

武汉 CHAMP 站的建立以及 CHAMP 任务的应用

刘经南¹ 罗 佳²

(1 武汉大学校长办公室, 武汉市珞珈山, 430072)

(2 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要: 介绍了武汉 HR/LL 站的建立和构成, 探讨了 CHAMP 任务的应用前景, 并比较了 IGS 武汉站和 CHAMP 武汉站的相关功能。

关键词: CHAMP 地面跟踪站; 重力场; 大气; GPS 掩星

中图法分类号: P228.42

连续运行 HR/LL (high rate low latency) 地面 GPS 跟踪网是 CHAMP 任务实施高 (GPS 卫星)-低 (CHAMP 卫星) 掩星观测的地面跟踪部分。目前, CHAMP 任务已在全球布设了 11 个地面跟踪站。其中, 武汉站是由武汉大学和德国地学研究中心 (GFZ) 合作建立的, 是 CHAMP 地面跟踪网的第 12 站, 并将于近期投入运行。

CHAMP 任务的设计、维护均由德国地学研究中心负责。该任务使用的 CHAMP 卫星具有鲜明特点, 其物理参数如下: 卫星发射质量为 522.5kg, 长 8 333mm, 宽 1 621mm, 高 750mm, 面质比为 $0.00138\text{m}^2/\text{kg}$, 其轨道参数见表 1^[1]。

1 武汉 CHAMP 站的构成

作为 CHAMP 任务的重要组成部分——地面跟踪网在 CHAMP 卫星轨道的精密确定等方面起着举足轻重的作用^[2]。为了满足 CHAMP 任务轨道数据的时效性和精度要求, 同时保障其

他科学研究项目的正常实施, CHAMP 任务已经在全球布设了 11 个连续运行跟踪站, 而在幅员辽阔的中国境内目前还是空白。为了建立一个布局更加合理的跟踪网, 以利于对 CHAMP 卫星进行有效定轨, 武汉大学和德国地学研究中心进行了合作——双方共同在武汉建立了符合 CHAMP 任务要求的高采样率、低延迟 (HR/LL) 跟踪站。同时, 德国地学研究中心向武汉大学提供了 CHAMP 任务 1~4 级别的数据。这为开展地学领域的研究, 特别为地球重力场、大气和地球磁场研究提供了丰富的资料, 对推动我国空间大地测量事业的发展十分有益。

武汉 CHAMP 站是武汉大学 (原武汉测绘科技大学) 在成功建立和运行武汉 IGS 跟踪站之后建立的又一高水平的国际空间科学跟踪站。它主要由以下硬件系统和软件系统构成。其中, CHAMP 跟踪站的硬件系统由以下 4 个单元组成。

接收单元。美国 AOA 公司制造的 Bench-Mark GPS 接收机, 该型号的接收机可以以 1s 采

表 1 CHAMP 卫星轨道
Tab. 1 CHAMP Satellite Orbit

卫星起始历元	卫星设计寿命	卫星轨道参数 (在 CIS 中的平均参数)	卫星轨道周期特性
2000-08-01 00:00:00 (GPS) (格林尼治时间)	5a	长半轴 $a=6\,823.687\text{km}$	一周的时间: 00 93:55
		偏心率 $e=0.004\,001$	每天周数: 15.40
		轨道倾角 $i=87.277^\circ$	节点周期: 966d
		近地点角 $\omega=257.706^\circ$	近地点周期: 93d
		升交点角 $\Omega=144.210^\circ$	
		平近地点角 $M=63.816^\circ$	

样率高精度地接收 GPS 信号, 并可以接收原子钟的时钟频率信号, 提高数据质量。

◦气象单元。TM 200 型气象仪以设定的采样率收集温度、湿度和大气压信息并实时地传输到控制单元。

◦控制单元。工业标准的计算机, 负责整个跟踪站系统的运转和控制。

◦电源单元。电源管理设备 Batman、充电器、直流/交流转换器和不间断电源 UPS。该单元可以保证在异常断电后, 使控制单元有效地保存相关数据和设置并自动关闭所有设备, 一旦电源恢复后即自动启动所有设备, 使 CHAMP 跟踪站能很好地兼顾尽可能连续的数据采样和设备安全。

