0254-6124/2024/44(5)-0818-14 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WANG Kexin, WANG Zhenzhan. Advances in the Study of the Methods for Detecting the Earth Magnetic Field from Passive Microwave Remote Sensing (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(5): 818–831. DOI:10.11728/cjss2024.05.2023–0117

地球磁场微波遥感探测方法研究进展*

王可昕[1,2] 王振占[1]

1(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)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 地磁场是地球的重要物理场之一, 地磁学在地球与空间物理以及地质等领域具有极为重要的作用. 强便利性、低成本、广空间范围的磁场测量方法与高精度、多维度的地磁测量数据的获取, 是地磁学等领域科学与应用研究得以深入的重要依据. 为解决基于高精度磁强计的原位磁场测量方法在效率和探测范围等方面的局限, 遥感探测已经逐渐开始成为一个新的磁场探测研究领域. 本文基于微波辐射计遥感手段的地磁场遥感探测方法, 综合分析了地磁场微波遥感技术方法的基本原理、研究进展与应用现状, 并在此基础上讨论了其在探测能力等方面的需求、技术难点及未来的发展趋势, 进而对未来磁场遥感探测研究, 例如行星磁场遥感探测等提出了新的展望.

关键词 地磁场, 磁场遥感探测, 微波遥感, Zeeman 效应

中图分类号 P353.1

Advances in the Study of the Methods for Detecting the Earth Magnetic Field from Passive Microwave Remote Sensing

WANG Kexin[1,2] WANG Zhenzhan[1]

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

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract The geomagnetic field is a crucial physical field of the Earth, playing an essential role in various domains such as earth and space physics research, applied research in geology, and national strategic security. To facilitate profound scientific and applied investigations in geomagnetics and related fields, it is important to develop magnetic field measurement methods that are highly convenient, cost-effective, cover a wide spatial range with exceptional precision, and provide multi-dimensional geomagnetic data. In order to overcome the limitations of on-site magnetic field measurement methods based on high-precision magnetometers regarding efficiency and detection range, remote sensing detec-

* 国家自然科学基金项目资助 (42375141)

2023-10-24 收到原稿, 2024-01-16 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

tion has emerged as a promising new area for magnetic field detection. This paper comprehensively analyzes the fundamental principles, research progressions, and application status of microwave radiometer remote sensing technology for studying the geomagnetic field. Based on this analysis, discusses the requirements and technical challenges faced by this method along with future development trends aimed at enhancing its detection capabilities. Furthermore, it proposes new prospects for future research in magnetic field remote sensing detection including planetary magnetic field remote sensing.

Key words Geomagnetic field, Remote sensing of magnetic field, Microwave remote sensing, Zeeman effect

0 引言

磁场是宇宙中恒星、行星、卫星等天体的基本属性[1]. 不同星体受其在宇宙中的位置不同、外部环境不同与自身特征各异等因素影响, 磁场具有复杂的时空分布特征. 对这一复杂时空分布特征的观测和解释, 有助于推进磁场产生机理及变化、行星的起源与演化、内部构造、空间天气等领域的深入研究, 是探索地球及任何深空环境首先需要了解的基本物理场之一.

对地球而言, 地磁场一般是指从固体地球内部到地球外部磁层顶之间, 不同时空尺度上所有场源产生的磁场[2]. 地磁场与地球电场、地球重力场等均为地球重要的固有物理场, 对地球环境的维持, 以及生物和人类的生存繁衍起到不可替代的保护作用. 其由基本磁场和变化磁场两部分组成, 前者蕴含了地球起源与演化进程的重要信息, 后者则与电离层变化和太阳活动有关. 地磁场的时空分布和变化情况反映了地球内部和日地空间的活动特征, 观测和解释地磁场也是研究地球物理和空间天气的重要途径之一[3]. 同时, 地磁学研究与导航、航天器空间环境监测等领域密切相关, 具有广泛的应用前景, 已成为一种国家重要的战略资源[4].

基于地磁场的重要意义和应用价值, 地磁场测量成为了地磁学等领域研究得以开展的重要基础. 在不同的地磁场探测方法中, 目前主要基于高精度磁强计的原位磁场测量技术已有了较为长足和成熟的发展, 但仍存在可探测空间范围有限或效率不高等局限性. 本文针对地磁场微波遥感探测这一新兴领域, 分析利用微波遥感手段进行地磁场探测的主要技术原理及国内外研究进展, 展望磁场微波遥感探测技术的发展与应用前景.

1 地磁场探测方法及局限性

1.1 探测方法

1.1.1 原位探测

常规地磁场测量研究中, 通常使用基于不同磁效应原理的磁力仪进行原位测量, 即通过将磁力仪等磁场测量传感器放置于所需测量的地区, 建立大量地磁监测站, 或者借助于舰船、飞机、人造卫星等各类平台, 将磁场测量设备整体运载至不同的空间位置, 采集所处区域磁场数据. 通过获得不同地区、不同精度和稳定性的地磁测量结果, 并参考不同测量方法综合得到一个地磁场测量的统计结果[5]. 近些年, 随着技术的不断发展完善, 一些新型地磁测量设备也开始在现代地磁测量系统中得到广泛使用, 例如基于约瑟夫森效应的超导量子干涉器件、基于塞曼能级光泵效应的量子磁力仪等[6], 为获得大量更高灵敏度、更高精度、更广动态范围的优质测量数据提供了极大帮助.

长期以来, 通过原位探测获得地磁场观测数据的最主要的方法即依靠地球上广泛建立的地磁监测站. 为进一步增进科学研究数据效用的最大化, 于1986年成立了国际地磁台网 (International Real-Time Magnetic Observatory Network, INTERMAGNET). 经过几十年的发展, 全世界已有150多个地面地磁监测站加入, 其中中国包括北京站、长春站、肇庆站、兰州站、乌鲁木齐站, 目前可实现固定地点矢量及标量地磁观测分辨率在0.01～0.1 nT的高质量数据获取, 一定程度上代表了全球地磁观测的最高水平[7].

虽然通过地磁监测站获取的地磁场探测数据具有精度高、稳定性强、数据可靠性强等优势, 但其面临的最大困难和局限是全球空间分辨率差. 这些观测站在全球的分布存在较大的区域性差异, 受到经济、

科技水平及实际地理环境的影响, 主要体现在发达国家、陆地地区台站多, 欠发达地区、海洋及极端环境地区台站少. 为了获取更为丰富的地磁场探测数据, 开展基于多种技术手段的、不同时间、地域及海拔高度等条件下的地磁场探测显得尤为重要. 在此基础上, 通过搭载高精度地磁探测设备的航空磁测、海洋磁测和卫星磁测等方法则进一步扩展了可进行地磁探测的空间范围.

通常海洋磁测和航空磁测是将磁场测量传感器置于船舶和飞机上进行标量磁测数据的获取, 保证了较高的探测精度, 其可探测范围与舰船行驶区域、飞机飞行高度等相关, 灵活性较强. 但使用以上方法进行区域磁测数据补充时, 通常由于距离地磁台站较远, 很难使用地面台站数据对观测结果进行处理和校准, 存在一定的数据误差[3]. 并且, 由于不同磁场测量方法所使用的测量仪器不同, 使得相互之间数据差异较大, 在后续应用中为数据的整合与处理带来了较大的困难, 因此数据的应用程度十分有限.

随着近几十年来的技术发展, 卫星磁测的出现大大弥补了这一缺陷. 通过星载标量和矢量磁力仪进行磁场的长期观测, 在延续了高探测数据精度特点的同时, 具有数据一致性强, 测量范围广、全球覆盖性强, 探测效率高等优势. 随着技术进步, 单颗卫星的磁场测量逐渐向着多星协同模式发展[8], 美国 Swarm 卫星任务[9] 首次采用了三颗磁测卫星协同探测, 在相同时间内可获得的不同场源的更多信息, 以确定不同场源的磁场信号, 为全球磁场精确建模、地球不同圈层磁场等方面的科学研究带来了巨大的价值. 近年来, 中国在卫星磁测领域开展了大量工作, 相继发射了张衡一号[10,11]、澳门科学一号磁测卫星, 均已投入使用, 可获取大量有效的高精度地磁观测数据, 极大弥补了中国在全球地磁场信息获取方面的不足, 其探测数据可用于全球地磁场监测、地震机理、空间环境监测、地球内部结构等重大科学问题研究. 其中基于张衡一号 01 星数据产出了国际地球物理场建模历史上的首个中国模型 (CSES-IGRF 2020.0), 并入选了第 13 代全球地磁场参考模型 (International Geomagnetic Reference Field-13, IGRF-13)[10].

