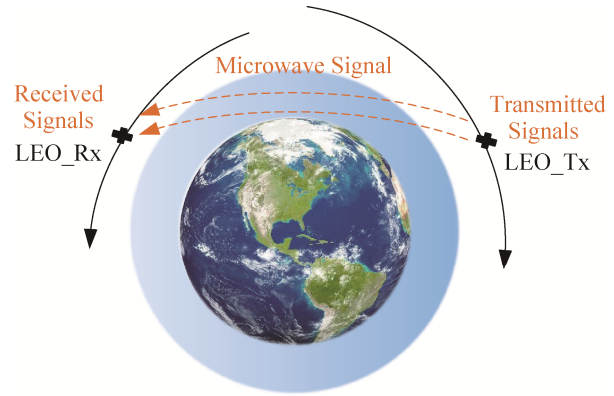


图 1 LEO-LEO 微波掩星探测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LEO-LEO occultation measurement

远离吸收线中心的频率作为参考频率, 测量弱信号吸收用于校正。两个频率的大气透过率相减得到差分透过率, 计算得到差分吸收系数, 能够消除背景吸收和散焦等不必要影响^[11-13]。LEO-LEO 微波掩星探测利用 22.23 GHz 和 183.31 GHz 水汽吸收线附近的频率, 通过在不同高度范围内使用不同信号频率对之间的差分吸收系数进行计算, 能够探测整个对流层和平流层的温度和水汽廓线。

从科学目标的角度来看, LEO-LEO 微波掩星选择频率通道时, 希望尽可能选择接近水汽吸收中心线的频点, 以便更灵敏地探测水汽, 并达到更大的高度范围。但是, 频率通道的选择涉及科学目标与国际无线电频率分配之间的权衡^[36]。例如, 国际无线电频率规定禁止直接使用吸收线中心的频点进行主动探测, 水汽吸收线中心频率及其相邻频率已经被保护用于其他专门的科学和商业应用, 不能用于 LEO-LEO 微波掩星空间任务的实际探测^[13,14]。因此, 在 LEO-LEO 微波掩星相关载荷研制设计中, 选择载荷频点时, 必须在满足国际无线电频率规则的情况下, 根据科学探测目标, 在允许的频段范围内, 选择能够提供最佳水汽信息的频点。

3 LEO-LEO 微波掩星探测反演研究

3.1 温度和水汽廓线反演

LEO-LEO 微波掩星探测的原始观测量是电波信号的相位和振幅, 在已知各种大气参数条件下, 正向模拟出掩星观测的信号相位和振幅, 是正演过程。由 LEO-LEO 掩星探测的电波信号相位和振幅数据, 获得传播路径上的大气介质信息, 是信号传播的一个反演过程。

大气介质不仅影响 LEO-LEO 微波掩星信号的传播路径, 还通过吸收影响信号振幅, 在这种情况下, 大气折射指数被认为是复数, 表示为 n_c , 则复大气折射率为 $N_c = (n_c - 1) \times 10^6$, $N_c = N' + iN''$, N' 表示复折射率实部, N'' 表示复折射率虚部, i 表示虚数单位。

在几何光学近似条件下, 利用 LEO-LEO 微波掩星反演温度和水汽等大气参数廓线, 可以总结为三大部分^[8,36,38], 即:

① 实部折射率反演。首先, 对模拟或观测到的相位延迟数据进行平滑处理, 去除异常值, 并进行电离层校正, 剔除电离层引起的电波弯曲和相位延迟; 然后, 计算多普勒频移, 结合发射卫星和接收卫星的精密轨道信息, 导出弯曲角廓线, 并对高空弯曲角进行统计优化处理; 最后, 利用经典 Abel 积分变换公式, 由弯曲角廓线反演得到实部大气折射率廓线。

② 虚部折射率反演。LEO-LEO 微波掩星的电波信号因吸收作用导致振幅衰减, 反映了射线路径上的水汽含量。首先, 对 LEO-LEO 微波掩星测得的信号振幅进行散焦和球面信号扩展校正以及归一化处理, 根据 Bouguer-Lambert-Beer 定律, 由振幅计算得到大气透过率廓线; 然后, 结合反演得到的弯曲角廓线和实部折射率廓线, 通过另外的 Abel 积分变换可以反演得到大气吸收系数廓线, 进而求得虚部折射率廓线。

