

# COSMIC 计划

郭 鹏<sup>1</sup> 洪振杰<sup>2</sup> 张大海<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(2. 温州师范学院数学系 温州 325000)

## 摘 要

为了获得足够多的地面掩星点资料,用于全球和局部天气预报和大气研究,1997年中国台湾地区和美国联合制定了耗资1亿美元的COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) 计划。COSMIC是气象、电离层和气候星座观测系统,它包括卫星、地面数据接受和卫星控制站、数据分析中心和数字通讯网络,计划于2005年开始实施。介绍了COSMIC计划产出的历史背景、科学任务及其整个系统的组成,并针对COSMIC和其它LEO(低地球轨道)星座计划,提出了我们应做和正在做的研究工作。

关 键 词 无线电掩星技术 —GPS 气象学 —COSMIC

分 类 号 P129

## 1 引言: GPS 无线电掩星技术和 COSMIC 计划的历史背景

COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) 计划的技术基础是 GPS (Global Positioning System) 无线电掩星技术。GPS 的最初目标是为导航和定位服务。20 世纪 70 年代, GPS 系统开始实施; 到 90 年代, 美国国防部大约花费 150 亿美元完成了整个系统。该系统现有 24 颗工作卫星和 4 颗备用卫星, 这些卫星把两个波段的无线电信号 (19cm 和 22cm) 传送给导航、时间、定位等领域中的广大用户。目前, GPS 系统在大地测量学、导航、地球物理、大气科学、海洋学和水文学等领域中的应用也日益普遍。

应用 GPS 技术探测大气的方法有两种<sup>[1]</sup>。其一为: 利用双频 GPS 地基接收机网, 计算天顶延迟改正序列, 通过测站气象记录, 反演测站上空水汽积分序列<sup>[2,3]</sup>。这种方法被称之为地基 GPS 气象学; 另一为: 当 LEO (低地球轨道) 和 GPS 卫星相对地球处于掩星位置 (上升或下降) 时, 装置在 LEO 上的双频 GPS 接收机记录高精度的信号相位和振幅, 通过 GPS

国家 973 项目 (G1998040703) 资助课题 国家自然科学基金项目 (10073017, 19833030) 资助课题

上海科技发展基金项目 (00ZF14074, 01JC14058) 资助课题 CAS-KJCX2-SW-T1 资助课题

2001-09-10 收到 2002-07-26 收到修改稿

和 LEO 卫星精确的轨道测定 (POD), 得到发射机和接收机的位置和速度, 计算出信号在通过地球大气层时的时延和多普勒残差, 逐步反演中性大气层的折射率、压强、温度以及水汽的剖面 (其中温度剖面必须从其它途径获得)<sup>[6]</sup>, 并通过单频反演技术获得电离层电子密度剖面<sup>[7]</sup> (具体公式可参阅 Melbourne 的专著和 Kursinski 的博士论文<sup>[5,30]</sup>)。这种方法被称之为空基 GPS 气象学。

为了开展空基 GPS 气象学的研究, 1993 年 UCAR (the University Corporation for Atmospheric Research)、亚利桑那州大学和 JPL (the Jet Propulsion Laboratory) 联合制定了 GPS/MET 计划<sup>[8,9]</sup>。GPS/MET 计划的第一颗实验卫星 MicroLab1 于 1995 年 4 月 3 日发射成功。两年左右的运行, 使 MicroLab1 在大气探测和研究中占据了重要的地位<sup>[10]</sup>。其温度剖面的精度大约为 1K; 通过独立的温度估计, 还能得到水汽剖面<sup>[12,13]</sup>。GPS/MET 计划的成功促成 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 在 1995 年同意资助两个较小的国际项目: 丹麦的 Ørsted 计划和南非的 Sunsat 计划, 这两项计划中的卫星于 1999 年 2 月一起搭载 Delta 火箭发射升空。

随后, GPS 无线电掩星技术的主要发展方向体现在 SAC-C 和 CHAMP 两个计划上: SAC-C 卫星由 NASA 和阿根廷联合研制, 于 2000 年 6 月发射成功; CHAMP (Challenging Mini-Satellite Payload) 计划由德国空间管理局资助。此外, GFZ (GeoForschungs Zentrum Potsdam) 的科学家于 1994 年提出了小卫星计划, 该小卫星于 2000 年 7 月发射升空, 主要用于改善重力场和磁场模型。

基于 GPS/MET 计划的成功经验和科学结果, 1997 年中国台湾地区的 NSPO 和美国的 UCAR、JPL、NRL (the Naval Research Laboratory)、德克萨斯州大学、亚利桑那州大学、佛罗里达国立大学以及其它合作伙伴共同发展了 COSMIC 计划<sup>[28]</sup>。COSMIC 计划耗资近 1 亿美元 (其中中国台湾地区占 80%, 美国占 20%), 旨在遥感、通讯等技术领域的发展, 希望解决一些重要的地球科学问题, 其根本任务是气象及空间天气的研究和预报、气候监测以及大地测量, 同时也致力于研究军事和国防安全极其敏感的问题。掩星技术的最初、最可靠的反演结果是大气折射场, 它对现代战争, 特别是高技术武器的使用有着重要的价值。从最新网上资料获悉, COSMIC 系统将有 6 颗 LEO 卫星, 于 2005 年春天发射。

