

GPS 应用于地球动力学研究的进展

宋淑丽 朱文耀 廖新浩

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

介绍了 GPS 卫星系统的现代化以及 IGS (International GPS Service) 的最新研究成果; 重点介绍了 GPS 技术在地球动力学研究中, 包括国际地球参考架的建立与维护, 固体地球形变和海平面变化的监测, 科学卫星轨道的确定以及全球和中国地壳运动、地球定向参数的监测, GPS 在大气研究和气象预报中的最新进展; 评述了 GPS 技术目前存在的问题, 包括与 SLR 测量之间存在的系统偏差、GPS 技术本身可能存在的周年变化和 GPS 卫星天线相位中心的变化。

关键词 天体测量学—GPS—综述—板块运动—地球自转—地球参考架—大气监测

分类号 P129

1 引 言

GPS 技术是当今科学技术发展的一项重要成果, 它已涉足国民经济和社会发展, 以及人们日常生活的各个领域, 并广泛应用于空间定位、科学探险、工程监测、飞机航行、汽车导航、后勤和通信等方面。特别是在地球科学研究中, GPS 技术已成为监测地壳形变、板块运动、地球自转、大气等的有效途径。

2 GPS 技术现代化和 IGS 的最新产品

随着全球 GPS 应用的迅速发展, 美国将对 GPS 系统做出重要改进, 以实现 GPS 的现代化。其改进的主要内容包括: 关闭 SA (Selective Availability)、增加民用频率、增大星座、增加后向天线、增强信号功率、改进卫星信号结构、改善空间信号精度^[1,2]。

(1) 关闭 SA: 2000 年 5 月 1 日, 美国政府取消了 SA 政策, GPS 民用信号定位精度在全球范围内得到了改善, 使 GPS 实时单点定位精度从 100 m 提高到 30 m 左右。

国家自然科学基金项目 (40174009, 10133010) 资助课题 中国科学院知识创新重要方向项目 (KJ CX2-SW-T1)

资助课题

2002-08-29 收到 2002-12-23 收到修定稿

(2) 增加民用频率: 美国正在开发 II 型 GPS 卫星的第三代, 即 II F 型卫星。II F 卫星加载了第二民用 C/A 码信号, 增设了第三民用频率 (1176.45 MHz), 这样一般用户 GPS 接收机在伪距定位时的精度将得到很大提高, 以进一步推动 GPS 技术的应用。

(3) 增大星座: 研究表明, 30 颗卫星的星座大小将支持新的覆盖性能要求, 改善 GPS 在所需完好性水平上的连续性功能, 同时较大的星座也有助于提高定位精度。现已提出了几种星座增强方案, 其中包括 24+ 备份星座、用 GEO (地球同步轨道卫星) 增强和 MEO (中高轨道卫星) 完好性通道。

(4) 增加后向天线: 此目的在于支持更高高度上的卫星能够接收导航信号, 供高轨卫星的星载 GPS 自主定轨, 以扩大 GPS 的应用。

(5) 增强信号功率: 增加 30 dB 的抗干扰能力主要用于军方用户, 从而有助于 GPS 导航能力在未来战场上的生存。可能采取的措施是特制天线、采用先进信号处理技术和对空间信号本身的潜在改进。

随着 GPS 应用的日益广泛和美国 GPS 政策的明朗化, 各种高性能的 GPS 接收机正在迅速发展, 新一代的 GPS 接收机使用更高集成度的芯片, 具有快速和高精度的定位能力、高自动和高适应性能, 硬件设计具有抗干涉性能强, 消除和减弱电离层折射和多路径影响以及自动恢复周跳和平滑的功能。全球导航卫星系统 GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System) 是俄罗斯版的 GPS, 它能达到上述所讨论的 GPS 的所有目的, 并具有相当的精度。GLONASS 的重要特征如下:

(1) 全部星座包含 24 颗卫星 (目前只有 14 颗在正常运行);

(2) 卫星均匀分布于 3 个轨道面内, 两个轨道面相距 120° , 轨道倾角均为 64.8° ;

(3) 轨道几乎为圆轨道, 半长径为 25510 km。运转周期均为 11 h 16 min, 这意味着 GLONASS 的轨道不会和地球产生强烈的 2:1 共振;

(4) 每颗卫星都预先分配有 1.603~1.616 GHz (L_1 波段) 和 1.246~1.257 GHz (L_2 波段) 范围内的频率, 伪随机码对于所有的卫星都是一致的;

