

全球 GNSS 掩星计划进展

王也英¹ 符养² 杜晓勇² 薛震刚²

(1 61741 部队,北京 100081;2 北京应用气象研究所,北京 100029)

摘要 主要介绍了国际上 GNSS 掩星计划(包括 GPS/MET、Orsted、Sunsat、SAC-C、CHAMP、GRACE、FedSat、COSMIC、METOP 和 ACE+ 计划)发展现状、科学任务及系统组成、取得的进展以及未来的发展趋势。通过总结指出,自 GPS/MET 计划实施后,掩星探测技术逐步完善并向业务化运用迈出了一大步;今后 GNSS 掩星探测将向多星探测和混合探测方向发展,国际化合作成为项目的开发和研制趋势

关键词 GNSS 掩星 发展趋势

引言

GNSS 是全球卫星导航定位系统的简称(Global Navigation Satellite System)。由于 GPS(Global Positioning System)系统是现在最成功的卫星导航系统,也是目前在掩星探测中主要运用的系统,人们常把 GNSS 掩星探测称为 GPS 掩星探测。GNSS 掩星大气探测系统将是目前世界上最为经济有效的大气探测系统之一,现有全球高空大气探测气象资料能力的总和尚不及两颗小卫星的掩星大气探测能力。GNSS 掩星大气探测系统的出现是气象探测史上的一次革命性变化。国内外专家普遍认为,利用掩星大气探测技术获取的地球气象数据和电离层数据将是 21 世纪最基本的常规气象应用信息之一。因此,GNSS 掩星大气探测系统是 21 世纪世界各国竞相发展的探测地球大气及其电离层的高新技术手段。GNSS 掩星探测经历了概念验证到业务运用的发展过程,下面主要介绍有关 GNSS 掩星计划的现状及其进展。

1 掩星计划的发展过程

1.1 GPS/MET 计划

GPS 掩星探测地球大气技术,最初是由斯坦福大学和喷气推进实验室(JPL: Jet Propulsion Laboratory)的科学家共同提出和发展的^[1]。1993 年由 UCAR (University Corporation for Atmos-

phere Research)、Arizona 大学和 JPL 联合建立了 GPS/MET 试验计划^[2,3],利用无线电掩星技术探测地球的中性大气和电离层。1995 年 4 月 3 日发射了 1 颗低轨(LEO)卫星 Microlab-1,用于接收 GPS 卫星被掩时的信号。试验结果给出了 GPS/MET 观测中射线弯曲角和折射率的垂直剖面,由此可以得到电离层的电子密度和大气的密度、压力、温度与水汽等的剖面。

这个计划很成功地完成了最初的试验目的。其结果表明:这种探测技术具有精度高和稳定性好的特点,观测期间仪器无需标定;利用该技术反演得到的中性大气和电离层的各种数据垂直分辨率高、覆盖范围广,将对现行的大气探测体制、数值天气预报、全球气候变化研究、电离层研究产生重大影响^[4]。

1.2 Orsted 和 Sunsat 计划

GPS/MET 计划的成功促成了 NASA(美国航空航天局)在 1995 年同意资助两个较小的国际计划^[1,5]:①丹麦的 Orsted 计划,其最初的设计是磁场成像^[6];②南非的 Sunsat 计划,它在卫星上搭载一个高分辨率成像仪^[7]。这两个计划中的卫星上都载有类似 GPS/MET 的掩星接收机,于 1999 年 2 月 23 日一起搭载 Delta 火箭发射升空,经过一段时间的飞行器校验,在 1999 年 9 月才接收到有限的数数据。由于受到这些小卫星天线的限制和连续 GPS 信号加密的影响,信号的质量大大低于 Microlab-1

作者简介:王也英,男,1978 年生,硕士,助理工程师,主要从事无线电掩星和气象雷达研究,Email:bjwangyy@yahoo.com.cn

收稿日期:2007 年 8 月 23 日;定稿日期:2007 年 11 月 5 日

的信号。为了分析其分辨率较低的数据,必须采用更先进的算法,以提高数据处理的能力。另外, SunSat 卫星上的仪器可以在飞行中得到升级软件,从而改善它的无码跟踪程序和开循环跟踪算法^[1]。

1.3 SAC-C 计划和 CHAMP 计划

GPS 掩星以后的主要发展方向体现在 SAC-C 和 CHAMP(CHallenging Minisatellite Payload)两个计划: SAC-C 计划是发射载有磁场成像仪和多谱成像仪的阿根廷卫星;CHAMP 计划由德国空间管理局支持,GFZ(Geo Forschungs Zentrum)的科学家于 1994 年提出的小卫星计划,主要用以改善重力场和磁场模型^[8]。这两个较大的卫星首次携带 JPL 新一代掩星接收器在 2000 年下半年升空。