与此同时, 欧洲空间局也相应提出了耗资约为 1 亿欧元的 ACE (Atmosphere Climate Experiment) 计划。最近该计划修改为由 4 颗卫星组成的 ACE<sup>+</sup> 计划, 于 2008 年发射。加上日本、澳大利亚、阿根廷等国的 LEO 卫星计划, 到 2008 年可能有 15 颗以上的 LEO 用于掩星观测。

作为 GPS 掩星技术的发展, 目前还有山基和飞机载接收机的掩星观测研究<sup>[13]</sup>、振幅资料在大气反演中的作用<sup>[14]</sup>等研究方向的讨论。Eyre<sup>[27]</sup>在 1994 年提出把掩星资料中的中性层大气测量数据同化到天气预报中; Zou 等人<sup>[15,16]</sup>提出将折射率或弯曲角剖面直接同化到数值天气预报模型中。掩星资料的同化和应用已成为 GPS 气象学中最引人注目的课题之一<sup>[17]</sup>, 也是 COSMIC 计划实施前必须解决的问题之一。

## 2 COSMIC 的科学任务

COSMIC 是一项多学科卫星任务, 致力于对目前地球科学的一些最感兴趣的问题 (包括大气层、电离层、地球引力场等方面) 的研究。

在气象学领域, COSMIC 数据将能够用于研究全球水汽分布以及绘制大气水汽的大气动态分布图, 这在相当程度上可以对天气分析和预报起决定性作用<sup>[18]</sup>。观测数据的高垂直分辨率<sup>[19]</sup>将提供精确的重力位势<sup>[20]</sup>, 探测从对流层上部到平流层的重力波<sup>[21]</sup>, 以空前的精度揭示全球对流层顶的高度和形态<sup>[22]</sup>, 支持最前沿的研究, 并加深对对流顶层与平流层的交换过程的了解。COSMIC 的另一个重要目标是证实它对数值天气预报模型性能的改进, 特别是对极地和海洋区域的数值天气预报的改进。

为了研究气候, COSMIC 将以空前的长期稳定性、高分辨率、高精度和广覆盖范围监测地球的大气层, 为检测气候变化、分离影响气候的自然和人为因素以及测试气候模型收集数据<sup>[23]</sup>; 可得到上对流层的折射率数据, 期望能由此解释最近关于热带对流在气候反馈中的作用的争论<sup>[24]</sup>; 利用赤道太平洋地区大气剖面数据, 增强与厄尔尼诺事件有关的气候变化研究, 这对其它远洋及深海区域亦为重要; 使科学家能监测到全球大气层对局部地区事件 (例如大规模的火山爆发、科威特石油火灾或印度尼西亚森林大火等) 的反应。

在电离层领域, COSMIC 数据将为模型测试和初值假定提供稠密、精确和全球性的电子密度测量数据, 从而加速空间天气物理模型的发展<sup>[25]</sup>。同时 COSMIC 得到的大量高性能电离层观测数据将推进空间天气的研究。当太阳风暴的影响在全球范围内传播时, 科学家将能够观测到全球电离层对太阳风暴影响的反应, 并由此促进空间天气预报技术的发展。

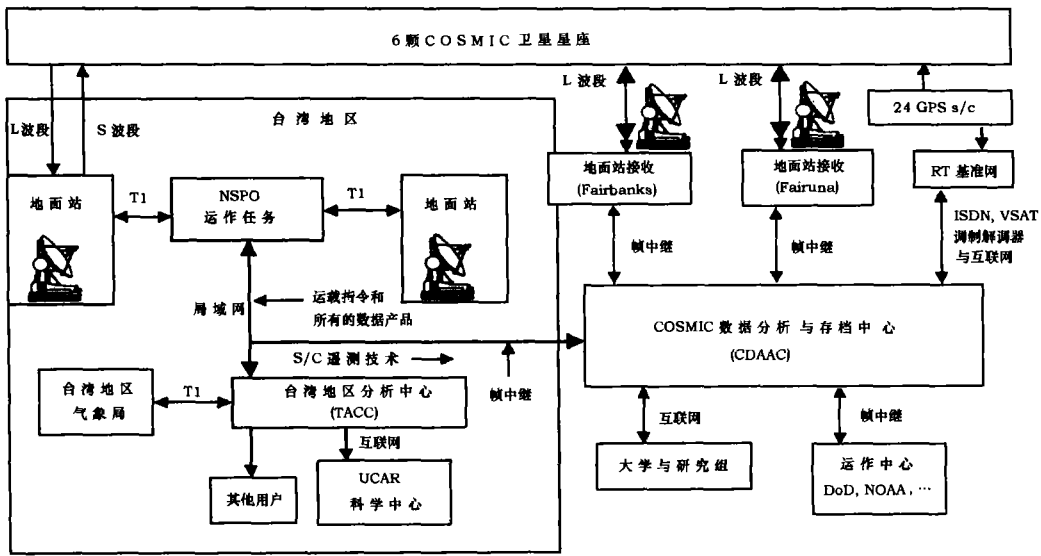
COSMIC 星座的每颗 LEO 卫星将高精度地跟踪每一颗 GPS 卫星, 其运行轨道资料能用于提高人们对地球引力场和大地水准面的认识<sup>[26]</sup>, 推进地球科学、卫星动力学以及它们在科研、民用和军事上的应用研究。由于地核-地幔、建筑、水文、冰层、海洋或大气的效果, 引力场的变化揭示了地球质量分布的变化。对引力场更进一步的认知将提高卫星轨道测定的精度, 并由此改进 GPS 测量精度, 有利于大地测量科学的发展。