(5) 时间系统实质上为 UTC (SU), 它存在跳秒问题。

目前已有许多型号的测地接收机, 可以跟踪 GPS 和 GLONASS 两个系统中所有可见的卫星。对于联合分析而言, 其实用和科学方面的潜力是显著的:

(1) 导航更可靠、更具活力;

(2) GLONASS 卫星轨道较高的倾角使得组合系统的全球覆盖范围大大提高;

(3) 用于大气研究的样本分辨率更高;

(4) 由于能同时观测更多的卫星, 解决初始整周模糊度变得更加容易。

基于 GLONASS 的这些特点, IGS 的第八委员会和 IGS 国际空间技术协调委员会、COSPAR (Committee On SPACe Research) 的 B.2 委员会在 1998 年底进行了 3 个月的国际 GLONASS 实验 IGEX-98, 这是一次全球 GLONASS 跟踪和分析的会战, 它使人了解到 GLONASS 加入 GPS 系统的好处以及使用 GLONASS 的有效性, 给人留下了很好的印象。关于 IGEX-98 的更多信息可参阅 Willis 等人的文章^[3~5]。现代化后的 GPS 系统将具有更广泛的应用前景, 其导航能力、定位精度将大大提高。

IGS 即国际 GPS 服务, 其宗旨是服务于大地测量学和地球物理学的研究活动, 利用近 200

个永久性高精度跟踪站获得的数据,为用户提供高精度的 GPS 卫星星历、IGS 跟踪站的坐标和速度、卫星钟和站钟信息,以及地球自转参数和电离层、对流层信息来支持多项天文地球动力学的研究。比如,国际地球参考架的建立和维护、固体地球形变和海平面变化的监测、精确授时、科学卫星轨道的确定、大气的监测和研究等^[6]。

IGS 的中央局信息系统 (CBIS) 在网上为 IGS 的各个组织以及使用 IGS 轨道信息和跟踪数据的用户提供资料,信息系统中的全球资料每天更新一次,并向用户提供数据源和观测日期以及获取方式。CBIS 的网址是 <http://igsb.jpl.nasa.gov>, 可以以匿名方式在如下 ftp 上登陆: [igsb.jpl.nasa.gov](ftp://igsb.jpl.nasa.gov)。IGS 分析中心从全球的数据处理中心收集卫星轨道、星钟、站坐标等信息,并综合成 IGS 产品,公布于用户。最新的 IGS 产品如表 1 所示。

表 1 IGS 最新产品^[37]

IGS 产品		精度	延迟时间	更新时间	采样间隔
星历 / 钟	广播	~260 cm/~	实时		1 d
	预报 (IGP)	~50 cm/~150 ns	实时	2 d	15 min
	预报 (IGU)	~25 cm/~5 ns	实时	0.5 d	15 min
	快速 (IGR)	5 cm/0.2 ns	17 h	1 d	15 min
	精密	<5 cm/0.1 ns	~13 d	1 星期	15 min
跟踪站地心坐标	水平 / 垂直	3 mm/6 mm	12 d	1 星期	1 星期
	水平 / 垂直速率	每年 2 mm/ 每年 3 mm	12 d	1 星期	1 星期
地球自转参数	快速极移 / 极移	0.2 mas/0.4 mas			
	速率 / 日长变化	每天 /0.030 ms	17 h	1 d	1 d
	精密极移 / 极移	0.1 mas/0.2 mas	~13 d	1 星期	1 d
	速率 / 日长变化	每天 /0.020 ms			
大气参数	对流层	4 mm ZPD	<4 星期	1 星期	2 h
	电离层	1 TECU	<4 星期	1 d	2 h

注: IGS 原来的预报产品 (星历 / 钟)IGP 的发送已于 2001 年 3 月终止,由 IGS 的超快速 (Ultrarapid) 产品 IGU 代替。

IGS 这些产品为固体地球的形变、水圈 (包括海平面、冰层等) 和大气圈 (包括电离层、对流层等) 的各种变化,以及地球的整体定向运动的监测与研究提供了高精度、高分辨率的海量信息。十余年来在 GPS 技术的推动下,地球动力学的研究取得了重要的进展。

