

静止轨道微波大气探测的技术现状与发展展望

卢乃锰 谷松岩

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 分析了静止轨道微波大气探测的重要性, 介绍了发展静止轨道微波大气探测的国内外技术现状和所面临的技术挑战。在论述新型干涉式综合孔径技术体制优势的基础上, 提出将传统真实孔径与新型干涉式综合孔径技术体制相结合, 发展我国静止轨道微波大气探测的设想。

关键词: 静止轨道微波探测, 真实孔径, 干涉式综合孔径

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.019

The Status and Prospects of Atmospheric Microwave Sounding by Geostationary Meteorological Satellite

Lu Naimeng, Gu Songyan

(National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: The importance of atmospheric microwave sounding onboard the geostationary meteorological satellite is analyzed, and the technical challenge being faced with the development of the microwave instrument is introduced. After discussing the advantage of a new type of microwave interference synthesis aperture radiometer, a hybrid system, combing the traditional real aperture and the synthesis aperture together, is proposed. This hybrid system could be valuable to the development of Fengyun geostationary microwave satellite.

Keywords: geostationary microwave sounding, real aperture, interference synthesis aperture

0 引言

对台风、暴雨、强对流等灾害性天气过程的高时效、高精度监测对提高天气预报准确率具有重要意义。尽管极轨气象卫星具有通道信息丰富、空间分辨率高的特点, 然而, 较长的回归周期限制了极轨气象卫星资料在灾害性天气监测中的应用。当前的极轨双星观测体系只能保障6h的观测周期, 暴雨强对流天气的典型生命史也是6h, 因此, 极轨气象卫星观测资料的应用存在时效问题。即使未来通过多星组网的方式使卫星的观测频率增加到每3h一次, 也无法完全满足天气预报对多变的湿度场、热力场、中小尺度暴雨和强对流等灾害性天气的观测需要。对这些灾害性天气现象发生、发展和消亡的高时间分辨率监测需要依靠静止气象卫星。

与可见光和红外探测不同, 微波一方面可以很好地穿透云雨大气, 另一方面云雨大气也会通过吸收、发射和散射作用对微波辐射的传输产生影响。云雨大气对微波的吸收、发射和散射作用与大气的热力结构

和微物理特性有关。因此, 可以通过微波探测反演出云雨大气的热力结构和微物理特性。在静止平台上搭载微波大气遥感仪器将在提高观测频次的同时, 提高气象卫星对云雨大气的探测能力。

目前国际上静止轨道微波大气探测仍是一项技术空白, 而极地轨道卫星上的微波大气探测始于20世纪70年代。美国1972年发射的雨云卫星装载了电扫描微波辐射计, 利用50~60GHz的氧气吸收带探测大气温度结构。1978年美国发射了业务环境卫星泰罗斯系列, 装载了专门用于大气探测的微波探测器MSU, 与红外大气探测器HIRS结合, 实现了大气垂直温度廓线的遥感探测, 形成TOVS体系。为满足军事气象需要, 美国从1987年开始实施DMSP计划, 陆续发射的卫星装载了用于大气温度廓线探测的特种微波温度探测仪SSM/T和用于大气湿度廓线探测的SSM/T-2, DMSP计划提高了空间微波对地遥感探测能力。在当代DMSP计划中, SSMIS取代了SSM/I、SSM/T和SSM/T-2, 实现了垂直探测和成像遥感的有机结合^[1]。

美国在业务环境卫星NOAA-K系列上, 发展了20通道先进微波探测器AMSU, 取代MSU形成了新一代大气探测系统ATOVS^[2-3]。其中AMSU-A利用50~60GHz的氧气吸收带探测大气温度廓线,

收稿日期: 2013年12月2日; 修回日期: 2014年6月30日
第一作者: 卢乃锰(1963—), Email: lunaimeng@nsmc.cma.gov.cn
资助信息: 国家自然科学基金(41201360)