全球地磁场的原位探测确保了其数据的准确性, 虽然通过种种方法将高精度磁场探测设备可搭载位置不断拓展, 但由于原位探测方法本身的局限, 即使是卫星磁测, 可获得的全球磁场数据源仍然与其所在轨道高度保持一致, 难以补充卫星与航空磁测之间中高层大气区域的磁场数据空白.

1.1.2 光学遥感探测

近几十年来, 随着遥感探测技术的发展和应用需求的提升, 除高精度原位磁场探测以外, 国内外逐渐开始开展了一系列远程地磁场探测研究, 越来越多的磁效应原理被用来制作地磁探测仪器, 按探测手段不同主要可分为激光雷达和微波辐射计两类. 在利用激光雷达手段进行地磁场数据的遥感探测的研究方面, 主要包括钠共振荧光激光雷达和雷达共振增强多光子电离 (Radar Resonance-Enhanced Multi-Photon Ionization, Radar REMPI) 技术.

1.1.2.1 钠共振荧光激光雷达

通过钠共振荧光激光雷达实现地磁场的遥感测量, 主要是利用地球大气中的存在的钠原子层. 这一厚度 10 km 左右的天然钠层是流星烧蚀的残留物[12], 主要存在于平均海拔 90 km 左右的地球中间层大气中. 随着技术发展, 可靠性强、小型、廉价、易于调制的半导体激光器出现, 基于碱金属元素的原子磁强计迎来了新的繁荣, 并达到了极高的测量灵敏度[13]. 因此从基本理论原理上讲, 利用钠共振荧光技术进行磁场测量本质上是一种光学原子磁力仪.

但是钠共振荧光技术磁场测量方案一直以来仍是基于原位测量的, 直到近十几年才有一些远程测量方案的提出. 2011 年 Higbie 等[14] 受 Happer 等[15] 关于天文钠激光导星技术 (Laser Guide Star, LGS) 用于大气湍流补偿研究的影响, 提出了一种远程测量地磁场的技术方法, 该方法将钠原子充当了中间层磁场强度的遥感器, 可实现地球大气钠层 90 km 高度附近的远程磁场测量, 探测灵敏度约为 1 nT 左右.

Kane 等[12] 通过使用平均功率为 1.33 W 且工作波长为 589.159 nm 的激光脉冲, 测量了地球中间层磁场, 并与国际常用地磁模型得出的估计值进行比较, 得出了较高的一致性, Bustos 等[16] 在研究与实验中测量了钠的拉莫尔进动频率与相应的磁场, 准确度为 0.28 mG·Hz$^{-1/2}$, 基本验证了该方案从原理到实验上的可行性.

中国的相关研究中, Zhang[6] 在 2020 年基于对海面和大气地磁环境进行远程监测的目的, 提出了基于钠原子共振荧光的地磁测量系统研究方案, 并以海面

环境应用为例进行了实验室测试, 初步完成了钠共振荧光地磁测量系统的原理验证工作. 实验表明, 在垂直方向的荧光信号中发现了磁共振信号, 可得到的磁场最小分辨率约为 286 pT·Hz$^{-1/2}$.

目前已进行的研究中, 这种技术方法基本还处于原理验证和实验测量阶段, 尚未正式投入应用, 已有的探测系统中可供参考的主要是钠共振荧光激光雷达. 随着国内外对钠共振荧光激光雷达的研究不断深入, 一些研究机构开展了钠测温测风激光雷达的研制, 并进行了一系列科学观测[17–21]. 但这些仪器研制与相关研究的目的主要在于中高层大气温度、大气风场、气溶胶、重力波和潮汐波等领域, 针对中高层大气高度地磁场的测量和应用, 仍然较为匮乏, 未有对其磁场探测能力、水平等的系统性分析与论证.

1.1.2.2 Radar REMPI 技术

类似于钠共振荧光技术将大气钠层作为磁场遥感实现的媒介, 从而进行远程磁场测量的基本思路, 近几十年的研究中, 研究考虑利用激光激发大气中的其他原子或分子, 实现远程检测磁异常, 相关方案的可行性研究主要集中于 Xe^{129} 等的利用上.

基于磁共振原理的地磁遥感观测机制在 20 世纪七八十年代被提出, 研究考虑使用大气成分中的 Xe^{129} 作为磁场探测的敏感因子, 进行 nT 级磁场的远程测量. 随着多光子光谱技术的不断进步, 雷达共振增强多光子电离技术由于其选择性强、检测灵敏度高等优势, 在近十余年逐渐发展用于测量大气中气体分子, 因此得以开发利用 Radar REMPI 技术进行远程磁场异常扰动检测的潜在能力.

美国普林斯顿大学 Dogariu 和 Miles[22] 进行了利用基于微波散射的 Radar REMPI 技术远程探测大气中的局部痕量气体, 并在后续研究[23,24] 中进一步开发和证明了使用 Radar REPMI 检测 Xe^{129}, 实现了大气中低于 10 ppm 氙的检测, 这为磁场遥感探测能够实现提供了技术上的可能性.

直到 2019 年 Galea 等[25] 建立了一个磁场存在条件下基于 Radar REMPI 技术的雷达模型, 并通过实验进行了验证, 说明了磁场的大小和方向对探测结果的影响, 并展示了将此原理用于测量矢量磁场的潜在可能性.

目前, 对 Radar REMPI 技术用于远程测量地磁场的研究仍停留在原理与实验验证阶段, 由于方案系统较为复杂, 便利性不高等劣势, 开展有价值、有针对性的实际应用相对困难, 暂时未有具体的应用得到开展. 此外, 中国的相关研究中, 还没有将类似技术用于远程探测地磁场的先例.

1.2 主要局限

通过上述地磁场探测方法已获取了大量观测数据并开展了诸多后续应用, 但这些探测方法的适用性、精度、测量范围等各有优劣. 表 1 给出了地磁场探测方法的主要优缺点.

综上所述, 无论是基于高精度磁场探测设备的各种原位探测方法, 还是近十几年有所发展但尚未开展针对性实际应用的光学遥感磁场探测方法, 都在技术进步的推动下, 不断在提高磁场探测精度、获取更丰富探测数据等方面进行探索, 力求解决应用难点. 但这些方法目前仍面临着一些实际困难与局限.

(1) 地磁场探测便利性较低或探测成本昂贵. 常规的磁场原位探测方法中, 数据的获取依赖于观测平台所处位置, 因此其便利性往往不高, 并且成本也较为昂贵. 通过单次测量任务可获取的区域磁场数据不仅极为有限, 而且还面临噪声干扰、某些探测区域载体无法达到等困难情况[6], 对探测结果会产生一定影

表 1 地磁场探测方法的主要优缺点

Table 1 Main advantages and disadvantages of geomagnetic field detection methods

探测方法	具体方法	探测高度	优势	局限性
原位探测	地磁监测站	地表及低空(通常为几百米至数千米)	精度高, 可达10^{-1} nT量级	受探测器所处位置限制, 探测数据的空间范围有限, 数据整合处理困难
	磁测卫星	卫星轨道高度附近	探测精度、探测效率高	难以补充卫星与航空磁测之间中高层大气区域的磁场数据空白
遥感探测	钠共振荧光雷达 Radar REMPI技术	90 km左右 依赖大气Xe存在区域	精度可达 1 nT左右[15], 遥感手段不受探测器位置限制	系统复杂、应用性不高; 无法实现快速的全球连续观测

响. 而利用卫星搭载磁场测量设备进行磁场测量方面[26–28,8], 虽然已经实现了高海拔区域的磁场测量, 但多卫星任务的所需巨额费用对其整体部署和广泛使用带来了极大的限制.