③ 大气参数廓线反演。利用以上由相位延迟和振幅求得的实部折射率和虚部折射率, 结合大气静力学方程、理想气体状态方程、光谱方程, 建立非线性方程组。通过对静力学方程向下积分, 依次求解出每个高度层的气压、水汽、温度等大气参数。

LEO-LEO 微波掩星探测的实部折射率反演部分与 GNSS-LEO 无线电掩星探测的基本相同, 虚部折射率反演是 LEO-LEO 微波掩星探测特有的反演过程, 每个频率对应一个虚部折射率廓线。在湿大气条件下, 在水汽的贡献不能忽略时, 有密度、气压、温度和水汽四个未知变量, LEO-LEO 微波掩星探测将多个频率通道对应的虚部折射率方程与实部折射率方程、流体静力方程和湿空气状态方程联立, 至少有四个方程可用于约束四个未知变量, 非线性方程组是超定方程组, 不需要引入任何辅助背景场, 即可独立求解得到温度和水汽廓线, 克服了 GNSS-LEO 无线电掩星探测存在的“温度-湿度模糊”问题。

Kursinski 等 (2002) 研究了 LEO-LEO 微波掩星反演大气透过率和大气吸收系数的基本方法, 通过在不同高度范围内使用不同信号频率对之间的差分透过率进行计算, 水汽反演误差在约 1 km~75 km 内

可控制在约 1%~3%之内,温度反演误差从几千米到 80 千米可在亚开尔文量级^[12]。Syndergaard 等(2004)研究表明,在吸收系数水平梯度极端的情况下,由于不满足球对称假设,导致在 5 km 以下对流层低层水汽反演的不确定性为百分之几十^[39]。Schweitzer 等(2011)研究发现气压、温度和水汽廓线的误差分别小于 0.2%、0.5 K 和 10%,准确度基本满足探测目标要求,在三个频率均位于 K 波段时,水汽在约 11 km 以下的相对误差小于 10%,另外增加两个 183 GHz 水汽吸收中心线附近的频率时,准确反演能达到约 18 km^[36]。

在对流层低层,水汽含量往往较为丰富并伴随小尺度的剧烈变化,导致大气折射率急剧变化,从而使电波信号在传播时产生多路径效应。在大气多路径条件下,通过几何光学方法反演得到的弯曲角是碰撞参数的多值函数。针对这个问题,Gorbunov 和 Kirchengast 等进行了波动光学方法反演水汽廓线的研究^[40-42],利用正则变换方法(CT)由相位和振幅计算得到弯曲角和大气透过率廓线,然后反演获得水汽廓线,结果表明,在约 3 km 处水汽反演准确度可达到 0.5 g/kg。

3.2 云的影响

LEO-LEO 微波掩星信号可以穿透云层探测地球大气信息,但电波信号在穿过云层时,会因不同云层结构的存在被不同程度地吸收衰减。云的微物理特性依赖于水粒子的尺寸、形状和相态。通常情况下,水滴粒子是球形的,且小于 0.1 mm。冰晶可以组成各种各样的尺寸和形状,在自然界中,除了简单的多面体外,也有很多不规则冰晶和简单形状的混合体。当有云层存在时,22.23 GHz 水汽吸收线的波长约为 13.5 mm,明显大于云中液态水的颗粒尺寸,散射相比吸收作用可以忽略不计^[8]。一般来说,云中液态水的吸收大约比冰晶的吸收大两个数量级。当有云中冰晶时,冰晶相对于液态水粒子直径更大,对微波信号的散射作用更强^[26],且散射作用的影响随着频率的增加而增加,故冰晶对频率为 183.31 GHz 的散射影响比 22.23 GHz 的更大。

