

# “中欧静止轨道毫米波大气探测仪样机”为被动微波遥感领域的发展描绘新蓝图

吴季<sup>1,2</sup>, 刘浩<sup>1</sup>, 张成<sup>1</sup>

1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

2. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 静止轨道微波大气探测是被动微波遥感领域和气象研究领域亟待解决的一个技术难题,也是国家发展的一项重大需求。基于综合孔径成像技术的中欧静止轨道毫米波大气探测仪样机的成功研制为实现这一目标扫清了技术障碍。本文介绍了静止轨道微波大气探测技术的研究背景和发展现状、中国在此领域的探索以及该样机的研制历程,阐述了该技术获得突破的重要意义,并对该技术未来在风云四号气象卫星上的应用进行了展望。

**关键词** 静止轨道;微波大气探测仪;综合孔径辐射计;风云4号气象卫星

日前,“中欧静止轨道毫米波大气探测仪样机”研制成功,并在北京顺利通过了测试验收。该样机(图1)由两套综合孔径微波辐射计系统构成:其中一套为大气温度探测仪,工作在50~56 GHz氧气吸收频段,是在科技部“863计划”和中国科学院重点方向性项目的支持下,由中国科学院国家空间科学中心负责研制;另一套为大气湿度探测仪,工作在183 GHz水汽吸收频段,是在欧洲空间局空间科学与技术研究中心(ESTEC)预研项目的支持下,由瑞典Omnisys公司负责研制。两套系统在中国科学院国家空间科学中心完成系统的集成和测试。经过现场测试,两套系统的空间分辨率都达到或超过了指标要求,从静止轨道高度(36000 km)上观测时可达优于50 km的地面分辨率。

## 1 微波辐射计的发展历程

回顾历史,1946年,美国麻省理工大学迪克(Robert Dicke)制造出了世界上第1台真正意义上的微波辐



图1 中欧静止轨道毫米波大气探测仪样机  
Fig.1 CAS-ESA geostationary millimeter wave atmospheric sounder prototype

射计,由此开启了被动微波遥感这个重要研究领域。随着卫星技术的发展,微波辐射计很快进入了星载应

收稿日期:2018-01-30;修回日期:2018-02-14

作者简介:吴季,研究员,研究方向微波遥感技术、空间探测技术及空间科学与技术发展政策,电子信箱:wuji@nsse.ac.cn

引用格式:吴季,刘浩,张成.“中欧静止轨道毫米波大气探测仪样机”为被动微波遥感领域的发展描绘新蓝图[J].科技导报,2018,36(4):96-100;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2018.04.014

用阶段,开始在对地观测领域发挥作用。1978年,美国第1颗搭载圆锥扫描微波辐射计的业务卫星SMMR发射升空,标志着星载微波辐射计真正开始进入业务化应用阶段,此后以微波辐射计为依托的被动微波遥感在大气、海洋、土壤、植被等众多地球科学和环境资源领域发挥着越来越多、越来越不可替代的重要作用。

然而,微波辐射计的空间分辨率严重依赖于天线口径的大小,不能像合成孔径雷达那样通过主动发射相干信号来提高空间分辨率,这是被动遥感器的一个共性。因此大尺寸天线的加工、机械扫描以及折叠运输等技术难题成为制约微波辐射计空间分辨率的主要障碍。20世纪80年代末期,综合孔径干涉测量技术被引入到被动微波遥感领域,这为提高微波辐射计的空间分辨率提供了一条有效途径。综合孔径技术是利用稀疏排列的小口径天线阵来实现等效大口径天线的观测效果,因此避免了大口径天线所面临的一系列难题。2009年,欧洲空间局发射的SMOS卫星首次搭载了L波段综合孔径辐射计<sup>[1]</sup>,其观测数据在土壤湿度和海水盐度探测中发挥了重要作用,充分体现了综合孔径技术在被动微波遥感领域的应用价值。