(2) 可探测空间范围有限或探测效率较低. 地磁监测站的测量数据难以达到全球覆盖, 而卫星磁测虽然具有全球高覆盖性、观测数据处理的统一性强以及数据精度与分辨率的一致性高等突出特点, 但受限于卫星所在轨道高度, 仍然难以对中高层大气区域的磁场数据进行补充. 图 1 给出了采用以上几种磁场探测方法进行地磁场探测时, 可获磁场数据的海拔高度范围, 通常为 20 km 以下或卫星轨道高度 (几百至 1000 km). 可以发现, 目前的探测手段中对于 20～300 km 的海拔高度区间, 磁场探测能力仍然不足, 可获取的磁场数据极为匮乏, 使得地磁数据垂直延拓的可靠性存在不足. 而光学遥感探测方法虽然采用遥感手段, 解决了必须将磁场探测设备搭载至所探测空间区域的限制, 可进行的一定精度的磁场探测, 但由于这些方法的检测选择性强, 适用性却更加有限, 其可探测范围受限于特定的气体分子在大气中的分布情况, 难以实现对地磁场的全球大面积连续观测以及开展广泛的实际应用.

(3) 磁场遥感测量应用缺位. 相对于恒星磁场探测常使用遥感观测手段, 针对地磁场探测的应用几乎很少采用远程遥感的方法. 如果地磁场能在 nT 水平或更高的水平上被远程遥感测量, 对地磁场演变的研究或许将会获得显著的进展[29]. 同时, 地磁场是为数不多的几乎完全采用原位测定的重要测量磁场之一, 无法远程获取这一信息也阻碍了一些后续可能的应用方向.

针对以上主要局限, 利用星载微波遥感方法开展具有一定精度的远程地磁场探测, 是在兼顾一定探测精度的情况下, 大大提高探测效率、降低成本, 满足全球探测数据一致性, 实现中高层大气区域地磁场数据补充的重要手段, 具有重要的应用价值.

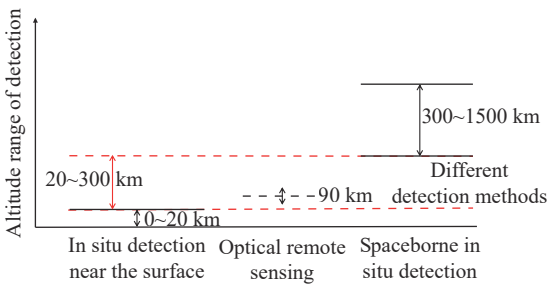

图 1 不同地磁场探测方法可探测的磁场海拔高度范围

Fig. 1 Detected range of magnetic field elevation by different geomagnetic field detection methods

2 微波遥感地磁场探测研究进展

2.1 机理研究

使用微波遥感手段获取地磁场的远程探测数据, 是基于微波大气遥感领域中对氧气吸收谱线的塞曼 (Zeeman) 效应深入研究来进行的, 主要通过具有高分辨率频谱探测能力的微波/太赫兹辐射计系统实现.

这一技术中应用的基本原理是由荷兰物理学家 Zeeman[30] 在 1897 年通过实验发现的塞曼效应, 由于在磁场影响下原子总磁矩在磁场中受到力矩作用, 绕磁场方向旋进, 从而引起附加能量ΔE, 单一的原子谱线发生了分裂且产生了极化特征. 图 2 以 118.75 GHz 的氧气跃迁谱线为例, 给出了在磁场作用下产生的谱线分裂情况.

理论推导的结果表明, 塞曼效应产生的谱线分裂频率间隔Δv_{Z}与磁场强度 B 有着明显的相关性, 并与谱线跃迁角动量等因素有关, 即

$$\Delta v_{\mathrm{Z}} = \frac{\mu_{\mathrm{B}} B}{h} \cdot \left(M_{2J} g_{2J} - M_{1J} g_{1J}\right). \tag{1}$$

其中, h为 Planck 常数, μ_{B}为玻尔磁子; 下角 J代表跃迁谱线的总角动量量子数; M_J为磁量子数, 在取值上只能取–J, –J+1,…, J–1, J共 2J+1 个值, 即在磁场影响下, 某一种跃迁产生的谱线, 将分裂为 2J+1 条; g_J为电子总角动量的朗德因子, 表征了原子总磁矩和总角动量之间的关系, 以及谱线对磁场的敏感程度.

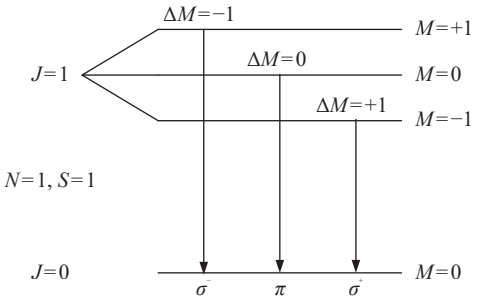

图 2 外加磁场时由于塞曼效应产生谱线分裂

Fig. 2 Line splitting occurs due to Zeeman effect when magnetic field is applied

基于这一原理, 辐射计可通过测量随磁场强度变化的氧分子吸收谱线的亮温变化和极化特性获取地磁场信息, 因此塞曼效应的辐射传输精确建模是最重要也是最基础的一步.

1996 年 Hartmann 等[31] 在 NASA 的 ARLAS 任务中利用毫米波大气探测器 (MAS), 在 61.1509±0.062 GHz 频率范围内观测到了氧气谱线的塞曼效应. 后续研究[32] 对氧气的辐射传输模型进行了修订.

近年来, 在 Eriksson 等[33] 开发的大气辐射传输模拟器 (Atmospheric Radiative Transfer Simulator, ARTS)2.0 版本中, 增加了计算塞曼效应的模块, 该模块由 Larsson 等[34] 进行完善, 采用 Stokes 参量形式建立了磁场对微波区域分子氧吸收影响的模型. 在实验验证及模型应用方面, Navas-Guzmán 等[35] 利用地基微波辐射计测量了平流层氧气以 53.07 GHz 为中心频率的发射谱线的塞曼效应, 首次使用高分辨率光谱仪 (1 kHz) 测量得到了氧的主要同位素由于塞曼效应产生的辐射极化情况, 并利用 ARTS 对测量结果进行了模拟验证.

同时, 由式 (1) 可以发现, 塞曼效应产生的分子谱线分裂且极化的特征与磁场环境相关, 其分裂谱线产生的偏移幅度主要取决于磁场强度, 并且, 不同组分的分裂谱线相对强度会随着极化和角度等因素的变化而变化. 因此, 利用氧气分子塞曼效应进行磁场微波遥感探测的方法, 主要基于对氧气吸收峰附近在磁场影响下的辐射频谱和极化的观测, 对磁场强度和方向的探测能力与辐射计的谱分辨率和灵敏度等息息相关. 目前, 随着利用星载微波遥感进行地磁场探测的应用研究逐渐深入, 118.75 GHz 附近的氧气吸收峰由于其较为明显, 且塞曼分裂形式较为简单、分裂程度相对较强, 更便于后续仪器设计中对探测通道进行合理设置, 能更好地观察与分辨氧分子的塞曼分裂谱线特征, 正在成为地磁场微波遥感探测相关的诸多后续机理及应用研究中常考虑使用的探测频段.

机理和模型的研究为利用微波辐射计探测并反演中高层大气高度的地磁场提供了极为重要的理论基础, 将微波遥感地磁场的方案由理论带到了现实, 为后续开展广泛应用提供了重要基础. ARTS 是目前大气辐射传输模型中极少数可以实现氧气分子塞曼效应模拟的模型之一, 目前该模型初步实现了相关参数的模拟, 但在模型细节修正、计算效率及后续磁场反演算法研究等方面仍有不足. 而中国微波大气遥感领域开展的相关理论研究中, 十分缺乏对针对这一新兴方向的理论及实验探索, 有待未来结合常规大气辐射传输模型及反演算法相关研究的优势, 建立有效的正、反演模型.

2.2 应用研究

2.2.1 基于 Aura/MLS 的极区电激流影响的磁场扰动探测

2017 年 Yee 等[36] 利用搭载在 Aura 卫星上的微波临边探测仪 (Microwave Limb Sounder, MLS) 获得 118 GHz 附近O_2分子频谱辐射测量结果, 反演得到了 80～100 km 高度的磁场, 并通过减去地球主磁场得到剩余磁场扰动 (ΔB), 以研究极区/赤道电激流影响下产生的磁效应的结构与动力学特征等. 该研究首次提出利用其塞曼效应测量电离层高度附近由于极光电激流产生的磁场扰动, 并证明所导出的结果与地面磁力仪所测得的结果是高度相关的, 其比较结果如图 3 所示[36].