在对流层下部,除了水汽对 LEO-LEO 微波掩星信号的吸收作用外,如果有云层存在,云中液态水也会对总吸收做出贡献,为了反演得到高精度的温度和水汽廓线,需要去除云中液态水对总吸收的贡献。对于 LEO-LEO 微波掩星探测技术,如果提供足够的频率通道,可以区分开水汽和云中液态水引起的吸收。在反演温度和水汽廓线时,云中液态水廓线可以作为副产品被同时反演出来。Kursinski 等(2004)初步讨论了云层对水汽和温度反演精度的影响^[43],结果表明,在对流层最低层存在液态水云的情况下,水汽反演精度比晴空条件下约低 2 倍。ATOMMS 任务拟采用 22 GHz 水汽吸收线附近的至少五个频率,以分离液态水与水汽的影响,拟采用 183 GHz 水汽吸收线附近频率,探测对流层上层的水汽信息。

在理论上,云中冰晶也可以利用 LEO-LEO 微波掩星技术被探测并反演出来。183 GHz 附近的频率对冰粒子的散射比较敏感^[43],利用吸收通道和参考通道的比率可以消除几乎大部分冰晶对温度和水汽探测的影响。Kursinski 等(2004)提出,通过测量单个频率的衰减曲线来获得冰晶信息,通过测量至少 2 个频率间隔较宽的信号来获得有关冰量和其他属性的信息,具体探测和反演技术未来仍需要开展深入研究。

3.3 湍流的影响

电波信号在湍流介质中传播时,通过衍射产生干扰,从而产生相位和振幅闪烁,在测量水汽吸收特征时,湍流引起的振幅闪烁是一种噪声源^[9]。Kursinski 等研究发现,通过使用吸收通道和参考通道之间的差分大气透过率,可以在很大程度上消除绝对大气透过率中常见的不必要的宽带效应,特别是大气湍流中的振幅闪烁影响^[11,12]。

Kursinski 和 Otarola 等估计分析了对流层中层 22 GHz 水汽吸收线附近的湿湍流贡献和对流层上层 183 GHz 水汽吸收线附近的干湍流贡献^[9],研究结果表明,对于 22 GHz 和 183 GHz,单频率原始振幅变化的标准偏差大约为 7%~8%,两频率振幅比的标准偏差约为 1%~2%。较短的波长更容易受到湍流的影响,尽管原始振幅闪烁在 22 GHz 和 183 GHz 吸收线相当,但对于 183 GHz,参考通道离吸收线中心越近,在比值后产生的湍流效应的抵消效果越好。Gorbunov 和 Kirchengast(2007)进行了 2-D 湍流仿真模拟研究,评估分析了 22 GHz 水汽吸收线附近湍流的影响,研究结果表明,在低纬度的 5 km~8 km 高

度范围, 9.7 GHz 和 17.25 GHz 频率的差分大气透过率误差约为 0.05 dB 或 1%。值得注意的是, Kursinski 等估计的低纬度中对流层条件下的大气透过率误差大约是 Gorbunov 等估计结果的两倍。尽管二者用于模拟湍流效应的方法非常不同, 但近似的湍流噪声水平在某种程度上是真实的, 如何更好地理解 and 协调两种误差估计方法之间的差异还需要更进一步的研究。

在反演温度和水汽廓线时, 湍流强度可作为副产品被同时反演出来, 即对于湍流研究来说, 利用 LEO-LEO 掩星探测技术是一个测量获取湍流信息的潜在途径^[6]。