### 3 COSMIC 系统

图 1 简要描述了 COSMIC 系统<sup>[28]</sup>。COSMIC 系统的空间部分由 6 颗 LEO 和 GPS 星座组成。从 LEO 观测得到的数据通过 L 波段传送到设置在高纬度区域的 Fairbanks 和 Kiruna 地面观测站, 然后由这两个地面站将收到的数据传送到设在美国 Colorado 州 Boulder 的 CDAAC (the COSMIC Data Analysis and Archive Center)。CDAAC 也从地面 GPS 和 TBB (Tri-band Beacon transmitters) 接收站的一个全球网络 (称为基准网) 接收数据, 它将处理和储存所有接收到的数据并把这些数据传送到科学和工作用户。同时 CDAAC 的所有数据和产品也复制给 TACC (the Taiwan Analysis Center for COSMIC)。TACC 将完成自己的数据分析并把结果和 CDAAC 的结果提供给台湾地区的用户单位。NSPO 的工作任务是负责星座运作, 把处理结果通过两个在台湾地区的地面站用 S 波段向 LEO 卫星上载卫星和运载指令。

#### 3.1 空间部分

计划在 2005 年用一枚火箭将 6 颗 COSMIC 的小型低轨卫星发射升天, 首先进入到高度为 400km、倾角大约 72° 的初始轨道 (第一轨道)。1 年以后, 这些卫星逐渐从初始轨道推进



\* 互联网支持所有的帧中继链接

图 1 COSMIC 系统概述 [28]

到大约 800km 高度的最终轨道 (第二轨道) 上, 使用期限约为 5yr。在初始轨道阶段, 卫星就开始进行大气探测 (虽然数据不是均匀分布), 并完成重要的大地测量与重力实验。每颗卫星是直径为 126cm 的圆柱体, 总重量预计 40kg (包括推进剂)。推进剂重量大约 8kg, 足够用于 450m/s 总变换速度。太阳能电池板设计规格是为卫星提供 55W 平均功率。目前设计一个包括由一个 S 波段频移键控 (FSK) 接收机 (为 3KB 资料率所设计) 组成的 TT&C 系统。遥测发射机是一个 2MB 的 L 波段相移键控 (BPSK)。推荐使用 L 波段 (1690MHz 至 1710MHz), 是因为该波段已经被指定用于下载卫星气象数据。程序系统将是一个实时操作系统。绝大多数的程序系统将开发为状态控制模式 (安全运行、推进操纵、最低点跟踪等), 而小部分用于编译指令、运载操作、数据通讯和压缩文件系统。另外必须发展程序系统的卫星上载和改编程序的能力。

COSMIC 卫星的最终轨道具有 72° 倾角和 800km 高度, 卫星轨道升交点在赤道上平均分布。星座每隔 100min 就能获得全球实时图, 每天大约得到 3000 个大气垂直剖面数据, 这些剖面数据包括从大约 60km 高度到地球表面的气象数据和大约 90~180km 的电离层数据。选择 COSMIC 轨道根数时, 要权衡任务的技术要求以及其它任务设计和费用。COSMIC 计划的主要科学目标是: 尽可能为科学团体提供最有用的、近实时的大气层和电离层数据 (在 2~3h 观测时段内)。台湾地区 COSMIC 科学工作室最初的想法是希望由星座产生的掩星数目和全球更新率达到最大化。掩星数目最大化等于增加运行轨道上的卫星数目。一个低轨卫星在 1 天之内只能从 GPS 星座 (以 24 颗卫星为基准) 中获取大约 500 颗上升和下降的掩星; 掩星全球更新率的最大化需要卫星轨道升交点在赤道面上平均分布, 这样每个轨道均能对地球大气层和电离层的昼夜信号进行充分采样。COSMIC 星座的其它科学技术要求包括: 轨道倾角足够

大,以至能给予充分的极地覆盖范围;轨道高度高于大部分电离层甚至在日光最密区,以提高电离层的掩星观测能力和减小大气阻力。

COSMIC 计划的星座设计和分析,涉及到技术要求和其它许多问题之间的复杂关系的权衡。这些问题包括整个计划的费用、地面站下载的覆盖范围和数据等待时间、轨道发射能力所承受的卫星质量、卫星部署策略、卫星燃料预算、推进和高度控制系统的设计。因为费用是最主要的约束,所以设计中强调星座既能满足科学目标又能用单运载火箭发射。用单运载火箭发射多卫星的最节约方法是:在升交点处分阶段进行发射。由于地球扁率能对不同高度或倾角的轨道产生不同的进动,因而需要一个深思熟虑的星座部署策略和改变轨道高度或倾角的加添燃料方案。经过研究, COSMIC 星座的初步设计已经完成,具体参数列于表 1。

COSMIC 卫星星载的主要仪器是一台由 JPL 开发的 GPS 接收机。这台 GPS 接收机是 JPL 早期开发的仪器(即 GPS/MET 期间使用于 MicroLab 1 卫星上)的继承设计,它能同时观测两颗或更多的掩星、跟踪所有的 GPS 卫星。它全自动运作,可根据自己和 GPS 卫星的已知位置,自动确定什么时候、以什么采样率、跟踪哪颗卫星。该仪器将以亚毫米精度、高频采样(50Hz 或 100Hz)的双频载波相位变化序列,提供精确的高分辨率剖面。卫星的低频(0.1Hz 采样率)相位测量将被用于精度为 5~10cm 量级的轨道计算。接收机必须同时接收 GPS 的双频载波,以便消除电离层延误相关的频率,分离出非色散中性层大气折射延迟。除了精确的相位测量, GPS 接收机也能为轨道附近电离层闪烁监测和信号衍射效应的后处理校正提供 GPS 信号振幅记录。