CHAMP 跟踪站的软件系统则由以下 6 个单元组成。

◦GPS 数据下载单元。由接收机下载 GPS 数据。

◦GPS 数据转换单元。将数据转换为 GFZ-Binex^[3] 格式。

◦电源监控单元。监测电源, 并记录到 log 文件。

◦气象数据下载单元。由 TM200 自动下载气象数据。

◦压缩工具。利用 tcomp 算法³ 压缩数据, 这可以较好地保证在网络拥挤时尽快将数据汇总到数据中心。

◦自动发送数据工具。将数据自动传输到 GFZ 数据中心。

以上系统在成功运行后将全自动进行数据的采集、预处理、打包和发送, 无需人工干涉, 其数据的流程如图 1 所示。

2 CHAMP 任务的数据

在未来的数十年里, 地球科学的中心任务将逐渐转变为将地球作为一个系统来研究, 这对揭示地球信息的本质至关重要。而其他具有局部意义的技术则作为补充和特定任务的解决方法。地球系统包括在时域和空域内变化着的固体、液体和气体, 以及它们间的相互作用。CHAMP 任务是通过整体地观测地球系统展开的。

1) 在轨道设计上, CHAMP 所采用的圆形近极轨道在测地方面具有明显的优点: ①可以提供比较均匀的全球覆盖, 这对于恢复地球重力场和磁场十分重要; ②相对于太阳同步轨道, 该类轨道可探测出某些地球信息的周期性变化(如潮汐及其周日变

化), 而对于太阳同步卫星而言, 星下点的地方太阳时几乎不变; ③CHAMP 卫星轨道高度约为 454km, 对于地球信息将更为敏感(利用 CHAMP 卫星资料可望精确求定地球重力场到 100 阶次), 并可以展开对时变地球重力场的研究。

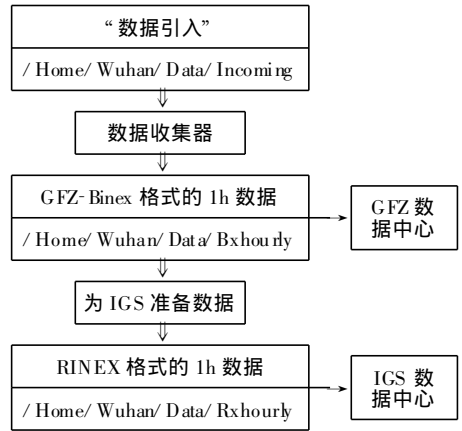


图 1 武汉 CHAMP 跟踪站数据流程

Fig. 1 Data Flow of CHAMP Wuhan

2) CHAMP 所携带的相关设备, 包括 BLACKJACK 型星载 GPS 接收机、高灵敏度加速度仪、磁力仪以及各种先进的传感设备, 使得 CHAMP 卫星能够高质量地获取地学数据资料。其中, 星载 GPS 接收机提供的卫星跟踪卫星 (satellite-to-satellite tracking, SST) 资料提供了进行地球重力场研究的新的观测, 可以很好地改善某些阶次的地球重力场模型系数。另外, 高低模式的 GPS 掩星资料为研究地球大气(包括对流层和电离层)提供了丰富的信息——每天 200 多次掩星事件。再辅以地面 GPS 资料将极大地改善单纯利用传统气象资料建立地球大气层析模型时的数据分辨率和分布状况, 提高数值天气预报的可靠性。

3) CHAMP 任务的有效保障。完善的地面跟踪网和地面监测系统(软件和硬件), 特别是由目前 11 个 HR/LL 跟踪站组成的地面跟踪网在 CHAMP 精密轨道确定方面扮演了重要角色。11 个跟踪站所提供的 1s 采样的 GPS 观测资料通过数据链近乎实时地汇总到 GFZ 数据中心, 使得数据中心可以较快的速度(延迟 1~2d)提供高精度的快速轨道数据, 为 CHAMP 任务的各个应用提供基本数据。