4 LEO-LEO 微波掩星探测计划进展

目前, 国际上主要有三个 LEO-LEO 掩星探测计划, 即欧洲的 ACCURATE 计划、美国的 ATOMMS 计划 and 中国的 CACES 计划。

① ACCURATE 计划

ACCURATE (Atmospheric Climate and Chemistry in the UTLS Region And climate Trends Explorer) 计划由奥地利格拉茨大学魏格纳气候研究中心在 2004 年提出, 旨在对上对流层-下平流层 (UTLS) 区域大气气候化学和气候趋势进行探测。ACCURATE 计划的探测目标是 5 km~35 km 范围内的气压、温度和水汽等大气参数廓线, 同时探测 6 种主要的温室气体, 水汽、二氧化碳和它们的同位素, 以及探测气溶胶、云层和大气闪烁等。该计划继承了 ACE+计划的 LEO-LEO 微波掩星探测任务, 同时进行 LEO-LEO 红外激光掩星探测, 是首个被提出的 LEO-LEO 微波掩星和红外激光掩星 (LMIO) 概念。LEO-LEO 微波掩星探测的频点均在 K 波段, 分别为 17.25 GHz、20.2 GHz 和 22.6 GHz, 3 个频点可以采用 1 个天线, 从而减少了仪器体积、重量和成本。ACCURATE 星座设计为 4 颗 LEO 卫星, 分布在 2 个轨道平面上, 轨道高度分别为 650 km 和 850 km, 每个轨道面分布 2 颗 LEO 卫星^[27]。

依托 ACCURATE 计划, Kirchengast 等对 EGOPS 软件包进行了升级改进, 可以进行端到端的 LEO-LEO 微波掩星仿真和反演计算, 取得了一些有意义的成果, 但到目前为止, 该计划没有开展过相关 LEO-LEO 微波掩星载荷的硬件研制工作。Kirchengast 等研制了红外激光掩星原型机, 并在 2011 年进行了地面验证实验, 研究人员对地面实验结果进行了分析研究, 之后关于该计划的研究基本处于停滞状态。

② ATOMMS 计划

ATOMMS (Active Temperature, Ozone and Moisture Microwave Spectrometer) 计划由美国亚利桑那大学在 2005 年提出, 即主动式温度、臭氧和水分微波波谱仪, 旨在探测从近地面到中间层的密度、气压、温度和水汽廓线, 以及从对流层顶到同温层的臭氧廓线。该计划组合了 GPS-LEO 掩星探测系统和 LEO-LEO 微波掩星探测系统, 只进行微波掩星探测。LEO-LEO 微波掩星的探测频点分别在 X 波段、K 波段和 M 波段, 在 22.23 GHz 水汽吸收线附近有 5 个频点, 分别是 9.7 GHz、13.5 GHz、17.25 GHz、20.2 GHz 和 22.6 GHz; 在 183.31 GHz 水汽吸收线附近有 3 个频点, 分别是 179.0 GHz、181.95 GHz 和 183.6 GHz。ATOMMS 星座设计为 12 颗 LEO 卫星, 分布在 2 个轨道平面, 轨道高度分别为 650 km 和 800 km, 每个轨道面分布 6 颗 LEO 卫星, 一天可以发生 1 000 次以上 LEO-LEO 掩星事件和 6 000~8 000 次 GPS-LEO 掩星事件^[6]。

亚利桑那大学的研究人员研制了低频段 22.23 GHz 和高频段 183.31 GHz 的原理样机, 分别在楼顶和山顶进行了水汽吸收线衰减测量试验, 但后续没有对仪器再进行改进和研制, 之后关于该计划的研究也基本处于停滞状态。

③ CACES 计划

CACES (Climate and Atmospheric Components Exploring Satellites) 计划由中国科学院大气物理研究所 2017 年提出, 旨在通过低地球轨道卫星间微波与红外激光掩星探测手段, 获取特定频率与谱段的信号相位和振幅变化, 反演大气温度、湿度和压强等大气参数, 获得 H₂O、CO₂、CH₄ 和 O₃ 等多种气体成分廓线, 并结合红外成像实现三维立体探测。LEO-LEO 微波掩星的探测频点分别在 X 波段和 K 波段,

分别为 9.7 GHz、13.5 GHz、17.25 GHz 和 22.6 GHz。CACES 星座设计为 4 颗 LEO 卫星,分布在 2 个轨道平面上,轨道高度分别为 500 km 和 550 km,每个轨道面分布 2 颗 LEO 卫星。

CACES 计划是目前国际上在研的 LEO-LEO 掩星探测计划,前期经过科学概念研究、深化论证和预先研究三个阶段,目前顺利得到中国科学院“空间科学(二期)”战略性先导科技专项的后续支持,进入到背景型号研制阶段,关键载荷红外激光掩星与微波掩星原理样机正在研制当中,目前计划开展外场实验,进行山基探测验证。