## 2 静止轨道应用需求及发展现状

随着应用需求的不断增长,微波辐射计面临着越来越高的指标要求。静止轨道大气探测是目前微波辐射计面临的一个亟待攻克的应用领域。与极轨卫星相比,静止轨道卫星在观测视场和时间分辨率方面具有绝对优势,可以实现覆盖1/3地球区域的大视场和分钟级的高观测频次,因此静止轨道卫星是对台风、暴雨和强对流等灾害性天气系统监测预警的最佳手段。然而,受限于观测距离远、分辨率要求高等因素,目前静止轨道气象卫星仅能依靠红外和可见光探测。红外和可见光等光学波段虽然容易实现较高的空间分辨率,但却只能探测到云层顶部信息,而微波具有很强的穿透性,既可以透过云雨大气探测云层底部信息,同时又可以通过与云层的相互作用来获取云雨大气的内部信息、反演大气的温度和湿度三维结构以及降水参数,因此微波成为大气探测必不可少的探测频段。发展静止轨道微波探测技术,实现对地球大气全天候、全天时、大区域、高频次的观测,对提高未来天气预报的准确率具有重大意义。

静止轨道微波探测是目前国际对地观测领域最前

沿、最迫切,也最具挑战性的课题之一。美国早在20世纪70年代就提出了静止轨道微波探测的构想,20世纪90年代进一步提出了具体概念——GEM<sup>[2]</sup>,随后欧洲也提出了类似概念——GOMAS<sup>[3]</sup>。这些概念都是基于传统真实孔径机械扫描的微波辐射计方案。由于真实孔径方案所需天线口径太大、精度要求太高以及难以实现快速二维机械扫描等技术障碍,加之耗资需求巨大,这些概念一直停留在方案设计阶段。进入21世纪后,随着干涉式综合孔径技术的发展和成熟,美国和欧洲又相继提出了采用综合孔径技术的静止轨道微波探测仪方案,例如美国航空航天局(NASA)提出的GeoSTAR概念<sup>[4]</sup>和欧洲空间局(ESA)提出的GAS概念<sup>[5]</sup>。这些概念目前都已经经历了两代地面样机(图2、图3)研制阶段。

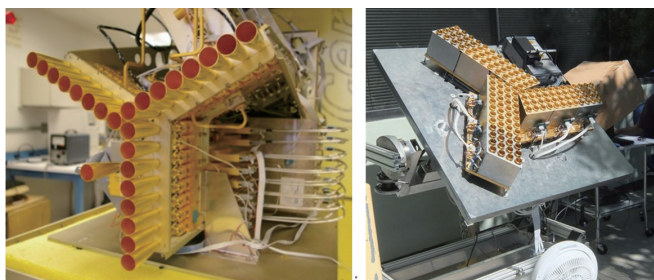


图2 美国GeoSTAR第1代(左)和第2代(右)地面样机  
Fig. 2 The first (left) and second (right) generations of GeoSTAR prototypes



图3 欧洲GAS第1代(左)和第2代(右)地面样机  
Fig. 3 The first (left) and second (right) generations of GAS prototypes

## 3 中国在静止轨道微波探测领域的探索

中国地处东亚季风区,国土辽阔,是气象灾害频发国之一,因此对发展静止轨道微波气象卫星有强烈需求,开展了静止轨道微波探测的规划和论证<sup>[6-7]</sup>,并在中国气象卫星发展规划中明确列出了在风云四号卫星平台上搭载微波成像仪的发展方向,即发展静止轨道微

波星 FY-4M 的规划<sup>[8]</sup>。发展静止轨道微波探测卫星成为目前世界航天大国竞相追逐的战略制高点。

在重大需求的牵引下,中国科学院国家空间科学中心发挥其在微波遥感领域的技术优势,针对静止轨道大气探测需求提出了具有自己特色的 GIMS 概念<sup>[9]</sup>。GIMS 概念采用了一种新型的、具有自主知识产权的圆