Yee 等[36] 通过分析 2004 年 7 月发射的 Aura/MLS 的 118 GHz 氧分子探测数据, 基本得出了磁场扰动的大规模分布形态, 通过对比发现与极区电激流的常规统计分布一致, 评估了这一新型技术原理用于测量地磁场的可行性. 并且基于 MLS 在 118 GHz 附近的氧气频谱可得到较为显著的塞曼分裂特征, 这在探索磁场微波遥感方法可行性方面有着重要意义, 但就像 Yee 等[36] 指出的那样, 将这一特征用于磁场反演方面仍缺乏充分的研究. 此外, 研究中所使用的 Aura/MLS 对中高层大气的探测数据有限, 极化测量的类型也较为单一, 仅能在磁场遥感方面表现出一定的探测精度和可行性, 无法展示出利用氧分子塞曼效应进行磁场探测的最大潜力, 在后续进一步开发利用大气遥感手段探测地球及行星磁场的应用, 以及设计针对性更强的微波探测仪等研究领域, 仍有极大的发展和研究前景.

2.2.2 JAXA-SMILES-2 任务

亚毫米波临边探测器 2(Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder 2, SMILES-2) 是日本宇宙航空研究开发机构 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) 提出的一项卫星任务[37], 是其 2009 年发射的超导亚毫米波临边辐射探测仪 (Japanese Experiment Module/Super-conducting Submillimer-

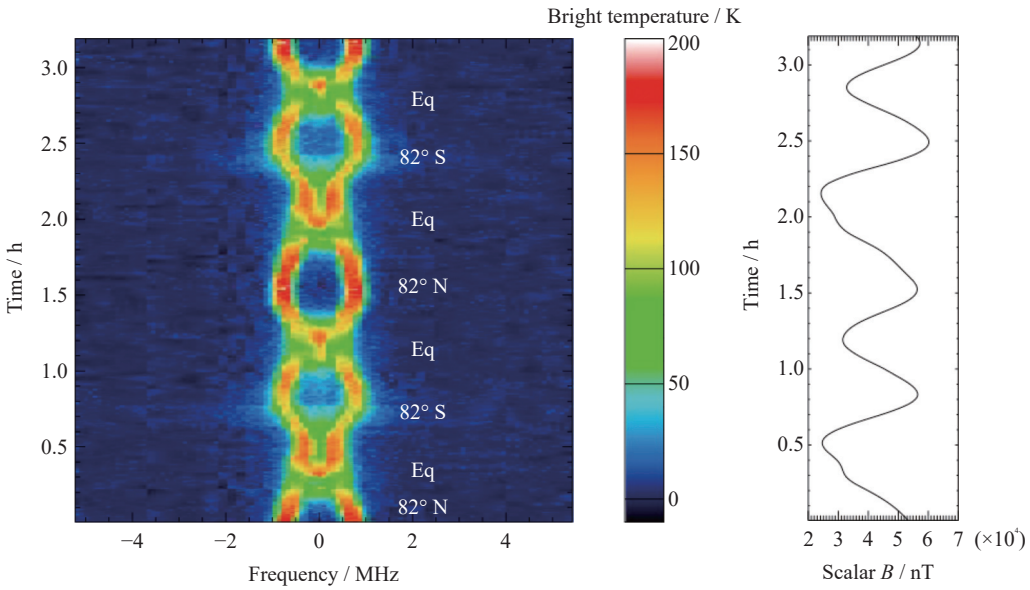

图 3 (a) Aura/MLS 垂直极化接收器于 2005 年 1 月 1 日在 82～92 km 切高处 118 GHz 附近的氧气频谱, (b) 参考 IGRF-12 地磁模型在相同轨迹得到的 88 km 高度处的地磁场强度

Fig. 3 (a) O_2 118 GHz spectra taken by the Aura MLS vertically polarized receiver at 82～92 km tangent height on 1 January 2005. (b) The background geomagnetic field strengths at the altitude of 88 km obtained from the IGRF-12 model following the same observational track

ter-Wave Limb Emission SounderJEM/SIMILES) 的后续型号, 有效载荷为工作频率在 0.7 THz 和 2 THz 附近的微波辐射计, 目的是探测地球中高层大气 (20～160 km), 包括测量 30 km 以上的水平风、20 km 以上的大气温度、90 km 以上的地面原子以及约 15 种化学物质的大气丰度等[38].

在 SMILES-2 任务诸多潜在应用价值方面, 2020 年 Baron 等[38] 进行了详细的分析与讨论, 包括利用其氧分子塞曼效应特征进行地磁场反演、近电离层高度磁场扰动测量等, 其中分析得到的地磁场反演精度在高纬度地区最高可达到 30 nT.

在该卫星任务的探测目的设计中, 已将利用大气氧气分子塞曼效应遥感地磁场的方法与可能性进行了讨论, 但这一任务目标仍然作为地球中高层大气探测整体任务中的附属功能存在, 这主要受限于该方法在反演精度、探测敏感性等方面尚缺乏进一步的提高和详细评估.

2.2.3 NASA-EZIE 任务

2021 年 NASA 提出了一个电激流塞曼成像探测仪 (Electrojet Zeeman Imaging Explorer, EZIE) 小卫星星座任务[39,40], 是目前唯一针对磁场微波遥感目标设计的卫星任务. 该任务设计由 3 颗 6U 立方星组成, 每颗卫星都携带有微波电激流磁图仪 (Microwave Electrojet Magnetogram, MEM), 基于对 118 GHz 附近分子氧塞曼效应的四束 Stokes 极化测量, 针对极光和赤道电激流引起的磁效应, 在公认的难以现场原位测量的高度范围内对电激流引起的磁场扰动进行遥感, 提供具有时空分辨率的遥感测量数据, 以获取 80 km 海拔高度左右的地磁场分布. 图 4 给出了 MEM 的四束极化测量、立方星基本配置和 EZIE 多卫星系统的观测示例[40].

EZIE 任务中卫星搭载的主要探测仪器 MEM 系统的后端处理部分的光谱仪采用的是 4 个相同的外差式极化频谱仪, 每个部分都可以进行全 Stokes 参量的极化信息获取, 带宽为 10～20 MHz, 分辨率 50 kHz, 相对于地磁场环境下 118 GHz 附近氧分子的最大塞曼分裂 (1 MHz 左右), 提供了足够的分辨能力. 图 5 给出了 MEM 的概念性 118 GHz 接收机系统[40].

Laundal 等[39] 讨论了 EZIE 任务对电激流引起的磁场扰动的探测能力, 在模拟观测亮温过程中, 假设磁场为国际地磁参考场和磁流体力学模拟的扰动总和, 引入氧分子塞曼效应进行了辐射传输建模, 在考虑真实仪器响应的情况下得到相应模拟微波辐射, 计算并反演了与观察到的塞曼频率偏移和极化效应相

对应的 80 km 海拔高度磁场扰动和电离层电流. 反演结果表明, 该任务方案可以获取电激流引起的中尺度的磁场扰动特征, 其磁场反演的精度主要取决于不同极化微波辐射计对频率和磁场相对强度的探测能力.

该任务的提出是地磁场微波遥感领域迈入未来应用的重要开端, 较为系统地探讨了基于微波辐射计系统进行局部磁场扰动探测的任务目标和预期效果, 为该领域的应用研究提供了重要参考意义. 但由于目前这一卫星系统尚未开始运行, 仍处于理论分析和设备研制阶段, 缺乏实际探测数据对其数据反演效果、实际应用价值等进行评价.

总体而言, 基于塞曼效应的磁场微波遥感测量在地球空间科学应用方面还是较新的方法, 近年来国外已开展的一些研究尚属于探索与尝试阶段. 并且, 由于目前已有的在轨卫星大气探测数据, 其针对氧气分子的探测频段、探测高度、通道设置等较为局限, 无法很好地适配基于塞曼效应的地磁场参数反演目标. 因此, 针对磁场参数反演的研究工作开展较少, 相关应用研究内容多集中于基于星载平台探测的理论可行性分析与探测能力论证等. 此外, 目前国内外在研的相关大气遥感卫星任务中, 以地磁场参数获取为科学目标的虽仍属少数, 但随着研究的深入, 已有相关应用开始将地磁场信息转为主要探测目标和研究内容.