基于 CHAMP 数据的分类, CHAMP 任务所致力研究的问题主要有以下 3 个方面。

◦重力。高精度的星载 GPS 可以提供高密度、连续的轨道变化情况, 同时, 星载高灵敏度加

速度计提供的加速度资料,可用于分离作用在卫星上的保守力和非保守力。CHAMP 卫星配备的恒星照相系统可用于精密姿态控制。

°磁力。高性能的磁力计可用于测量地球磁场的三维分量;

°大气(对流层和电离层)。星载设备在提供高精度的重力场和磁场信息的同时可以对地球大气进行观测,其中 GPS/CHAMP 无线电掩星观测资料可以用于定量研究大气的温度、水汽分布以及全球大气电子密度分布的情况。

当 CHAMP 数据完全发布以后,基于上述 3 个主要的研究领域,CHAMP 任务可以提供以下数据。

°高精度的全球静态重力场的长波信息和地球重力场的时变信息;

°全球磁场的空间/时间分布的信息;

°全球分布、大量的由于电离层和对流层产生的 GPS 折射信号信息,它们可以转化为温度、水汽含量和电子含量(TEC)。

基于 CHAMP 卫星星载设备的精确度和稳定性以及高精度提供作用在卫星上的力的信息,使得 CHAMP 任务在地球科学的许多方面的应用潜力巨大。

°岩石圈。分析研究固体地球的结构和动力学特性,以及与海洋、大气之间的相互影响。

°水圈。更高精度的监测海洋环流,全球海面高变化和短期的全球水平衡的研究。

°大气圈。全球的无线电探测资料可以用于研究中性及电离大气层与地球表面及空间的气候关系。

目前,在重力场领域,GFZ 已经利用 CHAMP 资料计算了展开到 72 阶次的地球重力场模型。利用 CHAMP 掩星数据所获得的分布全球的干温垂直廓线,与欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的相应的全球气象分析进行了对比,其结果是在对流层顶之上,温度偏差小于 1K;在北纬大于 30°的地区的地表以上,处于 12~20km 之间,温度偏差甚至低于 0.5K。在磁场的研究方面也取得了不少成果。

3 CHAMP 卫星监测地球信息的基本原理

3.1 地球重力场

CHAMP 卫星的星载 GPS 接收机以很高的采样率接收 GPS 卫星信号,联合地面跟踪网的数

据可以高精度地确定 CHAMP 卫星的轨道。同时,利用 CHAMP 星载高精度加速度仪观测资料将非保守力的影响分离,就可以利用 SST 的基本观测量(CHAMP 与 GPS 卫星之间的距离变率,即相对视线速度)确定地球重力场的部分位系数以及它们的组合。特别地,由于 CHAMP 具有近极点低轨道的特点,它对于重力场的敏感程度很高,且有很好的全球覆盖,可以以较高的空间和时间分辨率研究地球重力场。

3.2 地球大气

CHAMP 卫星在大气方面的主要任务之一就是利用 GPS 掩星技术研究地球中性层大气和电离层。其基本原理如下:①确定产生掩星的时刻并确定掩星事件,然后通过双差技术(CHAMP 卫星所载 GPS 接收机与地面基准网之间求一次差,发生掩星与未发生掩星的 GPS 卫星间求二次差)消除卫星钟差和接收机钟差,获取掩星路径大气的相位延迟。对延迟进行校正,然后基于 Snell 定律计算折射角廓线。②利用 L_1 、 L_2 两频率折射角廓线的组合获取电离层信息。采用 Abel 变换,得到总折射角、总折射率廓线。利用球对称大气模型反演得到大气参数廓线。对于低对流层则利用气象预报模式提供的温度廓线,反演水汽垂直廓线。③将成果与气象预报模式的成果进行比较,分析并评价其精度水平。