AMSU-B利用183GHz的水汽吸收线探测大气湿度廓线，后来MHS取代AMSU-B继续利用183GHz的水汽吸收线探测大气湿度廓线。

2002年升空的NASA EOS系列卫星上，载有与AMSU性能相当的先进微波大气探测器，其中包括巴西研制的湿度探测仪HSB和MHS。欧洲极轨气象卫星MetOp上的大气探测系统与美国业务环境卫星上的系统相同。

美国目前国家极轨业务环境卫星系统Suomi NPP上的星载大气探测系统是ATMS^[3]，用两副天线完成了AMSU系统中三副天线的探测任务，继续沿用50~60GHz氧气吸收带进行大气温度廓线探测，同时在183GHz水汽吸收线附近增加了探测通道数，提升了大气湿度场探测能力。

我国星载微波遥感技术起步较晚，第二代极轨气象卫星风云三号装载的微波温度计和微波湿度计是我国星载微波大气探测载荷实现定量应用的里程碑。卫星风云三号卫星微波大气探测系统包括覆盖50~60GHz的大气温度探测仪和150~183GHz的微波湿度探测仪。从目前的使用情况看，风云三号微波大气探测系统很好地揭示了台风、暴雨等天气系统内部大气热力结构，对于提高天气预报、数值天气预报水平具有重要作用。经过A/B两颗试验星的应用，在风云三号首发业务星C星上发展了微波温度计II型(MWTS-II)和微波湿温探测仪(MWHTS)，MWTS-II在50~60GHz大气氧气吸收带附近增加了通道数量，MWHTS在保留并细分183GHz频点探测通道的同时增加了118GHz新的探测频点，提升对流层上部大气温度廓线探测精度，进一步拓展风云三号业务星的大气探测能力^[4-6]。这些成果为发展静止轨道微波大气探测技术奠定了基础。

发展静止轨道大气微波探测技术，实现对地球大气全天候、全天时的观测，对提高未来天气预报的准确率意义重大。因此，尽管静止气象卫星的轨道高度高，扫描成像难度大，目前国际气象卫星大国都在致力于发展静止轨道微波大气探测技术。然而由于静止轨道微波探测本身的技术难度，相关航天计划尚未得以实施。在这种形势下，全球气象卫星协调组织(CGMS)在其第34届会议所形成的文件中明确指出希望中国作为一个气象卫星大国能够率先实现静止轨道微波大气探测。从制定航天计划的角度看，目前中国在发展静止轨道微波探测方面已经与欧美站在同一起跑线上，但无论是在仪器制造技术还是在科学基础支撑方面，我国与发达国家相比都存在一定差距。

1 静止轨道微波大气探测所面临的挑战

虽然空间微波遥感技术得到了极大发展，但由于静止轨道星地距离远，采用真实孔径天线条件下实现高空间分辨率探测的难度很大，到目前为止，国际上所有微波大气探测仪器都搭载在低轨卫星上。NASA曾经考虑在未来静止轨道气象卫星中搭载微波辐射探测仪，欧洲也提出了静止平台微波大气探测的概念。从技术体制上看，静止轨道微波探测可以通过真实孔径和干涉式综合孔径两种技术体制来实现^[7-9]。传统的真实孔径方案以美国的静止轨道微波观测平台(Geostationary Microwave Observatory, GEM)与欧洲的微波大气探测静止观测平台(Geostationary Observatory for Microwave Atmospheric Sounding, GOMAS)为代表，采用2~3m的天线覆盖从毫米波到亚毫米波多个探测波段，真实孔径方案的问题在于所需要的天线口径大，形面加工要求高，扫描驱动难度大。3m天线基本上已经达到了若干年内的技术极限，继续提升分辨率较为困难，在毫米波低端难以满足应用需求，但亚毫米波对大气底层探测能力又很有限。天线技术的发展成为目前真实孔径体制发展的一个技术难点。另一个新的技术体制是干涉式综合孔径技术，以美国的地球静止轨道合成孔径辐射计(Geostationary Synthetic Thinned Aperture Radiometer, GeoSTAR)和欧洲的地球静止轨道大气探测仪(Geostationary Atmospheric Sounder, GAS)为代表。