3 地球动力学中 GPS 研究的最新成果

(1) 地壳形变和板块运动监测

对固体地球形变和板块运动的研究,是目前地球动力学研究的重点之一。而板块构造运动是与人类生存环境密切相关的地震、火山喷发、地热活动、海陆升降的动力学原因之一。传统的板块构造运动研究方法主要是依据地质和地球物理资料,建立板块运动模型。这些模型的精确度和它是否符合现今地壳运动的特征,需用现代空间测量技术的实测结果来进行检核

和验证。

VLBI、SLR、GPS 等空间大地测量技术,能以 mm 级的精度测定地面点的位置和测站之间的基线长度,成为现今全球地壳运动监测的主要手段。特别是 GPS 技术,由于其观测信息丰富,全球覆盖,便于密集布网等特点,为给出高时空分辨率的地壳形变的可靠结果提供了保证。

目前用于监测全球地壳运动的 GPS 网,除了 IGS 全球 GPS 网外,世界各国还建立了诸多区域性的地壳运动 GPS 监测网。主要有:日本的拱顶石计划(在日本布设了 1000 多个测站)、美国西部南加利福尼亚的 PPGA (Permanent GPS Geodetic Array) 网、中欧 16 国大地测量和地球动力学合作计划 CEI (Central European Initiative)、中南美 GPS 计划 (CASA)、阿根廷的 GPS 计划、非洲的地壳运动监测计划、意大利的第勒尼安海大地网计划 (Tyrgeonet Project)、亚太的区域性大地测量计划 APRGP (Asia-Pacific Regional Geodetic Program) 和中国地壳运动观测网络等。

GPS 技术是监测地壳形变和板块运动的主要手段,利用 GPS 全球网和区域网的多年观测结果,已获得全球和各活动构造带地壳水平运动的可靠结果,建立了现今的全球板块运动和区域性的活动块体运动模型。我国在这方面的起步较早,从 1990 年开始,先后建立了多个全国性的地壳运动监测网(包括中国地壳运动监测网、中国地壳运动观测网络、国家 GPS A 级网等)和主要活动带的区域性 GPS 监测网(包括青藏和喜马拉雅山地区、川滇地区、河西和阿尔金地区、新疆和塔里木地区、华北地区和福建沿海地区等),进行了多期的复测和连续观测。并利用这些资料首次建立了较完整的大陆及其周围地区地壳运动的速度场,给出了中国大陆地壳水平运动的基本特征;得到了中国地壳水平运动呈现明显的非均匀性、西强东弱,中国西部地区的地壳运动受印度板块强烈冲击呈现南北向缩短、东西向伸展、有明显块体特点等重要结论^[7,8]。

地壳垂直方向运动的 GPS 监测也取得了重要进展^[9,10]。地壳垂直方向的变化特性不同于水平方向,水平方向运动主要有板块运动引起,其线性速度年变率远大于其它地球物理因素引起的周年运动的振幅,因此线性速度运动是水平运动的主要特征,这种年变率达每年几厘米的线性速度较易用 GPS 的定期复测获得。而测站垂直方向的运动由诸多地球物理因素引起,以季节性变化为主。年变率较小 (mm/yr) 的线性速度运动与诸多振幅较大的周期运动交叉在一起,只有通过较长时间的连续观测和精细的频谱分析才能得到可靠的垂直方向运动的监测结果。GPS 技术在这方面具有其它空间技术如 VLBI 和 SLR 不可比拟的优越性^[11]。

IGS 的分析中心 JPL (Jet Propulsion Laboratory) 已在网上给出了 1991 年 1 月 22 日以来全球共 616 个 GPS 站三维坐标周日解的时间序列 (<http://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/mbh/series.html>)。利用其中连续观测时间较长的约 200 个台站坐标时间序列进行测站垂直方向运动的精细分析,得出的主要结论如下^[11]:

1) 全球大部分台站垂直方向的线性速度甚小,仅为 1~2 mm/yr,小于周年和半年运动的振幅。南半球的大部分台站的线性速度项为正(升高),平均速度为 1.43 mm/yr,呈现一定的系统性膨胀;北半球台站的线性速度并无明显的系统性,平均速度为 0.03 mm/yr。

2) 全球 GPS 台站的垂直方向运动均存在周年和半年的周期运动,全球测站周年运动的平均振幅为 2.58 mm;南半球周年运动的最大值出现在 12 月前后,平均振幅为 2.62 mm;