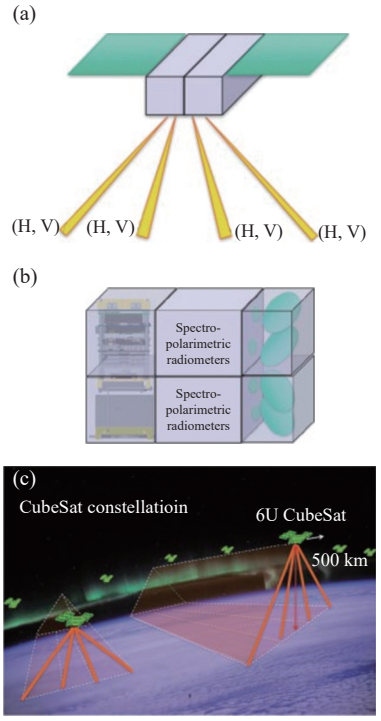

图 4 (a) MEM 的四束极化测量, (b) 6U 立方星的基本配置, (c) EZIE 多卫星系统观测

Fig. 4 (a) Four-beam polarization measurements from the MEM receiver, (b) configuration of 6U CubeSat, (c) EZIE multi-satellite system observation

3 微波遥感地磁场探测能力

基于目前微波遥感地磁场方法的主要研究进展, 本节总结分析了该方法在技术理论和应用方面的现有探测能力.

3.1 应用需求

表 2 针对 2.2 节中列举的几种应用研究, 对其辐射计探测频段及估计反演精度等主要应用需求进行了总结和比较.

由于太阳风等与地磁场的相互作用, 在磁层和电离层中形成的电流体系往往会影响地球磁场的变化. 例如太阳爆发引起的地磁场剧烈变化即磁暴, 通常变化的幅度可达几 nT 至几百 nT, 而集中在高纬地区尤其是极光带附近的地磁亚暴, 与极光电激流有关, 其造成的扰动往往更为强烈, 扰动幅度可达几百甚至上千 nT. 因此, 基于微波遥感探测的估计精度, 除了对中高层大气高度附近的全球主磁场变化 (25000～65000 nT 左右) 的探测, 对于地球局部磁场变化的测量也可能成为未来微波遥感地磁场领域的重要研究方向.

综合分析上述已开展和正在开展的相关应用研究可以发现, 目前在微波遥感地磁场探测的应用领域, 其应用需求主要是基于总体方案设计和预期探测精度等因素, 开展全球中高层大气高度磁场反演和局部磁场变化分析等方面的研究.

3.2 探测频率选择

从地球大气的环境特征来看, 氧气分子作为地球大气中普遍存在、含量较为丰富且稳定的主要成分, 在地磁场与大气中氧分子的磁偶极子相互作用下, 会导致氧分子在毫米波频段的吸收谱线产生不同程度的分裂且具有极化特性. 并且, 随着对探测数据与原理等研究的不断深入, 在中高层大气区域, 由于大气较为稀薄, 对氧气分子频谱的压力展宽作用大大减弱, 使得受地磁场影响产生频谱分裂的塞曼效应能够更为明显地表现出来. 因此, 这一原理在中高层大气磁场遥感探测方面有着更为明显的应用可能性.

针对不同的氧气分子吸收频段, 其受磁场影响产

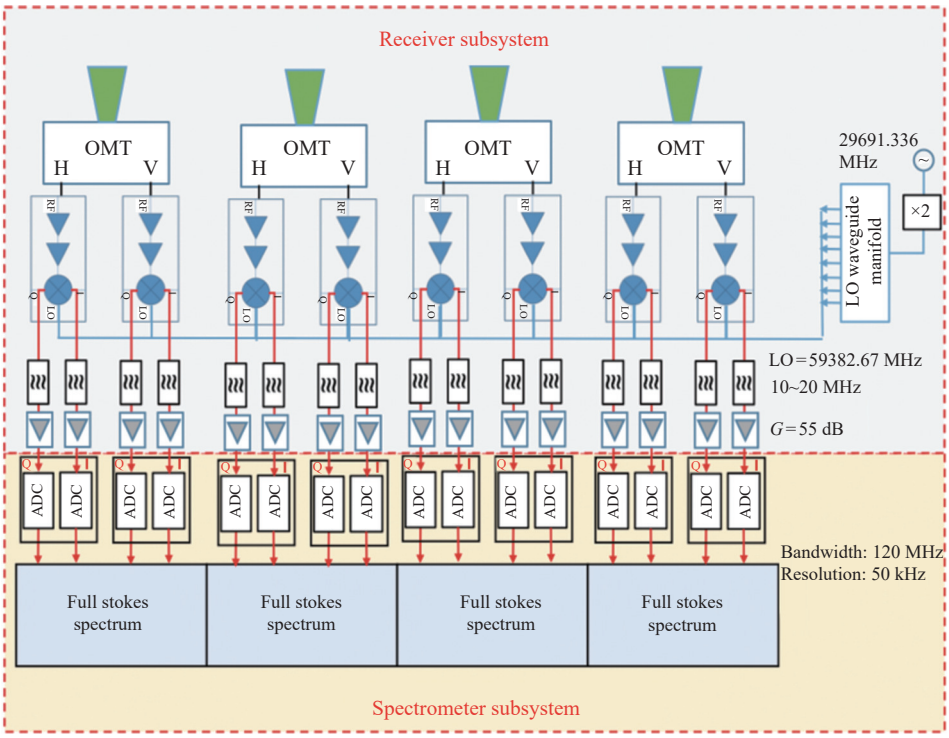

图 5 MEM 接收机系统设计

Fig. 5 System design of the MEM receiver

表 2 中高层氧分子探测相关卫星任务及探测仪比较

Table 2 Comparison of satellite missions and detector for middle and upper level oxygen molecule detection

卫星任务	国家	(计划)发射时间	探测仪器	氧分子探测频段/GHz	观测几何	反演精度估计/nT	磁场相关应用方向
Aura	美	2004	Microwave Limb Sounder, MLS	118	临边	—	极区电激流影响的磁场扰动
SIMILES-2	日	—	SIMILES-2	771～777	临边	30	地磁场反演、近电离层高度磁场扰动测量
EZIE	美	2025	Microwave Electrojet Magnetogram, MEM	118	天底	45	中高层大气高度的磁场扰动

生的塞曼谱线分裂特征各有不同, 参考以上机理和应用研究中所使用的探测频段, 表 3 列出了氧分子在几个典型跃迁频率的谱线参数, 相关谱线跃迁数据来源于 HITRAN 2020 谱线参数数据库.

从表 3 可以看出, 谱线总条数受总角动量量子数 J 影响, J 越大在磁场影响下产生塞曼分裂的谱线条数越多; 而谱线分裂产生三个组份的强度分布特征, 则与不同谱线跃迁的量子数有关. 塞曼分裂系数为引入不同分子跃迁谱线特征下的有效朗德因子, 经过计算得到的最大谱线分裂宽度 Δf_z 与磁场强度 B 的线性关系系数, 该系数越大, 则同一磁场强度影响下的谱线塞曼分裂的最大宽度越大. 通过该系数, 可以计算发现在地磁场强度范围 (25～65 μT) 内, 氧气分子谱线塞曼分裂的最大宽度在 MHz 量级, 可作为微波辐射计仪器系统设计的参考因素. 图 6 给出了地磁场强度为 60 μT 时, 上述部分氧分子跃迁频率下的谱线塞曼分裂的不同特征, 图 7 则对比了不同磁场强度下, 跃迁频率为 61.15 GHz 的氧气谱线分裂情况.