5 LEO-LEO 微波掩星探测技术展望

基于国际研究前沿与当前进展,认为未来 LEO-LEO 微波掩星探测技术研究需要在目前研究基础上,开展以下工作:

① 反演技术

Kursinski 等地面实验表明^[24],AM6.2 光谱模型比 MPM93 模型更适合测量光谱线的形状。目前的反演算法中,微波信号的模拟实部折射率和虚部折射率是由 MPM93 模型计算的,未来仍需要通过大量仿真实验,对比分析 MPM93、AM6.2 等微波传输模型对温度和水汽廓线反演精度的影响,选择最优的微波传输模型建立 LEO-LEO 微波掩星反演算法。此外,微波信号的实部折射率和虚部折射率的权重在低对流层的设置不是最佳的,不同信号频率的权重分配是固定的,为了进一步提高温度和水汽廓线的反演精度,仍需要对权重函数进行定量计算分析与改进,也可根据信号频率的强度建立动态可变的权重因子,从而提高算法的反演精度。

对流层低层水汽含量丰富,当存在较厚云层和湍流时,温度和水汽廓线反演精度会受到显著不利影响。针对此问题,Kirchengast 等提出两个解决方法^[36],一是引入先验温度场信息,利用最佳拟合温度外推方法反演 3 km~6 km 以下温度和水汽廓线,但此方法存在的缺点是需要引入辅助背景场信息,这与 LEO-LEO 独立反演温度和水汽廓线的初衷不符;二是波动光学方法,在反演大气透过率的过程中可以减少闪烁波动,能够在没有先验信息的情况下反演对流层下部的温度和水汽廓线。目前,主要有第二类正则变换方法(CT2)、全谱法(FSI)等波动光学反演方法。Gorbunov 等利用波动光学方法初步研究了 22.23 GHz 吸收线附近频点反演温度和水汽廓线的性能,仍需要进一步开展研究,比较不同波动光学方法对反演性能的影响。此外,还需对波动光学方法在 183.31 GHz 吸收线附近频点反演温度和水汽廓线的性能进行评估分析。

LEO-LEO 微波掩星理论上可以实现云中冰晶的探测,但目前关于这方面的研究非常少,在未来工作中,需要从基本原理出发,研究云中冰晶的探测和反演技术,从而实现 LEO-LEO 微波掩星技术对水汽、云中液态水和云中冰晶三相态的探测和反演。

② 硬件载荷研制

国外已研制出低频段 22.23 GHz 和高频段 183.31 GHz 的原理样机,并进行了地面实验验证,有待进行星载探测验证^[24,25];国内硬件研制领域,低频器件及相关技术较高频器件成熟,目前已经突破 X/K 波段高稳定功率发射与高精度接收技术、X/K 波段天线幅度稳定度控制技术等关键技术研究,研制出了低频段 22.23 GHz 的原理样机,未来将进行外场、山基等实验验证。但尚缺乏 183.31 GHz 原理样机相关的研制,主要原因是高频振荡器等方面的关键技术有待攻关突破。

③ LEO-LEO 微波掩星技术与 LEO-LEO 红外激光掩星技术协同研究

LEO-LEO 微波掩星技术利用微波信号的折射作用反演大气的温度、压强等大气热力学参数廓线,结合水汽吸收频点的吸收作用反演水汽廓线;再以微波掩星探测的大气热力学参数作为输入量,利用各种气体成分对相应吸收谱线频点的吸收作用反演气体浓度廓线,该过程既是 LEO-LEO 微波掩星和 LEO-LEO 红外激光掩星的同步探测过程,也是协同反演的过程,从而实现大气温度、湿度和压强等热力学参数以及 H₂O、CO₂、CH₄、N₂O、O₃ 和 CO 等多种气体成分的高精度、高垂直分辨率探测。因此,

在开展上述总结的 LEO-LEO 微波掩星技术研究工作的同时, 需要开展 LEO-LEO 红外激光掩星的研究工作, 主要包括多通道差分吸收激光雷达技术、短波红外波段高精度高灵敏度探测技术等关键技术的攻关研究。