北半球周年运动的最大值出现在 10 月, 平均振幅为 2.57 mm。半年周期运动的平均振幅为 1.60 mm, 南北半球无显著的差别, 90% 台站的垂直方向半年周期的最大值出现在 4~6 月和 10~12 月。呈现明显的地球整体性的振荡运动。

地壳垂直方向运动的监测, 特别是极区附近地壳形变的监测可提供刻画冰后期反弹的参数。有关这方面研究目前正在进行, 瑞典 GPS 永久网所执行的 BIFROST (Baseline Inferences for Fennoscandian Rebound, Sea-level, and Tectonics) 计划就是探测芬诺斯堪迪亚 (Fennoscandia) 更新世的冰川消失, 这将是一个与全球气候变化和海平面升高相连的重要观测。

(2) 地震和火山爆发监测

目前世界上的两个全球导航定位卫星系统, 即美国的 GPS 和俄罗斯的 GLONASS 系统, 在距地 20000 余 km 的高空为用户提供其高精度的定位、授时和速度信息, 利用这两个系统可以精确地获知地面相对数百公里甚至几千公里距离范围内的 1~2 cm 的位移变化, 从而为地震测量和预报提供重要的背景资料。

日本是地震的多发国家, 日本政府也非常重视 GPS 技术的引进工作, 目前日本全国有 1000 多个 GPS 永久性观测站。日本国土地理院从 1993 年便开始了 GPS 连续观测网的筹建工作。1994 年日本列岛 GPS 连续观测站总数已达 210 个, 构成了覆盖全国的 GPS 连续观测系统, 并于 1994 年 10 月 1 日正式启用。10 月 4 日该系统监测到北海道东部近海 8.1 级大地震, 并清晰地记录了地震前后的地壳形变。此后又成功地捕捉到三陆远海地震及兵库县南部地震的地壳形变。1995 年 1 月 17 日该系统在日本阪神 7.2 级大地震后进行快速、准确、精细地监测与分析地壳运动方面起到了很大的作用, 但在该次地震前一周并没有观测到明显的前兆现象^[12,13]。

1989 年用 GPS 接收机实测了川奈和初岛之间的位置变化, 得出伊东近海附近震群及火山活动的背景资料, 结果在火山爆发前发现了明显的地表位移: 相对于川奈、初岛向南移动了 13 cm, 向西移动了 6 cm, 10 d 中总计发生了 14 cm 的位移。

2000 年日本建设省国土地理院利用 GPS 成功地进行了火山爆发及其伴随的地壳形变的监测工作, 并成功地预报了火山爆发。3 月 27 日~4 月 14 日在有珠山火山口周围布设了 3 个观测站虹田、伊达和壮敷, 观测了 3 条基线的变化情况(如图 1 所示)。由图 1 可以看出, 两条基线在 3 月 30 日到 31 日间长度有明显的变化, 缩短将近 2 cm。3 月 31 日, 火山喷发。随后基线继续缩短, 速度接近 3 cm/d, 但变化比较均匀, 没有突变现象。4 月 1 日地震发生前没有明显的前兆。由此可知, 目前利用 GPS 技术可以进行火山爆发的预测, 但对于地震, 由于其前兆的复杂性, 还难于做出准确的判断。

(3) 地球自转监测

地球自转的监测是地球动力学研究的主要内容, 20 世纪 70 年代以来, 由于 VLBI、SLR 和 GPS 等技术的发展, 测定地球的自转运动和局部运动的精度已达 cm 量级, 目前 VLBI、SLR 和 GPS 等空间技术的观测精度已达到 mm 级, 从而使地球自转参数的测定提高到一个更高的水平。

GPS 的观测量与 SLR 一样是无方向的, 故不能确定 $UT1$, 而只能确定日长的变化。对于章动也是如此: GPS 测量不能获得黄经和交角章动 (φ, ϵ), 但能得到这些量的时间系数 ($\dot{\varphi}, \dot{\epsilon}$)。Beutler 等人^[3](1999) 利用 3 yr 中每天的 ($\dot{\varphi}, \dot{\epsilon}$) 值, 估算了短周期章动项的章动振幅,