表 1 COSMIC 卫星星座参数<sup>[28]</sup>

星座参数	要求
设计使用期限 /yr	5
卫星数目	8(6)
平面数目	8(6)
卫星重量 /kg	40
停泊轨道半长轴 /km	400
运行轨道半长轴 /km	800
轨道偏心率	0
轨道倾角 /( $^{\circ}$ )	72
升交点在赤道上相距 /( $^{\circ}$ )	22.5 (30)
平近点角卫星相距 /( $^{\circ}$ )	45.0 (60)
较差岁差漂移时间 /d	$\approx 300$
Delta-V 燃料装载(包括预备)/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\approx 455$

注:括号中的数字为目前采用值。

COSMIC 计划中将进入轨道的两台附加仪器为:微型电离层光度计(TIP)和三波段信标发射机(TBB)。TIP 是一个最低观测达到 135.6nm 的光度计,它能测量自然发生的远紫外辉光。沿着卫星轨道,通过 TIP 测量数据,能够计算出沿卫星轨迹 F2 层顶部的高空间分辨率的夜间电子密度。TBB 发射 3 种频率(150Hz、400Hz 和 1067Hz),它们能被地面或其它卫星上的接收机跟踪。沿着发射机到接收机的路径,不同频率之间测量的相位差能计算出总电子

含量。通过地面上的一系列信标接收机,一台 COSMIC 发射机将为高分辨率二维电子密度的全息成像测量提供数据。TBB 的振幅波动用于闪烁监测。对 1067MHz TBB 载波频率进行调制,以传输在轨道上测得的 GPS 闪烁参数的低频数据流和重要的卫星安全资料。

TIP 和 TBB 将补充主要的 GPS 掩星观测,提供更多的电离层电子密度完整的三维场。表 2 概述了在 COSMIC 任务期间 CDAAC 所接受的观测要求。这些要求是受到表 1 所列的技术参数制约的。

表 2 COSMIC 观测要求<sup>[28]</sup>

测量参数	要求
掩星次数	≈4000/d (现改为 3000/d)
分布	全球
L1 / L2 相位测量精度 /mm	≈2 (10s, 没有电离层影响 POD)
GPS 相位采样率 /Hz	0.1~50 (在对流层下层可能需要 100Hz 的采样率, 这仍处于研究之中)
GPS 中性大气的垂直覆盖范围 /km	地球表面 ≈60 (50Hz 采样)
GPS 电离层的垂直覆盖范围 /km	90~800 (10Hz 采样)
TBB 相位测量 /mm	<32 (在 150MHz, 地面接收机)
TBB 采样率 /Hz	>50 (地面接收机)
TIP 测量	< 10% (光子数不确定)
TIP 地面点 /km×km	125×25 (F2 层 400km 高度)
TIP 分辨率 /s	平均 0.1~10
地磁仪	10nT 精度, 500nT 正确度 (这项参数可能不包括, 但仍未做出决定)

### 3.2 地面部分

COSMIC 系统需要庞大的地面设施来支撑, 其主要的通讯链接见图 2。

为了及时把近实时的资料传输到 UCAR 所属的 CDAAC, 每颗 COSMIC 卫星以每隔 100min 的轨道周期将其数据转输给两个高纬度地面测站中的一个。CDAAC 需要从大约 25 个地面接收站收集近实时 (10min 内) 的观测数据。这些数据包括: GPS 观测数据、基准站接收的 COSMIC 卫星信标传输和通过信标调制传输到地基信标接收机的遥测数据。GPS 数据用于计算精密的 COSMIC 卫星轨道, 并消除由于 GPS 发射机和接收机时钟振动器的不稳定性产生的误差。信标接收站数据用于测站上空电离层全息成像和闪烁监测。

CDAAC 分析所有数据并监测运载运作。观测数据和更高层的分析结果将提供给全世界的研究人员和分析中心 (不同层次分析结果的定义在表 4 中列出), 同时所有数据和分析结果将复制给台湾地区的 TACC。NSPO 将负责任务运作, 以及控制包括两个台湾地区地面测站给全部卫星的上载, 并负责把数据和分析结果分配给台湾地区业务和科学团体。

COSMIC 遥控地面站将设在阿拉斯加州 Fairbanks 和瑞典 Kiruna 目前的电视站点上。地面站的当初设计是针对 L 波段卫星数据下载的, 这可能在以后会有改变。地面站跟踪方案是: 首先跟踪 GPS 卫星, 然后以最好的信号接收状态自动跟踪 LEO 卫星。抛物面盘形天线的直径大约是 3.4m。根据可行性要求和测站上恶劣天气分析, 这些天线可能安装一个罩。所有卫