GeoSTAR地面原理样机的初步测试结果及成像结果达到了预期效果，这强有力地支持了毫米波干涉式综合孔径体制的发展。而GAS采用了更先进的稀疏天线阵列旋转分时采样方案，在降低载荷系统本身复杂度的同时，也大大降低了项目的技术风险与成本。这些都预示着干涉式综合孔径体制在静止轨道微波探测方面的良好发展前景。综合孔径技术体制的主要技术难度在于所需的单元天线/接收机数目多，加工一致性要求高，定标难度大，系统复杂。

2 干涉式综合孔径技术体制优势分析

鉴于探测频率、天线口径、地面分辨率之间固有的物理关系，真实孔径技术体制比较适用于较高频率的大气探测。相比之下，新型干涉式综合孔径成像技术可以将天线接收口面有效稀疏为多个小口径的单元天线，解决真实孔径成像中探测频率越低、空间分辨率越差的问题。这种技术在利用较低频率进行大气温度探测时具有更大优势。尽管干涉式综合孔径探测仪起步较晚，技术体制复杂，但由于其较小的物理孔径便于星载应用，且具有进一步提升分辨率的潜力，近年来发展迅速，代

表了被动微波遥感技术的一个发展方向^[9-11]。

干涉式综合孔径技术采用稀疏的小天线阵列取代大口面实孔径天线，通过各个单元天线之间的两两相关实现对视场内亮温分布的空间频率域测量，在空间频率域构成一个等效虚拟大孔径，再通过对空间频域测量数据作傅氏变换得到观测区域的亮温图像。

在将干涉式综合孔径技术应用于地球静止轨道卫星方面，NASA自2002年开始通过IIP计划（Instrument Incubator Program），支持了JPL实验室的GeoSTAR项目，2005年完成地面原理样机研制。GeoSTAR采用固定式的Y形天线阵列稀疏方案，设计50~56GHz和183GHz两个探测频段，每个探测频段约需300个单元的天线接收机，实现能够满足应用需求在50~56GHz频段实现空间水平分辨率优于50km、垂直分辨率2~4km、扫描周期30min的大气温度廓线探测；在183GHz频段实现空间水平分辨率优于25km、垂直分辨率2~4km、扫描周期5~10min的大气湿度廓线探测。这样的探测结果可以极大地提升对灾害性强降水系统的监测预警能力^[12-13]。

欧空局从2002年也开始通过AO(Announcement of Opportunity)方式对下一代地球同步轨道毫米波辐射计开展可行性研究，2004年选定瑞典SAAB公司的旋转扫描综合孔径方案进入地面样机GAS研制。GAS星载系统将包括53、118、183、380GHz四个频点。水平空间分辨率可望达到30km。由于GAS系统Y型阵列的旋转，将每个探测波段所需要的天线单元数降到100左右，另外进一步采用多时延数字相关方案，减少所需探测通道滤波器组的数目。

总体来讲，目前世界上对下一代地球同步轨道被动微波载荷的技术体制选择仍然处于权衡评估阶段。

以GEM/GOMAS为代表的传统真实孔径方案研究时间较早，从20世纪90年代即开始预研，方案较为成熟，但由于技术体制限制，继续提升空间分辨率较为困难，在亚毫米波段难以有效满足大气温度层结探测的应用需求；以GEOSTAR和GAS为代表的干涉式综合孔径方案起步较晚，技术体制较为复杂，在进一步提升分辨率上更具潜力。其中，GEOSTAR的地面样机的初步测试及成像结果达到预期指标；而GAS采用了更先进的稀疏天线阵列旋转分时采样方案，以增加部分机械旋转机构为代价换取载荷系统本身复杂度的降低，从而降低了项目的技术风险与成本。随着毫米波部件工艺水平的不断提高，干涉式综合孔径体制的地球同步轨道毫米波大气探测辐射计将走向实际应用。