6 结束语

LEO-LEO 掩星探测技术是目前无线电掩星技术最有前途的发展方向之一。LEO-LEO 微波掩星探测概念自提出以来, 已经开展了一系列有意义的研究, 建立了 LEO-LEO 微波掩星反演算法, 开展了系列端到端的仿真计算和反演实验, 进行了载荷原理样机的地面验证试验, 初步证明了 LEO-LEO 掩星探测地球大气的可行性和探测能力^[5,6,8,12,14,36]。本文重点对 LEO-LEO 微波掩星探测温度和水汽廓线的研究进展进行了总结, 并对未来 LEO-LEO 微波掩星探测技术研究进行了展望, 为发展 LEO-LEO 掩星空间探测技术提供了基本科学理论参考。

参考文献

- [1] 孙颖. 人类活动对气候系统的影响——解读 IPCC 第六次评估报告第一工作组报告第三章[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 654–657.
SUN Ying. Impact of human activities on climate system: an interpretation of Chapter III of WGI report of IPCC AR6[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 654–657.
- [2] 王鑫, 薛震刚, 杜晓勇, 等. 利用无线电掩星观测数据反演大气水汽剖面[J]. 电波科学学报, 2003, 18(4): 462–465.
WANG Xin, XUE Zhenggan, DU Xiaoyong, et al. Inversion of atmospheric water vapour using radio occultation data[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(4): 462–465.
- [3] WATS. Water vapor and temperature in the troposphere and stratosphere[R]. Noordwijk: ESA/ESTEC, 2001.
- [4] 卢乃锰, 谷松岩. 气象卫星发展回顾与展望[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 832–841.
LU Naimeng, GU Songyan. Review and prospect on the development of meteorological satellites[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 832–841.
- [5] HØEG P, KIRCHENGAST G. ACE+ atmosphere and climate explorer based on GPS, GALILEO, and LEO-LEO radio occultation[R]. Austria: Institute for Geophysics, Astrophysics, Meteorology, University of Graz, 2002.
- [6] KURSINSKI E R, WARD D, OTAROLA A, et al. The active temperature, ozone and moisture microwave spectrometer (ATOMMS)[M]// STEINER A K, et al. New Horizons in Occultation Research. Berlin: Springer, 2009: 295–313.
- [7] WONG S, FETZER E J, SCHREIER M, et al. Cloud induced uncertainties in AIRS and ECMWF temperature and specific humidity[J]. Journal of Geophysical Research-Atmosphere, 2015, 120(5): 1880–1901.
- [8] SCHWEITZER S. Atmosphere and climate explorer mission ACE+: Humidity and temperature retrieval performance analysis[D]. Austria: Institute for Geophysics, Astrophysics, Meteorology, University of Graz, 2004.
- [9] KURSINSKI E R, HAJJ G A, SCHOFIELD J T, et al. Observing earth's atmosphere with radio occultation measurements using the global positioning system[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(D19): 23429–23465.
- [10] YUNCK T P, HAJJ G A, KURSINSKI E R, et al. AMORE: An autonomous constellation concept for atmospheric and ocean observation[J]. Acta Astronautica, 2000, 46(2–6): 355–364.
- [11] FENG D D, SYNDERGAARD S, HERMAN B M, et al. Deriving atmospheric water vapor and ozone profiles from active microwave occultation measurements[C]// FUJISADA H, LURIE J B, ROPERTZ A, et al. Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites IV, Proc. SPIE, 2001, 4169: 299–308.
- [12] KURSINSKI E R, SYNDERGAARD S, FLITTNER D, et al. A microwave occultation observing system optimized to characterize atmospheric water, temperature, and geopotential via absorption[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(12): 1897–1914.
- [13] HERMAN B M, KURSINSKI E R, FENG D, et al. Active Tropospheric Ozone and Moisture Sounder (ATOMS)[R]. Tucson: Institute of Atmospheric Physics, University of Arizona, 2003.
- [14] HERMAN B M, FENG D, FLITTNER D, et al. An overview of the Univ. of Arizona ATOMS project[M]// KIRCHENGAST G, FOELSCH U, STEINER A K. Occultations for Probing Atmosphere and Climate. Berlin: Springer, 2004: 189–200.