星上和地面上的接口都按商业标准化设计, 射频联接的设计将使远程通讯费用达到最少。

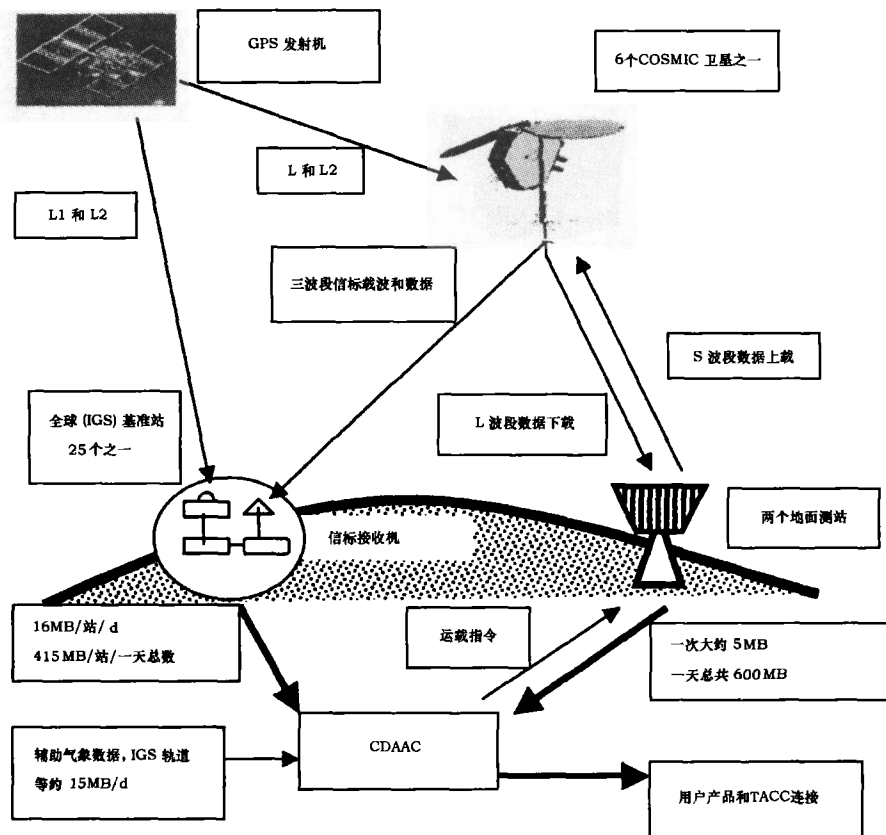


图 2 COSMIC 的主要组成部分、通讯链接数据类型和容量 [28]

根据 6 颗卫星平均收集到的 GPS 数据 (1 秒双频相位、伪距和振幅资料的假设), 计算出基准站的数据容量。假定每一个基准站提供 RINEX 压缩文件和大约 4MB 的 TBB 数据, 且 LEO 每天进行 4000 次 50Hz 的探测, 一次电离层和大气层探测就有 100KB 的数据容量, 总计每天 400MB。因为掩星数据格式和采样率的不确定性, 所以还需要另外增加 50% 的附加容量。

表 3 地面网站同 LEO 卫星的相关通讯技术指标

COSMIC 地面测站的卫星下载特性		COSMIC 地面测站的卫星上载特性	
天线增益 / dB :	33	天线增益 / dB :	34.5
接收频率 / MHz:	1680~1720	传输频率 / MHz :	2025~2120
偏振:	右旋	放大器功率 / W :	20
系统噪声温度 / °C :	175	偏振:	右旋
解调器:	载波 BPSK 或 QPSK	解调器:	载波频移控键
支持数据传输率 / MB :	2	支持数据传输率 / KB :	32
数据包结构:	兼容 CCSDS	数据包结构:	CCSDS 与 B-C-H 编码兼容
数据解码:	Reed Solomon 解码	数据解码:	Manchester

图 3 给出 COSMIC 地面观测网站的工作概况。表 3 列出地面网站同 LEO 卫星的相关通

讯技术指标。

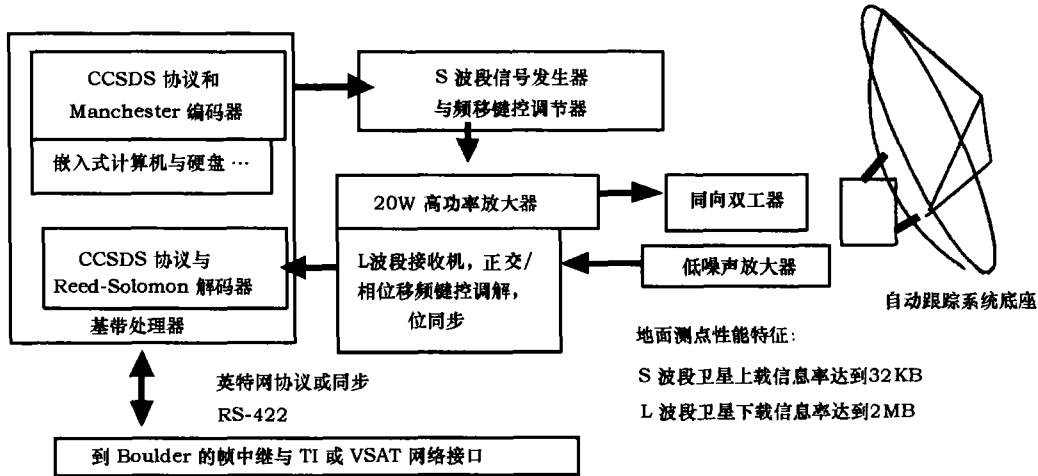


图 3 COSMIC 的地面测站图解 [26]

### 3.3 COSMIC 的数据分析和存储中心 ——CDAAC

CDAAC 负责分析 COSMIC 数据。CDAAC 有两种计算结果：一种为天气和空间天气的监测和预报应用提供近实时解，另一种为天气和大气层研究应用提供更精确、更有效的后处理结果。CDAAC 的一个重要目的是在 3h 以内发送高质量的全球数据产品给业务和科学团体，发挥这套数据设备对天气预报和空间天气监测的价值。提高 CDAAC 的近实时数据产品的可靠性需要加强设施建设，目前一些美国机构正在探求改进的途径。