3.3 地球磁场

在全球范围内建立高精度的磁场模型必须有稠密且均匀的观测数据。传统的地面观测在空间分辨率和时间分辨率方面都无法满足建立全球磁场模型的要求,而地球近极低轨道卫星作为载体是理想的解决方案。1979~1980 年间 MAGSAT 进行了卓有成效的磁场观测工作,但是由于其工作时间只有 6 个月,且为太阳同步轨道卫星,不能很好地研究磁场的某些周期信息,具有一定的局限性。1999 年,丹麦实施了 Ersted 卫星计划研究地磁场,但由于较高的轨道(650~860km)使得数据分辨率方面的指标难以保证。CHAMP 卫星约 87°的轨道倾角保证它能够很好地覆盖所有当地时间,而其 5a 的系统设计寿命可望为开展磁场长期变化提供有效资料。同时,鉴于 CHAMP 卫星较低的圆轨道(平均 454km)和先进的磁力观测仪器,CHAMP 将可以提供高质量的磁场科学数据——全球磁场分布图和相关的源的结构及其动力学的信息。

4 CHAMP 武汉跟踪站与 IGS 武汉跟踪站

CHAMP 武汉站与 IGS 武汉站都是通过接收 GPS 卫星信号为空间科学服务的,同时,两站都是全天候自动接收、下载、打包并发送数据,而且两站都可以外接高精度的原子钟频率。但是,它们之间存在本质的区别:①两类跟踪站的采样率不同,IGS 武汉站的采样率是 30s,而 CHAMP 武汉站的采样率是 1s,这是由两类跟踪站各自的目的决定的。IGS 武汉站主要是为 IGS 在全球框架内的空间技术应用(如精密 IGS 星历的计算)服务的,而 CHAMP 武汉站主要是为 CHAMP 任务服务的,其采样率必须与 CHAMP 卫星相关设备的数据采样率相匹配。特别是为了将 CHAMP 卫星的定轨精度控制在有效范围之内以利于重力场、磁场和大气研究工作的进行,高精度的快速科学轨道和后处理精密轨道数据是必需的。②IGS 武汉站的数据格式采用 RINEX 格式,而 CHAMP 武汉站则采用 GFZ 定义的 BINEX 格式,同时由于 CHAMP 武汉站的数据采样率高于 IGS 武汉站采样率的 30 倍,为了有效地传输数据,CHAMP 武汉站采用了更加优化的压缩算法对数据进行压缩。③两站采用的设备也不尽相同,CHAMP 武汉站采用了 AOA 公司的 BenchMark 接收机,并配备了 TM200 气象仪器;而 IGS 武汉站采用的则是 ASHTECH 公司的接收机,配备的是小型气象传感器。

5 结语

CHAMP 任务从地球各圈层研究整体地球的新概念,同时开启了一系列 LEO 地学研究任务的序幕,具有标志性意义。空间大地测量的工作者还需在以下方面开展细致深入的工作。

1) 目前我国空间学科领域尚缺乏一套能进行精密卫星轨道确定和地球参数解算的具有自主知识产权的软件平台。

2) 如何由 SST 观测资料精确求定地球外部重力场,甚至研究重力场的随时变化,无论在理论上和具体的实现上都需要进一步完善。

3) 空基 GPS 掩星技术与地基 GPS 气象技术

的融合是未来 GPS 气象技术的热点。由于地基 GPS 气象研究已经取得较大进展,同时基于空基 GPS 掩星技术的巨大潜力,两者的融合对于填补气象数据空白,提高数据分辨率并进一步改善数值天气预报模型的准确度和可靠性具有重大的意义。

4) 需要规范化的数据管理。由特定人员负责空间大地测量数据的收集和维持(比如 SLR、LLR、GPS 星历等)。因为以往松散模式下的数据管理容易造成资源的浪费,而且完整性差,同时不利于数据的长期保存。