地磁场微波遥感探测相关的机理及应用研究中, 多数参考了常规大气遥感方案中利用大气氧分子进行大气温度探测时所选频段 (61.15 和 118.75 GHz), 结合对典型氧分子谱线的谱线跃迁频率、谱线强度、谱线塞曼分裂条数、塞曼分裂系数等可以发现, 由于谱线分裂的最大宽度较小 (MHz 量级) 且谱线分裂复

表 3　氧分子典型跃迁频率的谱线参数

Table 3　Spectral line parameters of typical transition frequencies of oxygen molecules

跃迁量子数	跃迁频率/GHz	谱线强度/ ($J^{-1}\cdot cm^{-2}\cdot s^{-1}\cdot sr^{-1}$)	塞曼分裂系数/ ($Hz\cdot nT^{-1}$)	地磁场范围内的最大分裂宽度/MHz	谱线塞曼分裂总条数
J, N = 9, 9←10, 9	61.15	1.35×10^{-25}	25.22	0.63～1.64	57
J, N =1, 1←0, 1	118.75	1.00×10^{-25}	14.01	0.35～0.91	3
J, N =2, 3←2, 1	424.76	2.43×10^{-25}	46.70	1.17～3.04	12
J, N =3, 3←2, 1	487.25	1.04×10^{-25}	25.69	0.64～1.67	15
J, N =4, 5←4, 3	773.84	3.96×10^{-25}	50.44	1.26～3.28	24

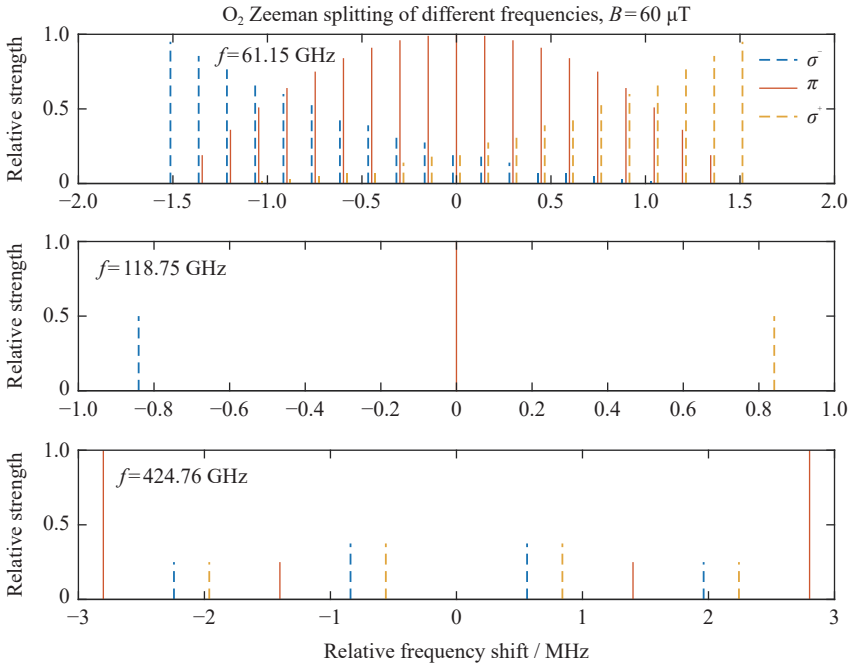

图 6　典型跃迁频率氧气分子谱线分裂的相对强度关系

Fig. 6　Typical transition frequency relative intensity relationship of oxygen molecular line splitting

杂程度各有不同, 结合磁场探测需求, 更倾向于选择谱线分裂和极化特征随磁场变化敏感性强、谱线分裂程度相对简单的探测频点. 与此同时, 在微波辐射计设计中, 还需要综合考虑该探测频段的仪器设计难度、谱分辨率、系统噪声、灵敏度等因素, 折中选择合适的、探测效率更高的频段作为地磁场遥感探测适用频段.

3.3　技术优势

地磁场微波遥感探测方法的优势主要表现在以下几方面.

(1) 不受探测器位置限制、数据时空分辨率高. 利用微波遥感手段进行地磁场探测, 首先采用了遥感这一远程探测方法, 克服了常规磁场测量中受探测器所在位置限制的局限性. 并且, 相较于光学磁场遥感方法通常只可基于激光与大气中某一特定气体分子的相互作用原理进行, 基于微波大气遥感技术的地磁场遥感探测利用地球大气中广泛存在的氧气分子作为探测媒介, 具有更强的适用性及未来应用价值. 同时, 搭载于卫星平台的探测任务, 有着非常高的便利性和探测效率, 可进行快速的全球大范围连续观测, 实现全球磁场的快速成像探测. 目前虽无在轨运行地磁场微波遥感探测卫星, 但根据已有资料分析, 基于星载微波辐射计进行大气遥感探测实现地磁场探测的技术手段, 通常可实现几十 km 的空间分辨率要求, 在理论上可进行 80～100 km 附近海拔高度的地磁场强度廓线反演, 因此, 地磁场微波遥感探测方法有望提供更高时空分辨率的磁场探测数据.

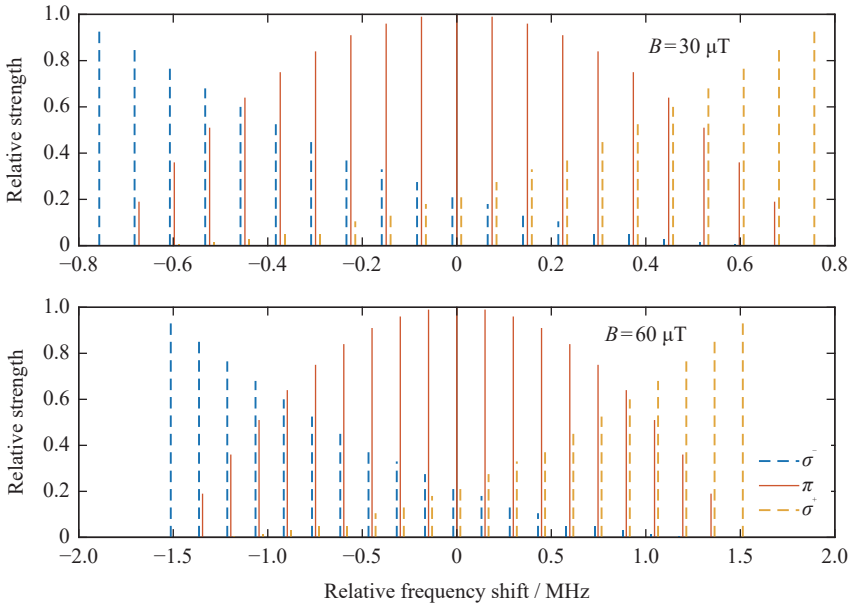

图 7 61.15 GHz 不同磁场强度下的谱线分裂

Fig. 7 Line splitting at 61.15 GHz with different magnetic field intensities

(2) 硬件设计技术较为成熟、满足多维度探测需求. 微波辐射计通过被动接收大气的自然辐射信号, 体积、功耗都很小, 系统复杂程度相对较小, 目前国内外在利用星载微波辐射计探测大气信息领域已有半个多世纪的研究历史, 已在大气、海洋等遥感领域中得到广泛使用, 技术较为成熟, 为后续进一步探索针对大气氧气分子吸收频段的多极化、全极化星载辐射计设计, 实现基于氧分子塞曼效应的地磁场微波遥感探测积累了丰富的技术基础. 并且, 在进行地磁场探测时可兼顾大气温湿度等其他测量研究, 有助于推动相关应用研究的发展. 此外, 研究全球尺度的磁场变化、局部磁异常、不同圈层磁场等主要通过各种维度和方法的实测数据并建立全球模型而展开, 例如全球岩石圈磁场模型的研究中, 目前主要依赖卫星数据进行. 在全球磁场模型方面的研究中, 多维度、高质量、覆盖范围广的磁测数据更是构建更高精度磁场模型的必要条件. 因此, 地磁场微波遥感探测可为地磁场相关研究领域提供更为丰富的数据支持, 以满足更多的应用研究需求.

(3) 可弥补中高层大气高度磁场数据的不足, 从空间上向空白地区延伸. 通过微波遥感手段进行磁场探测, 可以更为可靠地实现地磁数据垂直延拓, 更好地与不同磁场探测数据进行互补与综合, 对全球磁场模型研究有着重要的推动作用, 有利于进一步开展如极区电激流、全球磁场扰动、磁场空间结构等更为深入的全球磁现象研究.

3.4 技术难点

常规磁场探测方法在探测精度 (优于 0.1 nT) 上具有显著优势, 而地磁场微波遥感方法的探测精度则是在寻求高探测效率、更具独特优势的探测空间范围等方面产生的折衷, 相较而言有所不足. 因此, 相应技术难点主要集中在如何提高磁场探测精度方面, 一般来说, 一是来自于辐射计系统设计, 二是来自于反演算法, 具体表现如下.