数据产品通过互联网传输给研究人员、教育工作者和工作用户，再被同化成所需的数据模型，并且存储为进一步研究和教育所用。总储存数据容量包括原始数据和高级产品，预计每天大约 3GB。COSMIC 科学实验和 CDAAC 产品中的数据对任何国家、任何感兴趣的团体都是免费或以成本价复制和提供的。

#### 3.3.1 CDAAC 的功能

按原计划，CDAAC 在 1999 年开始工作。它的主要功能为：

- 运载监督和控制；
- 输入数据的性能校对；
- 科学数据反演；
- 数据产品确认；
- 数据分配和储存。

图 4 例举了 CDAAC 的主要功能。CDAAC 一方面从 COSMIC 的极地地面站接收 LEO 卫星数据，其数据流主要由科学数据组成，同时也包含卫星和运载的安全和状况数据；另一方面也从 GPS 全球基准网和 TBB 接收站接收数据。



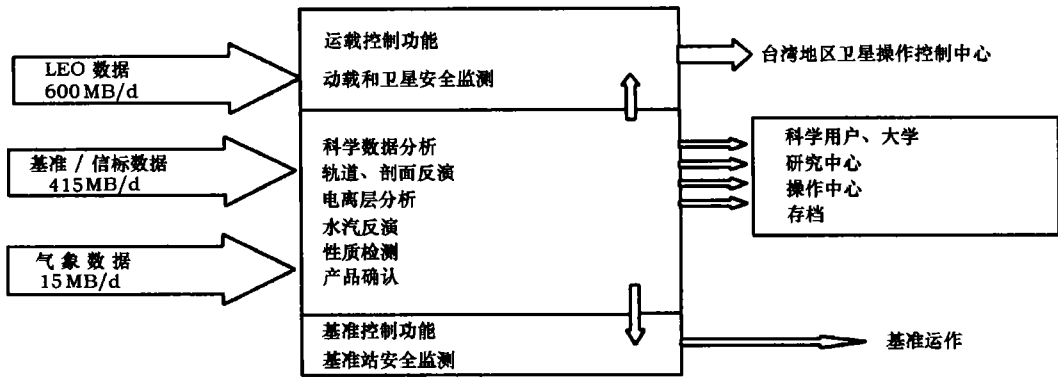


图 4 CDAAC 功能图解 [28]

表 4 CDAAC 的数据类型和数据容量 (估计) [28]

数据类型	数据容量						总容量
	L0	L1	L2	L2a	L3	L4	
GPS/MET 大气掩星数据	200	385	640		50		1275
GPS/MET 电离层掩星数据	200	107	1	1	285		594
GPS/MET 轨道数据	18	8	0.8				26.8
基准数据和地基 GPS		300	34	266			600
信标数据	115		97				212
TIP 数据	3						3
闪烁数据	3	6					9
卫星数据	17.5	0.8					18.3
ANCMET 网格数据	10						10
气候数据产品					50	0	50
总容量	566.5	806.8	772.8	267	385	0	2798.1

注： L0： 原始二进制数据

L1： 格式化和分类的数据

L2： 偏置的 TECs 附加相位和轨道数据

L2a： 校正的 TECs 数据

L3： 压力、水汽、温度、折射率和电子密度剖面数据

L4： 综合的、网格化的产品，例如气候平均或全息成像产品。基准数据是 L1，因为它们都是 RINEX 格式。

为了执行运载控制监测功能，CDAAC 必须从地面测点的数据流中获得相关的安全资料，这些资料将提供卫星仪器功能可能失调的早期信息。有关卫星和运载性能方面的资料可根据 CDAAC 科学数据分析获得。运载控制功能包括：仪器的日程安排、卫星上载新固件的决定等等。NSPO 的 SOCC (the Satellite Operations Control Center) 接收来自 CDAAC 运载监测部门的状况报告，并按指令采取相应的措施。卫星安全数据直接发送到 SOCC，由它负责采取

适当的行动。

CDAAC 将从 JPL、UCAR/UNAVCO 和其它主要负责全球网数据收集的单位中收集基准数据,然后重新格式化,并进行一些基本的性能校对,根据科学产品的性能提供附加的性能资料。如果遇到问题,则通知基准网操作中心采取具体行动。CDAAC 不直接与基准站接口。

目前,绝大多数的计算任务和研制计划均已投入到 CDAAC, CDAAC 实现了气象资料的科学数据分析和归档功能。LEO 数据、基准网数据和补充的气象数据相结合、转化,可获得 COSMIC 数据产品。

CDAAC 以平均 3h 的周期进行数据收集并生成产品。CDAAC 收集高精度的后处理卫星轨道数据后,大约在 1~2 星期以内提供给 IGS,为气候研究提供高精度产品。目前,IGS 也正在考虑计算 LEO 轨道(包括 COSMIC 轨道),因为这些轨道数据可以用于 CDAAC 气候数据的后处理。

CDAAC 数据存储需要一个设在 UCAR 的自动磁带数据资料室,这样方便对气候资料、天气和空间天气研究数据进行处理,并为全世界不需要实时数据的研究人员服务。原始数据的预计容量大约每天 1GB,加上产品和半成品数据,预计该数据资料室每天大约储存数据 3GB。