- [15] 乐新安, 郭英华, 曾桢, 等. 近地空间环境的 GNSS 无线电掩星探测技术[J]. 地球物理学报, 2016, 59(4): 1161–1188.
YUE Xin'an, GUO Yinghua, ZENG Zhen, et al. GNSS radio occultation technique for near-Earth space environment detection[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(4): 1161–1188.
- [16] FJELDBO G, ESHLEMAN V R. The bistatic radar-occultation method for the study of planetary atmospheres[J]. Journal of Geophysical Research, 1965, 70(13): 3217–3225.
- [17] FJELDBO G, KLIORE A J, ESHLEMAN V R. The neutral atmosphere of Venus as studied with the Mariner V radio occultation experiments[J]. The Astronomical Journal, 1971, 76(2): 123.
- [18] KURSINSKI E R, HAJJ G A, HARDY, et al. Observing tropospheric water vapor by radio occultation using the global positioning system[J]. Geophysical Research Letters, 1995, 22(17): 2365–2368.
- [19] 王鑫, 薛震刚, 杜晓勇, 等. GPS-LEO 掩星探测地球大气的方法[J]. 全球定位系统, 2002, 27(5): 14–20.
WANG Xin, XUE Zhengang, DU Xiaoyong, et al. Method of GPS-LEO occultation measurements of the atmosphere[J]. GPS World of China, 2002, 27(5): 14–20.
- [20] POLI P, JOINER J, KURSINSKI E R. 1DVAR analysis of temperature and humidity using GPS radio occultation refractivity data[J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(D20): 4448.
- [21] 王鑫, 吕达仁, 薛震刚. GNSS 掩星中大气水汽的非线性反演[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 32–38.
WANG Xin, LYU Daren, XUE Zhengang. A non-linear inversion method for retrieval of water vapour from radio occultation measurements[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(1): 32–38.
- [22] LI Y, YUAN Y, WANG X. Assessments of the retrieval of atmospheric profiles from GNSS radio occultation data in moist tropospheric conditions using radiosonde data[J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2717.
- [23] LIU C L, KIRCHENGAST G, SYNDERGAARD S, et al. A review of LEO-LEO occultation techniques using microwave and infrared-laser signals[J]. Advances in Space Research, 2017, 60(12): 2776–2811.
- [24] KURSINSKI E R, WARD D, STOVERN M, et al. Development and testing of the active temperature, ozone and moisture microwave spectrometer (ATOMMS) cm and mm wavelength occultation instrument[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2012, 5(2): 439–456.
- [25] KURSINSKI E R, WARD D, OTAROLA A, et al. Atmospheric profiling via satellite to satellite occultations near water and ozone absorption lines for weather and climate[C]// In: Proc SPIE 9881, Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization IV, 2016: 98810Z.
- [26] ERIKSSON P, JIMENEZ C, MURTAGH D, et al. Measurement of tropospheric/stratospheric transmission at 10-35GHz for H₂O retrieval in low Earth orbiting satellite links[J]. Radio Science, 2003, 38(4): 8069.
- [27] KIRCHENGAST G, BERNATH P, BUEHLER S, et al. ACCURATE-climate benchmark profiling of greenhouse gases and thermodynamic variables and wind from space[R]. Austria: Wegener Center, University of Graz, 2010.
- [28] KIRCHENGAST G, SCHWEITZER S. Climate benchmark profiling of greenhouse gases and thermodynamic structure and wind from space[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(13): L13701.
- [29] PROSCHEK V, KIRCHENGAST G, SCHWEITZER S, et al. Retrieval and validation of carbon dioxide, methane and water vapor for the Canary Islands IR-laser occultation experiment[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2015, 8(8): 3315–3336.
- [30] 杜晓勇, 符养, 薛震刚, 等. 卫星轨道参数对 LEO-LEO 掩星事件数量及分布影响的模拟研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(5): 1289–1297.
DU Xiaoyong, FU Yang, XUE Zhengang, et al. Simulation of the impacts of satellite orbit parameters on the number and distribution of LEO - LEO occultation events[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(5): 1289–1297.
- [31] 吕华平, 严卫, 王迎强, 等. LEO-LEO 掩星事件仿真研究[J]. 遥感信息, 2015, 30(2): 65–70.
LYU Huaping, YAN Wei, WANG Yingqiang, et al. Investigation of LEO-LEO occultation simulation[J]. Remote Sensing Information, 2015, 30(2): 65–70.
- [32] 吕华平, 严卫, 柳聪亮, 等. LEO-LEO 掩星探测频点选择分析与仿真研究[J]. 气象科学, 2016, 36(2): 212–217.
LYU Huaping, YAN Wei, LIU Congliang, et al. Analysis and simulation of frequency selection of LEO-LEO occultation atmosphere detection[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2016, 36(2): 212–217.
- [33] 孙立刚, 吴小成, 胡雄. LEO-LEO 掩星事件持续时间及卫星间相对角速度仿真分析[J]. 空间科学学报, 2017, 37(5):