SAC-C 卫星首次携带前后两个沿卫星飞行方向的天线,能够观测到上升时的掩星数据。两颗卫星还携带向下方向的天线,用于观测被海洋表面反射的信号。在其发射后,所有飞行软件还都可以得到升级和重载。该卫星已于 2000 年 11 月 21 日在加利福尼亚由 Delta7320 火箭发射升空,是美国和阿根廷合作的一项国际卫星计划。阿方负责卫星的发展;NASA 负责提供发射和仪器设备,并负责总体项目管理。

SAC-C 卫星可提供地球及其海岸带的多谱成像;还可提供地球大气层及其电离层的结构和动力学的研究资料,其观测数据已经分阶段在网上公布,其中包括地磁场的的数据。SAC-C 卫星可进行空间环境中的辐射量测量,进而可研究其对大气电子成分的影响。此外,SAC-C 卫星还可验证定轨的准确程度^[9]。

CHAMP 卫星于 2000 年 7 月 15 日在俄罗斯发射升入 454 km 高的第 1 轨道,经 1 年多的运行,已经有高质量的数据和分析结果。卫星设计寿命为 5 年,用户可以得到多年高精度数据用于地球科学和大气科学的研究。

由于 CHAMP 计划中的 GPS 接收机是 JPL 的新一代产品,而高增益的天线又提高了信号的质量,从而使先进的信号跟踪技术能得以应用。在 2001 年 2 月 11 日,第 1 次接收到了 CHAMP 卫星的掩星测量数据,其中包含了 7 个高质量的掩星数据,掩星持续时间均在 30 s 以上。反演结果与相应 ECMWF(European Center for Medium Range Weather Forecasts)数据比较显示了二者具有很好

的一致性,大气对流层顶以上的温度偏差小于 1 K(标准偏差在 1.5 K 左右),其中纬度高于 30°N 的地区偏差小于 0.5 K。从短期讲,CHAMP 的数据将有助于改善 GPS 无线电掩星技术和提高对流层的回归算法技术,从长期讲,将有利于增强全球气候变化的研究能力^[10]。

1.4 GRACE 和 FedSat 计划

2002 年 3 月 17 日欧洲中部时间 10:21 两颗 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment,地球引力恢复和气候试验)小卫星由俄罗斯“呼啸”号(Rockot)运载火箭在距离莫斯科北部 800 km 的人造卫星发射场发射升空。这两颗卫星是阿斯特里姆公司为 NASA/JPL 制造的,星上载有 GPS 掩星接收机,美国和德国历时 5 年合作完成^[11]。卫星将用于调查地球极地轨道 500 km 高空的引力场。卫星发射 90 min 后,两颗“格雷斯”卫星顺利与火箭的第 1 级发动机分离;随后德国魏玛地面站接收到卫星发回的信号。这两颗卫星尺寸为 3 m×2 m×1 m,重约 480 kg,卫星间距离 220 km。这两颗卫星将连续准确的测量二者之间的距离,并根据其距离在地球引力场影响下的变化,对地球进行检测,这种检测将每 30 天提供一次地球引力场的更新模型。此外,每颗卫星还将每天提供 200 次左右大气层的温度和水汽密度分布情况。

同年 12 月 14 日澳大利亚的 FedSat 卫星发射成功^[12]。FedSat 卫星耗资 1120 万美元,是澳大利亚 35 年来的第 1 颗国产卫星,卫星上载有通信、空间科学、导航和计算系统。该卫星在其为期 3 年的设计寿命期间,将进行通信、全球定位系统、空间科学、遥感和工程研究实验。

以上这些载有 GPS 掩星接收机的低轨卫星的发射成功,极大地推动了空基 GNSS 气象学的发展。

此外,巴西也制定了 EQUARS 计划^[13],利用 GPS 掩星技术对赤道周围的大气及其电离层进行研究,将于 2009 年发射低轨卫星。

1.5 COSMIC 卫星

我国台湾地区在美国的支持下,制定了 COSMIC(Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate,台湾称福卫 3 号)计划,并于 2006 年 4 月 15 日在加州范登堡空军基地发射了“福卫 3 号”卫星^[14]。早在 1995 年,台湾

地区就制定了“太空科技发展长程计划”,计划周期为15年(1991~2006年),总经费150亿元新台币,研制卫星数量为3颗,即“中华卫星”1号、2号和3号,后来“中华卫星”改名为“福尔摩沙卫星”(Formosat)。“福卫3号”卫星是“福尔摩沙卫星3号”的简称,是该计划的组成部分。