环稀疏天线阵列,其在成像效率、系统定标以及风险成本方面均具有明显优势。“十一五”期间,在“863 计划”对地观测领域重点项目的支持下,该中心完成了关键技术攻关,成功研制出第 1 代 GIMS 功能样机(图 4),经过测试各项指标均达到了设计要求,取得了很好的成像效果<sup>[10]</sup>,成为当时本领域的亮点成果之一。

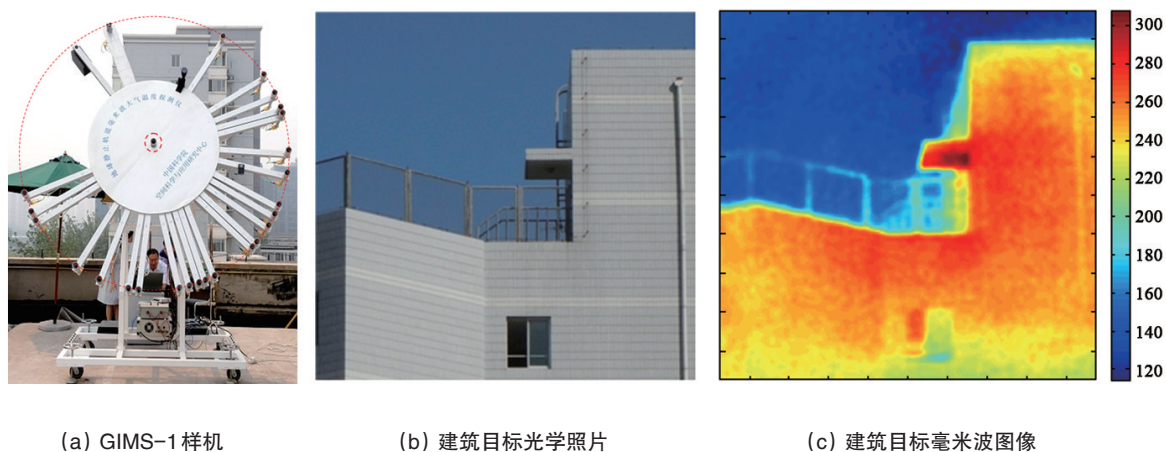


图 4 GIMS 第 1 代功能样机及其对建筑的成像结果  
Fig. 4 GIMS-I prototype and its imaging performance

GIMS 第 1 代样机的成功研制强有力地支持了干涉式综合孔径成像体制在静止轨道大气探测领域的应用,坚定了中国科研人员对 GIMS 概念的信心。“十二五”期间,该中心基于 GIMS 概念进一步提出了双模式成像系统的概念<sup>[11]</sup>,将综合孔径和真实孔径两种体制技术优势相结合,在低频段沿用 GIMS 圆环阵综合孔径方案,在高频段采用传统真实孔径方案(其卫星构图如图 5)。基于 GIMS 的双模式大气探测仪方案继续获得了科技部“863 计划”“十二五”专题项目的支持。

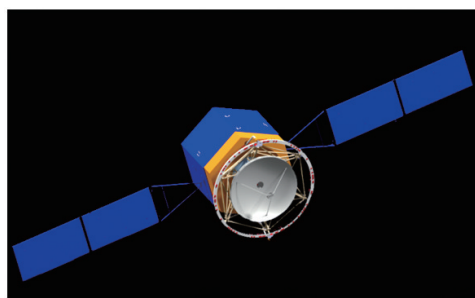


图 5 采用双模式方案的静止轨道大气探测仪卫星构图  
Fig. 5 Artistic view of the dual-mode millimeter wave sounder on GEO satellite

#### 4 中欧合作开展新一代样机研制

GIMS 第 1 代样机的成果受到了国际本领域的高度关注。欧洲空间局对 GIMS 概念产生了浓厚兴趣,积极表达了希望在静止轨道微波遥感领域与中国开展合作的意愿。国家空间科学中心在立足自主研发的前提下,也希望加强与国际一流研究机构的交流与合作,以夯实自身技术基础,实现优势互补,加快推进本领域的技术发展。