(1) 微波辐射计系统设计要求高. 通过对 EZIE 任务等的设计进行分析, 可以发现通过微波遥感手段探测全球地磁场, 进而获取电离层电流等方面的最大困难, 在于由地磁场影响产生的微小频谱分裂的可检测性, 更进一步的要求包括在此基础上分辨由电激流等电磁现象引起的更小扰动 (约几百 nT)[39]. 同时, 由于塞曼分裂为吸收谱线带来了极化效应, 不同极化条件也相应地蕴含了丰富的磁场信息, 为更好地利用探测数据, 多极化、全极化探测是未来进行地磁场微波遥感必要的技术手段. 这些需求对于微波辐射计的系统设计提出了更高的要求, 需要进一步提高系统性能, 综合考虑并提升带宽、谱分辨率及系统灵敏度等方面的技术指标, 以实现磁场遥感信息的获取, 同时也是未来系统设计中需要重点突破的关键技术难点.

(2) 强辐射背景下地磁场弱信号的高精度反演难度高. 地磁场微波遥感方法中用于评估的磁场探测能力关键因素在于反演精度和垂直分辨率. 通过分析发现, 磁场强度和各磁场分量的不确定性主要来源为微波辐射计系统噪声引起的修正 Stokes 矢量测量. 以 EIZI 任务为例, 研究人员基于初步传播误差分析, 估计了在积分时间为 5 s 的情况下, 获得标量磁场强度的精度约为 45 nT, 垂直极化辐射的最大变化发生在约 80 km 海拔高度区域, 垂直分辨率约为 15 km[40]. 并且, 由于地磁场为具有方向的矢量, 在反演地磁场分量时, 如何通过引入额外的约束信息, 进一步提高反演精度和准确性, 是需要着重解决的实际困难.

4 结论与展望

目前, 作为新兴的研究探索领域, 磁场微波遥感探测的相关研究正在逐步发展, 但尚属探索期. 本文通过分析目前地磁场原位和光学遥感探测方法的特点和主要局限, 对比了微波遥感手段在该领域的独特优势, 介绍了基于微波辐射计系统的地磁场微波遥感方法在机理、模型研究以及应用研究方面的进展, 并基于探测需求梳理了其技术优势、难点等.

地磁场微波遥感探测研究领域近年来已有开始进行或设计中的中高层大气探测相关的卫星任务. 在探测设计和科学目标的提出中, 开始考虑大气氧分子塞曼效应的影响, 并讨论利用中高层大气氧分子探测数据进行地磁场遥感等的应用, 已逐渐显露出该领域的未来发展趋势与实际应用目的的高度相关性. 未来需要充分发挥这一方法的显著优势, 深入开展相关理论和技术研究. 针对其应用需求和技术难点, 目前有一些可进行探索的内容与方向.

(1) 基于塞曼效应的微波大气辐射传输正、反演算法优化设计. 基于大气氧气分子塞曼效应的地磁场微波遥感方法, 实质上是力求从正演、反演与仪器实现等方面, 尽可能精确地提取氧分子极化辐射频谱中所包含的中高层大气磁场强度和方向信息的过程. 并且, 目前已知的全球地磁场强度基本在 25～65 μT范围内, 在相应 MHz 量级的氧分子谱线塞曼分裂的观测中, 磁场引起的亮温变化大约在几 K 到几十 K 之间, 相比几百 K 的辐射背景以及测量噪声来说是一个弱信号. 因此, 在未来的研究中, 如何从理论出发, 结合磁场参数等先验信息, 修正大气氧气分子的辐射吸收效应, 建立更为精确、高效的基于塞曼效应的矢量辐射传输模型, 作为后续仿真研究的重要工具, 以及充分利用可知信息, 结合不同极化特征的信号和先验要素进行磁场反演, 探索有效提高反演精度的方法, 从而提升整体反演的准确性、可靠性, 进一步提升探测数据的实际应用价值, 是后续研究中需要关注和考虑的重点基础性问题.

(2) 基于辐射计系统的综合性分析、设计与实验的补充. 目前国外已进行的针对地磁场的被动微波遥感探测目前还处于验证与研制阶段, 主要针对单一吸收谱线 (例如 118.75 GHz 氧气吸收谱线) 进行仿真与载荷设计, 缺少对整体过程和不同条件下应用价值的系统性分析研究、实验验证与详细的论证工作, 且暂时还未有正在运行的在轨卫星, 中国目前尚未开展相关工作, 在该领域仍有较大的发展空间以及对未来更多应用方向的探索空间, 如何结合实际应用需求, 系统分析并设计满足探测能力需求的载荷系统, 开展相关实验验证工作, 是需要关注的重要方向性问题.

(3) 高灵敏度、高谱分辨率的全极化辐射计要求. 目前, 国内外针对地磁场微波遥感探测需求的所设计的仪器和相关研究还较为匮乏. 并且, 基于氧气分子塞曼效应原理的地磁场微波遥感探测过程中, 针对产生的谱线分裂间隔相对较小, 磁场相关参数引起的辐射亮温变化相对较弱, 极化信息丰富等特点, 如何从技术上实现更为精确的探测, 进一步提高仪器灵敏度, 并实现多极化、全极化探测, 是未来该领域辐射计系统设计发展的必然要求.

(4) 行星磁场遥感探测新方法展望. 在行星磁场遥感探测领域, 类似于通过遥感大气中氧气的塞曼效应对地球磁场进行探测, 在过去十几年的研究中, 国外已有研究提出在火星卫星任务中使用亚毫米波传感器进行行星磁场遥感探测, 其中包括星载辐射计与依托于火星着陆器的地基辐射计的设计与研究等[41–45]. 这些通过微波大气遥感手段远程探测目标行星磁场的方法, 虽然基本停留在方案提出与模拟验证阶段, 目前仍未有成熟的实际任务开展, 但为未来深空探测领域的研究提供了新的思路, 是未来非常值得深入探索的新方向.

参考文献

[1] XU Wenyao. Physics of Electromagnetic Phenomena of the

Earth[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009 (徐文耀. 地球电磁现象物理学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009)

[2] HULOT G, SABAKA T J, OLSEN N, *et al*. The present and future geomagnetic field[J]. *Treatise on Geophysics (Second Edition)*, 2015, **5**: 33-78

[3] JIANG Yi. Research of Regional Lithospheric Field Modelling in Continent China Combining Global Satellite Models and Aeromagnetic Data[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2020 (姜乙. 联合全球卫星模型和航磁数据的中国大陆地区岩石圈磁场建模研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020)

[4] FENG Yan, SUN Han, JIANG Yong, *et al*. Variation of the main magnetic field in Chinese mainland during 20th century[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2013, **35**(6): 865-875 (冯彦, 孙涵, 蒋勇, 等. 20 世纪中国地区主磁场变化研究 [J]. 地震学报, 2013, **35**(6): 865-875)

[5] GUO Xin. Research on the Detection of Magnetic Field Based on Magnetoresistive[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015 (郭鑫. 基于磁阻效应的地磁场探测研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015)

[6] ZHANG Xiaoxu. Research on A Geomagnetic Measurement System Based on the Resonance Fluorescence of Sodium Atoms[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020 (张晓旭. 基于钠原子共振荧光的地磁测量系统研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2020)

[7] MENG Qingkui, SHU Qing, XU Guangjing, *et al*. Development status and prospect of international geomagnetic network[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2019, **40**(5): 79-84 (孟庆奎, 舒晴, 徐光晶, 等. 国际地磁台网发展现状与展望 [J]. 地震地磁观测与研究, 2019, **40**(5): 79-84)

[8] CHENG Defu, CHEN Jun, ZHOU Zhijian. Progress of detecting magnetic field technology in a constellation of satellites[J]. *Progress in Geophysics*, 2017, **32**(6): 2304-2309 (程德福, 陈军, 周志坚. 多星协同式卫星磁测技术发展综述 [J]. 地球物理学进展, 2017, **32**(6): 2304-2309)

[9] Christensen F E, Lüuhr H, Hulot G. Swarm: A constellation to study the Earth's magnetic field[J]. *Earth, Planets and Space*, 2006, **58**(4): 351-358. DOI: https://doi.org/10.1186/BF03351933