3 我国静止轨道微波大气探测发展现状

我国近年来在发展静止轨道微波探测方面投入较大，国家航天局、科技部、中国气象局对此都有所部署，其中“十一五”国家863重点项目“地球同步轨道毫米波大气温度探测仪”面向干涉式综合孔径毫米波大气温度探测的技术前沿和静止轨道微波探测的重大应用需求开展研究，突破了分时采样方式与稀疏天线阵列的联合优化设计、旋转扫描综合孔径微波辐射计反演成像算法等关键技术，将伪极网格傅里叶变换的概念引入旋转扫描体制干涉成像，在国际上首次实现了综合孔径圆环天线阵列自旋及重点区域成像的工作体制，大大降低了星载系统的复杂度，并针对该体制建立了相应的系统性能指标分析方法、阵列优化设计方法、定标方法以及系统设计流程，图1是静止轨道毫米波大气温度探测仪全尺度样机及成像实验结果^[14-15]。

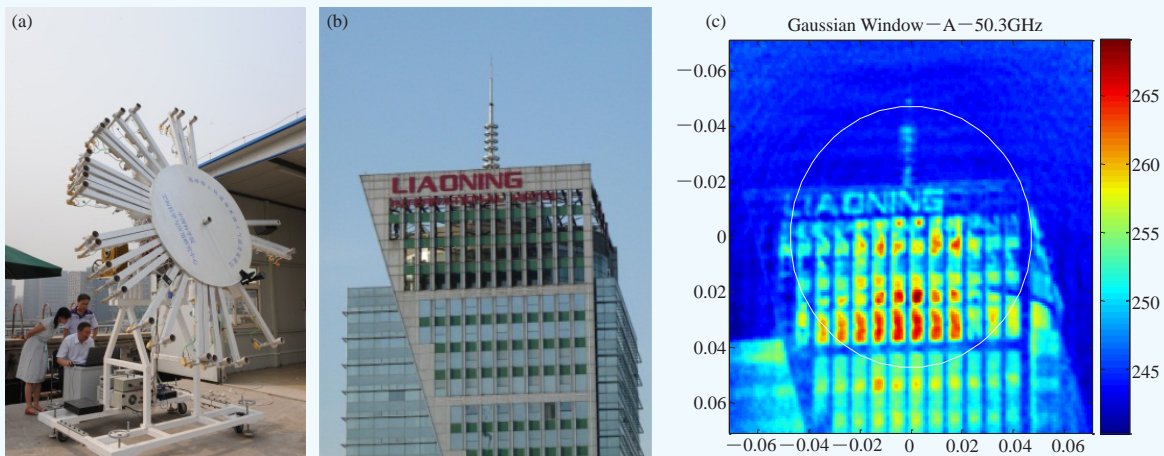


图1 静止轨道毫米波大气温度探测仪全尺度样机及成像实验结果

(a) 全尺度原理样机；(b) 实际景物；(c) 成像试验结果

Fig. 1 Geostationary Interferometric Millimeter wave Atmospheric Sounder (GIMS) full scale prototype and imaging results

(a) full scale prototype; (b) the actual scene; (c) imaging results

“十二五”国家863启动了“静止轨道大口径双模微波大气探测仪”的研制，在大的综合孔径天线中央，设计小的真实孔径天线。利用综合孔径技术克服低频微波探测空间分辨差的难题，实现53GHz大气氧气吸收带探测大气温度廓线；利用真实孔径天线技术增加亚毫米波大气探测。在双模微波大气探测仪的设计中，凝聚了综合孔径和真实孔径两种技术体制的综合优势。预计“十二五”后期将完成样机研制任务。这些工作的开展，对于推进静止轨道微波探测卫星的工程立项具有重要意义。

“十一五”期间中国气象局国家卫星气象中心还在国家863计划支持下完成了静止轨道云雨大气微波遥感科学仿真研究和载荷关键性能指标的仿真研究。为未来利用静止轨道微波遥感探测开展业务应用奠定了基础。