在此背景下,中欧双方就合作研发静止轨道毫米波大气探测技术很快达成了一致。根据合作协议,中欧双方遵循信息公开、技术透明的原则,以中国的 GIMS 概念为框架基础,联合开展静止轨道大气探测星载系统方案设计并分别独立开展地面样机研制。双方充分发挥各自的技术优势,中方继续推进 GIMS 技术,按照实际卫星载荷的指标要求研制工作在 50~60 GHz 的 GIMS 全尺度样机;欧方则根据 GIMS 样机的结构特征和工作模式,研制一套与 GIMS 样机完全兼容的、工作在 183 GHz 的功能样机;最终中欧双方共同完成两个样机系统的集成及测试,并全面评估其对星载系统方案的技术支撑作用,为未来潜在的中欧卫星合作计划提供

技术基础。

以中欧合作为契机,“十三五”期间,该中心在科技部 863 计划对地观测专题项目、中国科学院重点方向性项目和国际合作项目的联合支持下,再接再厉,以满足更高应用需求为目标,严格按照卫星系统的设计要求,采用了小型化、轻量化、高集成度的新型设计思路,突破了一系列载荷关键技术,成功研制出第 2 代全尺度、全功能 GIMS 地面样机(图 6)。该样机是世界上第 1 台静止轨道毫米波大气探测仪全尺度样机,也是世界上迄今为止此波段分辨率最高的微波辐射计。经过一系列的严格测试和外场实验,获得了一批高质量、高清晰度的地物目标毫米波辐射图像(图 7)。

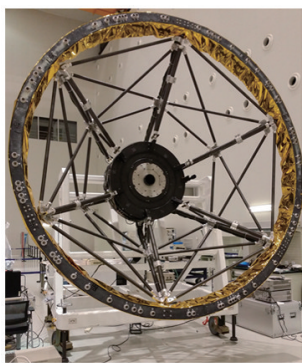


图 6 GIMS 第 2 代全尺度地面模型样机  
Fig. 6 Full-scaled GIMS-II prototype



图 7 GIMS 第 2 代全尺度样机的成像结果  
(左侧:光学照片 右侧:毫米波图像)  
Fig. 7 Imaging results of GIMS-II  
(Left column: optical image, right column: millimeter wave image)

GIMS 第 2 代样机的研制成功意味着中国在综合孔径微波辐射计技术领域已经达到了世界领先水平。这项新技术的诞生既丰富了综合孔径微波辐射计的种数,同时也将微波辐射计的探测能力提高到一个新的高度,这不仅带动了微波辐射计技术的进步,也将促进微波辐射计开辟新的应用领域,从而推动整个被动微波遥感领域的发展。

此次中欧合作开展静止轨道大气探测样机研制是中欧双方在对地观测领域围绕新体制毫米波大气探测技术开展的首次实质性合作,也是中欧双方首次围绕我方重大卫星计划开展的新体制载荷联合技术攻关。这次联合研制的“静止轨道毫米波大气探测仪样机”为未来中国静止轨道气象卫星开展微波成像探测提供了一条新的技术路线,同时也为中国乃至欧洲领跑国际气象卫星发展,实施新一代静止轨道气象卫星奠定了坚实的技术基础。

## 5 展望

目前国际上静止轨道微波大气探测领域还是一片空白,中国虽然起步较晚,但经过不懈努力目前已经走在了世界前列,具有自己特色和优势的 GIMS 概念可以为多条技术路线提供实施空间。以 GIMS 为基础的静止轨道大气探测技术目前已经达到转入卫星工程型号任务的技术状态,一旦立项,则可以在短时间内完成卫星载荷的研制,并有望在“十四五”期间随中国新一代静止轨道微波气象卫星 FY-4M 发射上天,在国际上率先实现对大气温度、湿度和降水分布的实时三维成像观测。届时,中国对台风、强降雨等灾害性天气的监测和预报能力将得到大幅提升,同时中国作为一个气象卫星大国将为世界气象研究以及大气物理研究做出重要贡献。