- 574–584.
- SUN Ligang, WU Xiaocheng, HU Xiong. Simulation of duration of LEO-LEO occultation events and relative angular velocity between satellites[J]. Chinese Journal of Space Science, 2017, 37(5): 574–584.
- [34] WU C, SUN Y, WANG X, et al. A LEO-LEO occultation system using microwave signals[C]//IGARSS 2018: 3147–3148.
- [35] 冯梓宸. LEO-LEO 掩星信号接收技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2018.
- [36] SCHWEITZER S, KIRCHENGAST G, SCHWAERZ M, et al. Thermodynamic state retrieval from microwave occultation data and performance analysis based on end-to-end simulations[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(D10): D10301.
- [37] KOLBE W F, BUSCHER H, LESKOVAR B. Microwave absorption coefficients of atmospheric pollutants and constituents[J]. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1977, 18(1): 47–64.
- [38] KIRCHENGAST G, SCHWEITZER S, SCHWAERZ M, et al. Advanced retrieval processing chain for derivation of atmospheric profiles from LEO-LEO radio occultation data[R]. Austria: Wegener Center, University of Graz, 2006.
- [39] SYNDERGAARD S, FLITTNER D E, KURSINSKI E R, et al. Simulating the influence of horizontal gradients on retrieved profiles from ATOMS occultation measurements—a promising approach for data assimilation[M]// KIRCHENGAST G, FOELSCHE U, STEINER A K. Occultations for Probing Atmosphere and Climate. Berlin: Springer, 2004: 221–232.
- [40] GORBUNOV M E, KIRCHENGAST G. Advanced wave-optics processing of LEO-LEO radio occultation data in presence of turbulence[R]. Austria: Institute for Geophysics, Astrophysics, and Meteorology, University of Graz, 2005a.
- [41] GORBUNOV M E, KIRCHENGAST G. Processing X/K band radio occultation data in the presence of turbulence[J]. Radio Science, 2005b, 40(6): RS6001.
- [42] GORBUNOV M E, KIRCHENGAST G. Fluctuations of radio occultation signals in X/K band in the presence of anisotropic turbulence and differential transmission retrieval performance[J]. Radio Science, 2007, 42(4): RS4025.
- [43] KURSINSKI E R, FENG D, FLITTNER D, et al. An active microwave limb sounder for profiling water vapor, ozone, temperature, geopotential, clouds, isotopes and stratospheric winds[M]// KIRCHENGAST G, FOELSCHE U, STEINER A K. Occultations for Probing Atmosphere and Climate. Berlin: Springer, 2004: 173–187.

[作者简介]

张志华 1990 年生, 在读博士研究生, 主要研究方向为 LEO-LEO 微波掩星探测技术。

王 鑫 1977 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为大气物理、大气与海洋遥感。

吕达仁 1940 年生, 院士, 研究员, 大气物理学家。

(本文编辑: 傅 杰)