表 4 综合了 CDAAC 所收集、处理和储存的数据产品。

### 3.3.2 CDAAC 的发展阶段

CDAAC 将要完成的主要任务如下:

- 设计软件的系统结构、接口,以及规定数据格式;
- 发展和测试快速轨道计算和预报技术;
- 改进和加速中性层大气反演技术和误差模型分析;
- 发展和测试下对流层新的反演技术;
- 研究基准网和多路径;
- 测试和安装新的电离层剖面技术;
- 发展闪烁数据分析技术和生成全球闪烁图;
- 为星座补充和测试真实数据模拟器;
- 完成编码、文件和跟踪分析系统;
- 用模拟的和其它计划(CHAMP、SAC-C、Ørsted、GRACE)的实际数据测试系统;
- 发展运载状态分析软件;
- 发展运载指令软件;
- 发展数据库系统和网络接口;
- 购买、安装网络分析和存储硬件;
- 与 JPL、亚利桑那州大学等其它掩星分析中心进行产品比较和测试。

这些任务需要各个研究领域的基础知识,包括:LEO 和 GPS 轨道预报、下对流层的信号渗透、水汽测定、衍射和多路径校正、电子密度水平梯度计算、电离层全息成像、电离层的太阳周期活动影响的校正、数据同化成数值天气预报的模型研究等。在 UCAR 的 COSMIC 小组将研究许多类似的问题,他们还与其它小组(例如亚利桑那州大学、佛罗里达州大学、德克萨斯州大学、JPL、NRL 等)一起紧密合作,确保将最先进的算法应用到所有的 COSMIC 数据分析中。

## 4 国内科学前景

我国是一个发展中的大国,具有地域广大、地貌复杂、自然灾害频发、经济实力不强等特点。我国又是多自然灾害的国家,灾害的预报和防治是我国政府面临的一个严峻问题。用 GPS 技术监测地球大气的设想在我国无疑有很大的潜力,也是我国 GPS 工作者应该考虑的研究课题之一。从 COSMIC 计划的模拟计算结果中,我们发现: COSMIC 的观测点在中纬度地区的分布显得相对稠密,而我国正处在这个地区,这在军事上和经济上均是值得注意的动向。

近年来, GPS 技术在我国得到越来越高的重视,在独立发展自己的 GPS 网络的同时,我国的一些台站也参加了国际 IGS 网络。今天,无论在国防和国民经济中,或者在科学研究中, GPS 技术在我国都获得了丰硕的科研成果和显著的经济效应。而 GPS 无线电掩星是当前卫星技术在地球大气探测中最有潜力的发展方向之一,它具有高精度、高分辨率、费用低而几乎准实时的特点。

从 MicroLab1 的结果来看,在探空气球站分布较密集的地区,掩星资料同探空气球资料符合得较好;而在探空气球站分布稀少的地区,两者的偏差就较大。这说明,掩星技术能在全球和局部大气探测中起很大的作用。合理地把掩星数据观测同化到大气模式中,能提高资料的利用率,从而更有效地为国防和民用服务,这也是 COSMIC 计划实施前需要解决的关键问题之一。

我们认为,我国目前所面临的任务是发展独立的 GPS 掩星反演地球大气技术工程系统,为气象、灾害防治和大气研究服务。它应包括以下四个方向:为我国将来自己发射 LEO 卫星提供硬件设计和制造的必要理论依据;创建能高精度和实时处理掩星观测、具有独立知识产权的 GPS 掩星技术软件包;开展相关领域中国际领先项目的理论研究;发展 GPS 大气探测的新方向。

其中,我国自己的 GPS/LEO 软件包应该包括以下内容:

- (1) GPS 和 LEO 卫星的定轨及其软件的实现、时延序列的计算;
- (2) LEO 卫星掩星观测数据的处理、各个层次的大气剖面反演技术。除常规的相位反演技术外,开展振幅反演、单频电离层反演、山基和飞行器载接收机反演等研究。特别注意 8km 以下大气层的反演精度改进和高阶项改正。这是本软件包的核心部分,它必须具有高精度、实时、连续、稳定、自动化等特性;
- (3) 反演产品的应用,包括:海量观测数据的实时传输和处理,以及各个反演层次的大气剖面(包括大气偏折角场、折射场、压力场、温度场、湿度场、电离层场等)的同化问题;
- (4) 通约 GPS 和 LEO 卫星的设计及优化计算;
- (5) 如果需要,可以给出 LEO 卫星软、硬件设计的技术指标,以及经济预算。包括其系带仪器的详细技术数据。

至于理论课题,可通过星座结构分析进行 LEO 卫星的优化轨道设计研究,给出合理的轨道设计,为我国自己 LEO 卫星的设计提供可靠的技术数据。上海天文台正在研究的掩星质量因子理论将成为优化轨道设计的新的理论根据之一。

MicroLab1 两年观测所反演得到的约 62000 个大气剖面数据中,有很多数据在低层大气的反演质量上还存在问题,而真正有用的很少;在大气剖面的同化过程中发现:有的剖面数据在

天气预报中不能达到预期的效果。我们对大气反演计算方法进行研究时发现,观测资料的预处理是掩星工作的关键点之一。用不同的平滑方法、不同的数据删除标准可能得到不同的反演结果,因此有必要进行资料预处理研究。改进低层大气反演模型,进行高阶项的理论推导和计算方法研究,得到更多的有效剖面,提高反演大气剖面的质量,是我们正在进行的另一研究课题。