## 参考文献 (References)

- [1] McMullan K D, Brown M A, Martin-Neira M, et al. SMOS: The payload[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2008, 46(3): 594-605.
- [2] Gasiewski A J, Voronovich A, Weber B L, et al. Geosynchronous microwave (GEM) sounder/imager observation system simulation[C]//Proceedings of IGARSS, Volume 3. New York: IEEE, 2003: 1209-1211.
- [3] Bizzarri B. Requirements and perspectives for MW/Sub-MM sounding from geostationary satellite[C]//Proceedings of the 2002 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference. Darm-

- stadt: EUMETSAT, 2002: 97-105.
- [4] Lambrechtsen B, Tanner A, Gaier T, et al. Prototyping a new earth observing sensor-GeoSTAR[C]//Proceedings of the 2007 IEEE Aerospace Conference. New York: IEEE, 2007: 1-9.
- [5] Christensen J, Carlstrom A, Ekstrom H, et al. GAS: the geostationary atmospheric sounder[C]//Proceedings of IGARSS 2007. New York: IEEE, 2007: 223-226.
- [6] 张如意, 李卿, 董瑶海, 等. 静止轨道气象卫星观测系统发展设想[J]. 上海航天, 2012, 29(5): 7-13.  
Zhang Ruyi, Li Qing, Dong Yaohai, et al. Development plan of geostationary meteorological satellite observation system[J]. Aerospace Shanghai, 2012, 29(5): 7-13.
- [7] 郭阳, 卢乃锰, 谷松岩. 毫米/亚毫米波探测大气温度和湿度的通道选择[J]. 应用气象学报, 2010, 21(6): 716-723.  
Guo Yang, Lu Naimeng, Gu Songyan. Channel selection of millimeter/submillimeter wave for temperature and humidity sounding[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(6): 716-723.
- [8] 卢乃锰, 谷松岩. 静止轨道微波大气探测的技术现状与发展展望[J]. 气象科技进展, 2016, 6(1): 120-123.  
Lu Naimeng, Gu Songyan. The status and prospects of atmospheric microwave sounding by geostationary meteorological Satellite[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2016, 6(1): 120-123.
- [9] Liu H, Wu J, Zhang S W, et al. Conceptual design and breadboarding activities of geostationary interferometric microwave sounder[C]//Proceedings of IGARSS. New York: IEEE, 2009: 1039-1042.
- [10] Zhang C, Liu H, Wu J, et al. Imaging analysis and first results of the geostationary interferometric microwave sounder demonstrator[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(1): 207-218.
- [11] 吴季, 刘浩, 张成, 等. 一种用于毫米波和亚毫米波的双模辐射计系统: 中国, 201110163880.0[P]. 2011-11-23.  
Wu Ji, Liu Hao, Zhang Cheng, et al. A dual mode millimeter/submillimeter wave radiometer system: China, 201110163880.0[P]. 2011-11-23.

## CAS-ESA geostationary millimeter wave atmospheric sounder prototype: Drawing up a new blueprint for passive microwave remote sensing development

WU Ji<sup>1,2</sup>, LIU Hao<sup>1</sup>, ZHANG Cheng<sup>1</sup>

1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

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

**Abstract** A major requirement of microwave atmospheric sounder onboard geostationary satellite arises in the area of passive remote sensing and meteorological research. Developing geostationary microwave sounder is also a national strategy demand of China. The successful development of the CAS-ESA geostationary millimeter wave atmospheric sounder prototype based on synthetic aperture radiometer paves the way to reaching this goal. This paper briefly reviewed the research background and the current status of the relevant technology over the world, introduced the developing roadmap and achievements in china, stated the significance of the successful development of this prototype, and finally highlighted the prospect of near future application in China's Fengyun-4 mission.

**Keywords** Geostationary earth orbit; microwave atmospheric sounder; synthetic aperture radiometer; FengYun-4 meteorological satellite ●



(责任编辑 王丽娜)