“福卫3号”卫星系统又称作“气象、电离层及气候观测星系”,是台美当局授权执行的双边合作项目,具体由台湾“国家太空计划办公室”与美国大学大气研究联盟(UCAR)联合共同负责实施。该项目始于1997年,计划投资30亿元新台币,其目标是开发先进的全球气候实时监测系统,建立全球大气实时观测网。

“福卫3号”卫星系统由6颗小卫星组成,每颗卫星直径1 m,重62 kg,使用寿命5年,由美国空军的Minotaur运载火箭采用一箭多星方式发射,卫星到达500 km高的暂驻轨道后,将依序与发射载具实现分离,再利用本身的推进系统配合进动作用进行轨道转换,预计13个月后到达700~800 km的预定任务轨道,6颗小卫星分别围绕地球运转,每颗卫星绕地球一圈约需100 min,每天绕行地球14圈组成涵盖全球的低轨道卫星系统,接收美国24颗GPS系统卫星所发出的导航信号,观测范围涵盖全球大气层及其电离层。

“福卫3号”与设在美国和台湾的两个数据处理分析中心、分布在全球的6个数据接收站共同构成星地一体的掩星大气探测系统^[15]。这个全新的掩星大气探测系统具有其它大气探测手段所不具备的独特优势:大大拓展了大气探测范围,水平方向探测可覆盖全球,垂直探测高度可达数百公里;探测数据垂直分辨率高、信息量大、时效性强、更新速度快,6颗小卫星组成的观测系统每天可提供全球分布的约2500个探测点的数据;探测设备不需要定标;可以全天候工作。数据处理分析中心每3 h更新一次中性大气掩星探测资料,每2 h更新一次电离层掩星探测资料。这些资料可为数值天气预报提供初始场数据,提高数值天气预报准确率,可用于气候研究和空间天气研究。

“福卫3号”是台湾“太空科技发展长程计划”的关键一步,在此基础上,台湾地区正在筹划COMSIC II计划,并对两个COSMIC计划的衔接进行设计。COSMIC II仍由6颗卫星组成,计划2009年发

射,与“福卫3号”有一年的任务重叠期。除了小卫星与导航卫星之间的掩星探测外,还考虑增加小卫星之间的红外和Ku波段掩星探测。该计划实施后,可使第一代掩星大气探测技术反演近地面层水汽摆脱需要大气温度背景场的约束。

1.6 METOP 计划

2006年10月19日,欧洲首颗地球极地轨道气象卫星METOP-A在哈萨克斯坦境内的拜科努尔发射场成功升空^[16]。METOP-A卫星由欧洲气象卫星组织、欧洲空间局以及总承包商EADS公司共同研发,共搭载11种设备,其中包括进行中性大气掩星探测的GNSS掩星接收机GRAS,其重约4 t,高6.5 m,是目前同类卫星中最复杂的。星上设备由欧洲气象卫星组织、欧洲空间局、法国航天局(CNES)以及美国国家海洋和大气局(NOAA)提供。它是欧洲空间局和欧洲气象卫星组织联合研制的METOP-3颗同类系列气象卫星的第1颗,也是欧洲发射的第1颗极地轨道气象卫星。

METOP-A卫星沿距地面大约817 km的极地轨道运行,采集并向地面发回高精度的气象和其它相关数据,供专家分析空气湿度、气温、冰雪融化及温室气体排放等情况,帮助科学家分析人类活动对地球环境的影响。

“METOP”卫星系统由3颗卫星组成,将与NOAA的极轨卫星一起提供全球气象数据,并将提供业务服务可延续至2020年。METOP-A的成功发射被认为是美-欧“初步联合极轨系统(IJPS)”计划的里程碑。IJPS是NOAA与欧洲气象卫星组织(EUMETSAT)共同签署的一项协议,协议内容是联合双方的卫星计划以缩小气象卫星覆盖缺口。

我国的第2代极轨气象卫星(FY-3)地面应用系统可兼容接收METOP卫星数据,届时卫星遥感对我国气象事业发展的支撑能力将进一步增强^[17]。

1.7 ACE+ 计划

ACE+(Atmosphere Climate Experiment Plus)计划是由欧洲空间局提出的一个重大空间天气计划。2001年1月,ACE和WATS(WATER Vapour and temperature in the Troposphere and Stratosphere)两个计划合并,改称ACE+计划^[18,19]。2002年5月,在欧洲空间局组织的地球探测计划评审中,ACE+计划通过评审并在25个候选计划中排名第1,随后开始了A阶段的研究工