[10] SHEN Xuhui, ZEREN Zhima, YUAN Shigeng, *et al*. Progress on China's first Seismo-electromagnetic satellite[J]. *City and Disaster Reduction*, 2021(4): 27-32 (申旭辉, 泽仁志玛, 袁仕耿, 等. 中国"张衡一号"电磁监测卫星计划进展 [J]. 城市与减灾, 2021(4): 27-32)

[11] ZEREN Zhima, LIU Dapeng, SUN Xiaoying, *et al*. Current status and scientific progress of the Zhangheng-1 satellite mission[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2023, **54**(4): 455-465 (泽仁志玛, 刘大鹏, 孙晓英, 等. 张衡一号电磁卫星在轨情况及主要的科学成果 [J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 2023, **54**(4): 455-465)

[12] KANE T J, HILLMAN P D, DENMAN C A, *et al*. Laser remote magnetometry using mesospheric sodium[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(8): 6171-6188

[13] BUDKER D, ROMALIS M. Optical magnetometry[J]. *Nature Physics*, 2007, **3**(4): 227-234

[14] HIGBIE J M, ROCHESTER S M, PATTON B, *et al*. Magnetometry with mesospheric sodium[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, **108**(9): 3522-3525

[15] HAPPER W, MACDONALD G J, MAX C E, *et al*. Atmospheric-turbulence compensation by resonant optical backscattering from the sodium layer in the upper atmosphere[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1994, **11**(1): 263-276

[16] BUSTOS F P, CALIA D B, BUDKER D, *et al*. Remote sensing of geomagnetic fields and atomic collisions in the mesosphere[J]. *Nature Communications*, 2018, **9**(1): 3981

[17] KAWAHARA T D, KITAHARA T, KOBAYASHI F, *et al*. Wintertime mesopause temperatures observed by lidar measurements over Syowa station (69°S, 39°E), Antarctica[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**(15): 1709

[18] FANG Xin. Sodium Temperature and Wind Lidar Development and Gravity Wave Momentum Flux Observation[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012 (方欣. 钠测温测风激光雷达的研制及重力波动量通量的探测 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012)

[19] HU X, YAN Z A, GUO S Y, *et al*. Sodium fluorescence Doppler lidar to measure atmospheric temperature in the mesopause region[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(4/5): 417-423

[20] SHE C Y, SHERMAN J, YUAN T, *et al*. The first 80-hour continuous lidar campaign for simultaneous observation of mesopause region temperature and wind[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(6): 1319

[21] CHENG Yongqiang. Research and Observation of Relocatable Sodium Wind/Temperature Lidar[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2016 (程永强. 可重部署钠层测风测温激光雷达观测与研究 [D]. 北京: 中国科学院国家空间科学中心, 2016)

[22] DOGARIU A, MILES R B. Detecting localized trace species in air using radar resonance-enhanced multi-photon ionization[J]. *Applied optics*, 2011, **50**(4): 68-73

[23] DOGARIU A, CHNG T L, MILES R B. Towards remote magnetic anomaly detection using radar REMPI[C]//2014 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO): Science and Innovations 2014. San Jose: Optical Society of America, 2014: SM4E. 4. DOI: 10.1364/cleo_si.2014.sm4e.4

[24] DOGARIU A, STEIN C, GLASER A, *et al*. Long range trace detection by radar REMPI[C]//Proceedings of SPIE 8024, Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies VIII. Orlando: SPIE, 2011: 80240G. DOI: 10.1117/12.883982

[25] GALEA C A, SHNEIDER M N, DOGARIU A, *et al*. Radar REMPI measurements in the presence of a magnetic field[C]//AIAA Scitech 2019 Forum. San Diego: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019. DOI:

10.2514/6.2019-0195

[26] CHONG Yang, CHANG Yifeng, CHAI Hongzhou, *et al*. Analysis on the inversion influence of crustal geomagnetic field at different satellite orbital altitudes[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, **64**(3): 796-804 (种洋, 常宜峰, 柴洪洲, 等. 不同卫星轨道高度对地壳磁场反演的影响研究[J]. 地球物理学报, 2021, **64**(3): 796-804)

[27] CHANG Yifeng. Research on Satellite Geomagnetic Data Process and Geomagnetic Model Recovery Theory and Method[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2015 (常宜峰. 卫星磁测数据处理与地磁场模型反演理论与方法研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2015)

[28] XU Bing. Development of foreigh geomagnetic exploration satellites[J]. *Space International*, 2015(9): 16-21 (徐冰. 国外磁力探测卫星的发展 [J]. 国际太空, 2015(9): 16-21)

[29] PURUCKER M. Advances in remote sensing of magnetic fields[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2014, **95**(38): 343

[30] ZEEMAN P. XXXII. On the influence of magnetism on the nature of the light emitted by a substance[J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1897, **43**(262): 226-239

[31] HARTMANN G K, DEGENHARDT W, RICHARDS M L, *et al*. Zeeman splitting of the 61 Gigahertz oxygen (O_2) line in the mesosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, **23**(17): 2329-2332

[32] HAN Y, WENG F, LIU Q, *et al*. A fast radiative transfer model for SSMIS upper atmosphere sounding channels[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112**: D11121

[33] ERIKSSON P, BUEHLER S A, DAVIS C P, *et al*. ARTS, the atmospheric radiative transfer simulator, version 2[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, **112**(10): 1551-1558

[34] LARSSON R, BUEHLER S A, ERIKSSON P, *et al*. A treatment of the Zeeman effect using Stokes formalism and its implementation in the Atmospheric Radiative Transfer Simulator (ARTS)[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, **133**: 445-453

[35] NAVAS-GUZMÁN F, KÄMPFER N, MURK A, *et al*. Zeeman effect in atmospheric O_2 measured by ground-based microwave radiometry[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, **8**(4): 1863-1874

[36] YEE J H, GJERLOEV J, WU D, *et al*. First application of the Zeeman technique to remotely measure auroral electrojet intensity from space[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(20): 10134-10139

[37] OCHIAI S, BARON P, NISHIBORI T, *et al*. SMILES-2 mission for temperature, wind, and composition in the whole atmosphere[J]. *SOLA*, 2017, **13A**(Special_Edition): 13-18. DOI: 10.2151/sola.13A-003

[38] BARON P, OCHIAI S, DUPUY E, *et al*. Potential for the measurement of mesosphere and lower thermosphere (MLT) wind, temperature, density and geomagnetic field with Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder 2 (SMILES-2)[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, **13**(1): 219-237

[39] LAUNDAL K M, YEE J H, MERKIN V G, *et al*. Electrojet estimates from mesospheric magnetic field measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(5): e2020JA028644

[40] YEE J H, GJERLOEV J, WU D. Remote sensing of magnetic fields induced by electrojets from space: measurement techniques and sensor design[M]//WANG W B, ZHANG Y L, PAXTON L J. Upper Atmosphere Dynamics and Energetics. Hoboken: American Geophysical Union, 2021: 451-468. DOI: 10.1002/9781119815631.ch21

[41] KASAI Y, SAGAWA H, KURODA T, *et al*. Overview of the Martian atmospheric submillimetre sounder FIRE[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, **63-64**: 62-82

[42] LARSSON R, RAMSTAD R, MENDROK J, *et al*. A method for remote sensing of weak planetary magnetic fields: simulated application to Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, **40**(19): 5014-5018

[43] LARSSON R, MILZ M, ERIKSSON P, *et al*. Martian magnetism with orbiting sub-millimeter sensor: simulated retrieval system[J]. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2017, **6**(1): 27-37

[44] LARSSON R, KASAI Y, KURODA T, *et al*. Mars submillimeter sensor on microsatellite: sensor feasibility study[J]. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2018, **7**(4): 331-341

[45] YAMADA T, BARON P, NEARY L, *et al*. Observation capability of a ground-based terahertz radiometer for vertical profiles of oxygen and water abundances in Martian atmosphere[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, **60**: 4106311

作者简介

王可昕 女, 1996 年 3 月出生于河北省石家庄市, 现为中国科学院国家空间科学中心博士研究生, 主要研究方向为微波遥感信息处理、定标及应用研究等.
E-mail: wangkexin18@mails.ucas.ac.cn

王振占（通信作者） 男, 1969 年生, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为微波遥感定标、定量反演与应用技术.
E-mail: wangzhenzhan@mirslab.cn