参 考 文 献

- 1 <http://op.gfz-potsdam.de/champ/orbit/index-PRD.html> 2002
- 2 Galas R, Wickert J, Burghardt W. High Rate Low Latency GPS Ground Tracking Network for CHAMP. *Phys. Chem. Earth (A)*, 2001, 26(6/8): 649~652
- 3 Galas R, Köhler A. Binary Exchange Format for GPS Data. *Phys. Chem. Earth (A)*, 2001, 26(6/8): 645~648
- 4 Wickert J. Atmosphere Sounding by GPS Radio Occultation: First Results from CHAMP. *Geophysical Research Letters* 2001
- 5 Maus S, Rother M, Holme R, et al. First CHAMP Satellite Magnetic Data Resolve Uncertainty about Strength of the Lithospheric Magnetic Field. Submitted to *Geophysical Research Letters*, GFZ-Potsdam, 2001
- 6 陈俊勇, 文汉江, 程鹏飞. 中国大地测量学发展的若干问题. *武汉大学学报·信息科学版*, 2001, 26(6): 475~482
- 7 陆仲连, 吴晓平. 人造地球卫星与地球重力场. 北京: 测绘出版社, 1994
- 8 宁津生. 跟踪世界发展动态 致力地球重力场研究. *武汉大学学报·信息科学版*, 2001, 26(6): 471~474
- 9 宁津生, 罗志才. 卫星跟踪卫星技术的进展及应用前景. *测绘科学*, 2000, 25(4): 1~5
- 10 GFZ Announcement of Opportunity for CHAMP, GFZ-Potsdam, 2001
- 11 Förste C. References to Data Formats Used Within the CHAMP Project GFZ-Potsdam, 2001
- 12 GFZ Announcement of Opportunity for CHAMP, GFZ-Potsdam, 2001
- 13 Wickert J, Galas R, König R, et al. GPS Ground Station Data for CHAMP Radio Occultation Measurements. *Phys. Chem. Earth (A)*, 2001, 26: 503~551

(下转第 559 页)

dimensional space to the image space by the similar transformation. Then, the small space is projected to the level plane, which passes the center of the image plane. Finally, the level image is transformed to the original declining image. Every step of the model is strict, and the map function of each transformation is the first order polynomials. The final calculation of the parameters is for the linear equations with good status. As a result, the problem of the relativity of image parameter calculation is solved completely. Some experiments are carried on for a lot of images with 10 m, 3 m and 1 m resolution. All of the results are quite perfect. Thus, the validity of the strict geometric model has been verified.

Key words: remote sensing image; high resolution; parameter calculation; affine transformation; strict geometric model

About the author: ZHANG Jianqing, professor, Ph. D supervisor. He is concentrated on the research and education in photogrammetry & remote sensing and computer vision. He has made unique contribution in the areas of reform of photogrammetric technology, reform of analytical plotter, theory and method of full digital automatic mapping, intelligence and automation of map name placement based on optimal solution theory, Virtuoso Digital Photogrammetry System, etc. He has published more than 100 papers and a book Digital Photogrammetry.

E-mail: jqzhang@supresoft.com.cn

(上接第 554 页)

作者简介: 刘经南, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士。现主要从事空间大地测量和地球动力学的研究。代表成果: 国家高精度

GPS 数据处理理论与方案; GPS 卫星定位处理综合软件; WADGPS 数据处理软件; 青藏高原地壳运动与形变的 GPS 研究等。

E-mail: jnliu@whu.edu.cn

Establishment of the CHAMP Wuhan and Application of CHAMP Mission

LIU Jingnan¹ LUO Jia²

(1 Presidential Secretariate, Wuhan University, Luojia Hill, Wuhan, China, 430072)

(2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract: The CHAMP Wuhan tracking station is based on the frame between Wuhan University and GFZ. It is the 12th Ground Tracking Station for CHAMP mission. The establishment of CHAMP Wuhan is introduced in this paper. Then the application of CHAMP mission are described in detail. Last, the differences between CHAMP Wuhan and IGS Wuhan are described.

Key words: CHAMP tracking station; gravity field; atmosphere; GPS occultation

About the author: LIU Jingnan, professor, Ph. D supervisor, member of the Chinese Academy of Engineering. His major research orientations include space geodesy and geodynamics. His typical achievements are the theory and scheme of high precision GPS data processing in China; the comprehensive software of GPS satellite positioning processing; the software of WADGPS data processing; the crustal movement and deformation of Qinghai-Tibet Plateau using GPS, etc.

E-mail: jnliu@whu.edu.cn