作。它是以无线电掩星技术监测地球大气为主要目标的低地球卫星计划。它将以高精度给出全球 100~800 km 电离层电子密度和 0~60 km 大气的密度、温度、压力、湿度和位势高度等重要的大气气象场。丹麦的 Orsted 和德国的 CHAMP 卫星完成了它的前期技术准备。

ACE+掩星观测系统由 4 颗小卫星组成。4 颗卫星分布在两个平面上,卫星倾角 90° ,轨道面上的两颗卫星在赤道面上分开 180° ,反向运行,它们的轨道高度是不同的,一个是 650 km,另外一个为 850 km。4 颗卫星计划分两次发射。小卫星重 130 kg,电力 80 W。掩星观测采用欧洲开发的 GRAS 接收机,跟踪 L 波段的 GPS/GALILEO 导航系统信号,接受导航星载波相位,称为 GRAS+掩星。该系统也进行低地球轨道(LEO)卫星之间的掩星观测(Cross-Atmosphere LEO-LEO Sounder),称为 CALL 掩星。4 颗小卫星中的 2 颗,发射 X 和 K 波段的信号,另外 2 颗卫星接收这些信号,发射和接收

信号的小卫星,反向而行,具有不同的飞行高度。CALL 掩星主要是通过测量水汽对 X 和 K 波段信号强度的影响,反演大气水汽和温度。

ACE+掩星观测系统测量 GPS 和 GALILEO 两个导航系统信号,每天可以观测 5000 个掩星事件,而台湾的 COSMIC 系统,只接收 GPS 信号,6 颗小卫星每天只能观测 2500 个掩星事件,前者比后者可以多 1 倍剖面。其低地球轨道的 CALL 掩星观测每天还可以获得对流层温度和水汽剖面 250 个,能够独立反演对流层水汽和温度,这也是 COSMIC 系统目前不能做到的。

最新报道表明,ACE+计划由于受欧洲空间局财政压缩的影响,在 2005 年完成第 1 阶段研究后,现项目暂停,具体发射时间待定。

2 小结

对已经发射和即将发射的掩星计划概括起来如表 1 所示。

表 1 掩星大气探测技术发展状况和计划一览表

任务名称	国家(组织)	发射时间	轨道高度 km	卫星倾角 ($^\circ$)	GNSS 接收机	备注
MicroLab-1	美国	1995-04-03	775	70	TurboRogue/JPL 提供	全球第 1 颗概念验证卫星
Orsted	丹麦	1999-02-23	520~850	96.4	TurboRogue/JPL 提供	概念验证卫星
SUNSAT	南非	1999-02-23	520~850	96.4	TurboRogue/JPL 提供	科学试验卫星
CHAMP	德国	2000-07-15	454	87	BlackJack/JPL 提供	
SAC-C	阿根廷	2000-11-21	702	98.2	BlackJack/JPL 提供	
GRACE	德国、美国	2002-03-17	485	89	BlackJack/JPL 提供	2 颗卫星
Fedsat	澳大利亚	2002-12-14	800	98.7	BlackJack/JPL 提供	科学试验卫星
EQUARS	巴西	预计 2009	700	15~20	BlackJack 改进型/JPL 提供	主要观测赤道周围热带地区
EPS/METOP	欧洲空间局	2006-10-19	817	98.8	GRAS	
ACE+	欧洲空间局	待定	650、850	90	GRAS+	4 颗卫星,业务运行
COSMIC	中国台湾,美国	2006-04-15	800	72	BlackJack 改进型/JPL 提供	6 颗卫星,业务运行

从表中我们可以看出,GNSS 掩星探测技术自 GPS/MET 试验以来,获得蓬勃的发展,并已经逐渐走向应用。新一代的 GNSS 接收机,使得掩星技术向着完善和实用迈进了一大步,COSMIC 计划和 ACE+计划的小卫星数量较多,可以探测足够密度的掩星信号,并能够提供充分的地面服务,将使得掩星技术得到真正的业务应用,标志着掩星技术开始走向成熟。

掩星探测需要大量低轨卫星,以提供足够多的掩星事件,因此将来掩星观测系统会进一步向小型化发展,性能也将进一步提高;从表 1 中我们还可以看出,掩星探测将向多星探测和混合探测转变,而项目的开发和研制也将向国际化合作的方向发展。

参考文献

- [1] Yunck T P, Liu C H, Ware R. A history of GPS sounding [J]. Atmospheric and Oceanic Science, 2000, 11(1): 1-20.