4 未来展望

静止轨道气象卫星对于监测台风、暴雨等快速发展的强灾害性天气系统具有独到的优势。目前的静止轨道气象卫星上没有微波遥感仪器，无法得到云团内部的温度和湿度结构以及降水参数信息，这极大地削弱了对突发灾害性天气的监测能力。因此，我国气象卫星发展规划中明确将下一代风云静止气象卫星分为光学星和微波星两个系列，其中光学星已进入工程型号研制。微波星由于面临巨大的技术挑战，还处在论证阶段。

立足于目前的技术积累，未来的静止轨道微波大气探测卫星应充分考虑传统真实孔径和新型干涉式综合孔径技术优势的结合和互补，在50~60GHz的温度探测最佳频段采用综合孔径技术体制，而在湿度探测的最佳频段183GHz采用真实孔径技术，实现静止轨道

大气温度和湿度的联合探测。按照目前的技术部署，我国将有可能先于欧洲和美国，成为第一个开展静止轨道微波大气探测的国家。

参考文献

- [1] Yan B H, Weng F Z. Intercalibration between special sensor microwave imager/sounder and special sensor microwave imager. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2008, 46: 984-995.
- [2] JPL. AIRS project algorithm theoretical basis document part 3: Microwave Instruments. JPL D-17005, Version 2.1, 2000.
- [3] NOAA KLM User's Guide (Satellite and data description of NOAA's Polar orbiting satellites from NOAA-15 and later), Feb 2009.
- [4] 游然, 谷松岩, 郭扬, 等. 风云三号卫星微波温度计的在轨性能长期稳定性分析. 气象科技进展, 2013, 3(4): 13-17.
- [5] 谷松岩, 郭扬, 王震古, 等. 风云三号A行微波湿度计探测通道定标分析. 气象科技进展, 2013, 3(4): 43-49.
- [6] 杨忠东, 卢乃猛, 施进明, 等. 风云三号卫星有效载荷与地面应用系统概述. 气象科技进展, 2013, 3(4): 6-12.
- [7] Staelin D, Kerekes J, Solman F J. Final report of the geosynchronous microwave sounder working group. MIT Lincoln Laboratory, Lexington MA, Aug. 22, 1997, prepared for NOAA/NESDIS GOES Program Office.
- [8] Solman F J, Staelin D H, Kerekes J P, et al. A microwave instrument for temperature and humidity sounding from geosynchronous orbit. In Proc IGARSS, Seattle, WA, Jul 1998.
- [9] Bizzarri B. et al. Requirements and perspectives for MW/sub-mm sounding from geostationary satellite. EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Dublin, Iceland, 2-6 September 2002.
- [10] Staelin D H, Kerekes J P, Solman. Geosynchronous microwave sounders working group (GMSWG) final report. Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [11] Pinori S, Baordo F, Medaglia C M, et al. On the potential of sub-mm passive MW observations from geostationary satellites to retrieve heavy precipitation over the Mediterranean Area. Advances in Geosciences, 2006, 7: 387-394.
- [12] Thompson A R, Moran J M, Swenson G W Jr. Interferometry and synthesis in radio astronomy. New York: John Wiley and Sons, 1986.
- [13] Lambrigtsen B, Tanner A, Gaier T, et al. Developing a GeoSTAR science mission. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2007.
- [14] 张升伟, 等. 地球同步轨道毫米波大气温度探测仪研究总结报告. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2012.
- [15] 张成. 干涉式成像微波辐射计遥感图像的模拟与成像分析. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2007.

Hera地球观测卫星将在2016年发射

本刊编辑部

位于美国加州的Hera Systems公司计划从2016年10月开始，陆续发射能够提供高分辨率信息的地球观测卫星集群。据悉，首批卫星的数量为9个，之后增加到48个，从而实现覆盖和组网。Hera卫星运营后，每平方千米图像的售价仅为1~2美元（分辨率1m×1m）或3美元（分辨率0.5m×0.5m）。此外，目前卫星资料处理的门槛还比较高，至少需要博士量级的技术人员且要有充足

的耐心，而Hera Systems公司通过推出GeoSnap™

创新App有望改变这一状况，卫星数据可期待进入客户自选风格。

（更多信息，请访问<http://www.herasys.com>）