虽然我国目前还不具备自己的 LEO 卫星,但我们可先建立自己的多功能模拟软件包,以获取 LEO 卫星掩星观测的模拟数据。掩星技术模拟计算模型的建立和分析,是检验掩星技术和 LEO 卫星功能的重要方法,具有重要的科研价值。

目前,国内外研制的各种反演程序中,都没有考虑振幅观测。在现有的文献中,对此项的研究也不完整。期待用振幅观测改进反演模型是一个研究方向,因为它也是研究大气层闪烁的重要途径之一。此外,电离层单频反演模型的改进和它的观测资料的同化是另一个重要的研究方向。

当然,还可以开展地面观测点控制、山基或飞机载接收机反演、资料应用、大气折射场和气象资料的同化模型研究等前沿课题的研究。

综上所述,我国已经开展了空基 GPS 气象学的研究,在某些领域,如掩星观测中地面观测点的控制上也已获得了一些重要的研究成果<sup>[29]</sup>。我们认为,在进行理论研究和软件研制的同时,合理地分析和借鉴 COSMIC 系统,尽可能开展广泛的国内外合作,将对我国空间技术的发展是大有好处的。

### 参 考 文 献

- 1 Businger S, Chiswel S, Bevis M *et al.* Bull. Am. Met. Soc., 1996, 77: 5
- 2 Bevis M, Businger S, Herring T *et al.* J. Geophys. Res., 1992, 97: 15787
- 3 王小亚, 朱文耀, 严豪健等. 大气科学, 1999, 23(5): 605
- 4 Fjeldbo G, Kliore A J. A.J., 1971, 76(2): 123
- 5 Melbourne W G, Davis E S, Duncan C B *et al.* JPL Publ., 1994, 18: 147
- 6 Schreiner W S, Sokolovskiy S V, Rocken C *et al.* Radio Sci., 1999, 34(41): 949
- 7 Hajj G A, Romans L J. Radio Sci., 1998, 33(1): 175
- 8 Exner R M, Feng D, Gorbunov M *et al.* Bull. Am. Met. Soc., 1996, 77: 19
- 9 方宗义. GPS/MET 初步研究报告, [s.l.]: [s.n.], 2000
- 10 Kursinski E R, Hajj G A, Bertiger W I *et al.* Science, 1996, 271: 1107
- 11 Rocken C, Anthes R, Exner M *et al.* J. Geophys. Res., 1997, 102: 29849
- 12 Kursinski E R, Hajj G A, Schofield J T *et al.* J. Geophys. Res., 1997, 102: 23429
- 13 Zuffada C, Hajj G A, Kursinski E R. J. Geophys. Res., 1999, 104(D20): 24435
- 14 Sokolovskiy S V. Radio Sci., 2000, 35(1): 97
- 15 Zou X, Kuo Y H, Guo Y R. Mon. Wea. Rev., 1995, 123: 2229
- 16 Zou X, Vandenberghe F, Wang B *et al.* J. Geophys. Res., 1999, 104: 22301
- 17 Kuo Y H, Sokolovskiy S, Anthes R A *et al.* Atmospheric and Oceanic Science, 2000, 11(1): 157
- 18 Kuo Y H, Zou X, Huang W. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 1997, 27: 439
- 19 Karayel E T, Hinson D P. Radio Sci., 1997, 32(2): 411
- 20 Leroy S S. J. Geophys. Res., 1997, 102: 6971
- 21 Tsuda T, Nishida N, Rocken C *et al.* J. Geophys. Res., 2000, 105: 7257
- 22 Kuo Y H, Zou X, Chen S J *et al.* Bull. Am. Met. Soc., 1998, 79: 617

- 23 Yuan L L, Anthes R A, Ware R H *et al.* *J. Geophys. Res.*, 1993, 98(D8): 14925
- 24 Rind D. *Science*, 1998, 281: 1152
- 25 Hajj G A, Ibanez-Meier R, Kursinski E R *et al.* *International J. of Imaging Systems and Technology*, 1994, 5: 174
- 26 Lemoine F G, Kenyon C, Factor J K *et al.* *The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96*, NASA/TP-1998-206862, Greenbelt, Goddard Space Flight Center, 1998
- 27 Eyre J R. *ECWMF Tech. Memo.*, 1994, 199: 34
- 28 Ocken C, Kuo Y H, Schreiner W *et al.* *Atmospheric and Oceanic Science*, 2000, 11(1): 21
- 29 Yan H J, Huang D, Huang C. *J. Geophys. Res.*, 1999, 26(4): 451
- 30 Kursinski E R. Ph. D Thesis, California: California Institute of Technology, 1997: 1

## COSMIC Project

Guo Peng<sup>1</sup> Hong Zhenjie<sup>2</sup> Zhang Dahai<sup>1</sup>

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030*)

(2. *Mathematics Department, Wenzhou Normal College, Wenzhou 325000*)

### Abstract

COSMIC ( the Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) is a joint project between U.S. and Taiwan region of China. The scientific foundation of COSMIC is based on radio occultation (limb sounding) technique for the earth atmosphere and geoscientific objects. The COSMIC constellation is currently planned to be launched in 2005. The components, functions and scientific purposes of COSMIC system, including the LEO satellites, ground data reception and spacecraft control stations, data analysis centers and the data communications networks, are reviewed. As conclusions, some possible research projects related to COSMIC are listed in the final part.

**Key words** radio occultation technique—GPS/MET—COSMIC