- [2] Ware R, Exner M, Feng D, et al. GPS sounding of the atmosphere: Preliminary results [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77: 19 - 40.
- [3] Kursinski E R, Hajj G A, Bertiger W I, et al. Initial results of radio occultation observations of earth's atmosphere using the Global Positioning System [J]. Science, 1996, 271: 1107 - 1110.
- [4] Rocken C, Anthes R, Exner M, et al. Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere [J]. J. Geophys. Res., 1997, 102: 29849 - 29866.
- [5] Yunck T P. An overview of atmospheric radio occultation [J]. Journal of Global Positioning Systems, 2002, (1): 58 - 60.
- [6] Electronic Systems Laboratory. Launch of SUNSAT [EB/OL]. (2003-05-19) [2007-10-01]. <http://www.jamsat.or.jp/oscar/sunsat/mirror/launch/index.html>.
- [7] Danish Meteorology Institute. The Orsted Satellite Project [EB/OL]. (2004-06-04) [2007-11-1]. <http://web.dmi.dk/projects/orsted/>.
- [8] Schmidt T, Heise S, Wickert J, et al. GPS radio occultation with CHAMP and SAC-C: global monitoring of thermal tropopause parameters [J]. Atmos. Chem. Phys., 2005, (5): 1473 - 1488.
- [9] Wickert J, Reigber C, Beyerle G, et al. Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First results from CHAMP [J]. Geophys. Res. Lett., 2001, 28: 3263 - 3266.
- [10] Yunck T, Hajj G, LaBrecque J, et al. Progress Report on the SAC-C GOLPE and Magnetic Mapping Package [EB/OL]. (2002-08-15) [2007-10-01]. <http://www.conae.gov.ar/sac-c/sacc-progress.html>.
- [11] Rothacher M. Geo Forschungs Zentrum Potsdam, Introduction [EB/OL]. (2001-04-27) [2007-10-01]. http://www.gfz-potsdam.de/pb1/op/grace/index_GRACE.html.
- [12] Andrews Space & Technology. FedSat-Summary [EB/OL]. (2003-04-14) [2007-10-01]. http://www.spaceandtech.com/spacedata/logs/2002/2002-056b_fedsat_sumpub.shtml.
- [13] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE. First Workshop [EB/OL]. (2006-06-01) [2007-10-01]. <http://www.laser.inpe.br/equars/eng/workshop.shtml>.
- [14] UCAR. COSMIC: AT-A-GLANCE [EB/OL]. (2007-03-01) [2007-10-01]. <http://www.cosmic.ucar.edu/about.html>.
- [15] Rocken C, Kuo Y H, Schreiner W, et al. COSMIC system description [J]. Atmospheric and Oceanic Science, 2000, 11(1): 21 - 52.
- [16] European Space Agency. Metop at a glance: Overview [EB/OL]. (2006-11-16) [2007-10-01]. http://www.esa.int/esaLP/SEMNI1FAATME_LPmetop_0.html.
- [17] 中国气象局. 欧洲首颗极轨气象卫星成功发射 [EB/OL]. (2006-10-19) [2007-10-01] http://www.cma.gov.cn/tqyb1/space/gzdt/t20061027_162323.phtml.
- [18] Hoeg P, Kirchengast G. ACE+—Atmosphere and Climate Explorer based on GPS, GALILEO, and LEO-LEO radio occultation (ESA Earth Explorer Opportunity Mission Proposal) [R]. Copenhagen, Denmark; DMI, 2002, (7): 1 - 40.
- [19] Kirchengast G, Hoeg P. The ACE+ Mission: An Atmosphere and climate explorer based on GPS, GALILEO, and LEO-LEO radio occultation Kirchengast [G]// Foelsche U, Steiner A K. Occultations for Probing Atmosphere and Climate. Berlin-Heidelberg: Springer, 2004: 201 - 220.

Advances in Global GNSS Occultation Projects

Wang Yeying¹ Fu Yang² Du Xiaoyong² Xue Zhengang²

(1 PLA Unit 61741, Beijing 100081; 2 Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029)

Abstract: The recent development status, scientific missions, system configuration, progresses and future development trend of international GNSS occultation projects, including GPS/MET, Orsted, Sunsat, SAC-C, CHAMP, GRACE, FedSat, COSMIC, METOP and ACE+ projects, are introduced in detail. It is pointed out that occultation sounding technology has made great progress in operational application since the implementation of GPS/MET project. The development of GNSS occultation sounding will turn to the multi-star integration, and the international cooperation in the development among projects will become a trend in the future.

Key words: GNSS (Global Navigation Satellite System), occultation, development trend