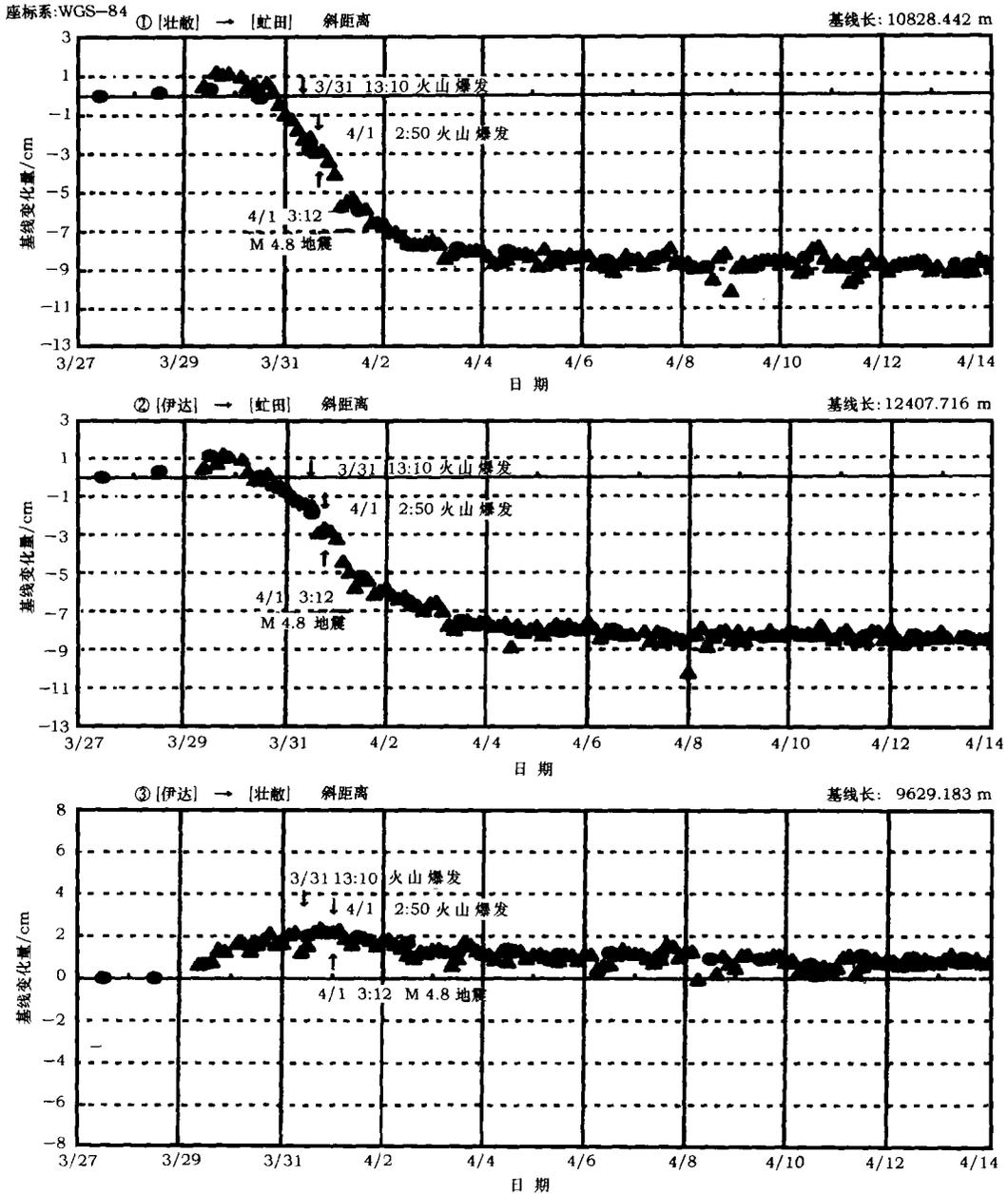


图 1 有珠山火山爆发前后的基线变化情况 (2000 年 3 月 27 日~2000 年 4 月 14 日)

并将其与当今 VLBI 技术所取得的结果进行了比较 (见图 2)。

图 2 中, 3 条水平线是 VLBI 的结果, 两条斜线是 GPS 的结果。其中 GPS 实线代表 Rothacher 等人 [34] (1998) 分析中的误差, GPS 虚线表示采用最新的软件工具对 3 yr 的整个时间序列进行重新处理后对误差的保守估计。图 2 证实了 GPS 定义的惯性架没有长期稳定性, 但是有很好的短期稳定性; 中间的 VLBI 误差线是保守的误差估计, 而较低的一条是相当乐观的 VLBI 误差估计。

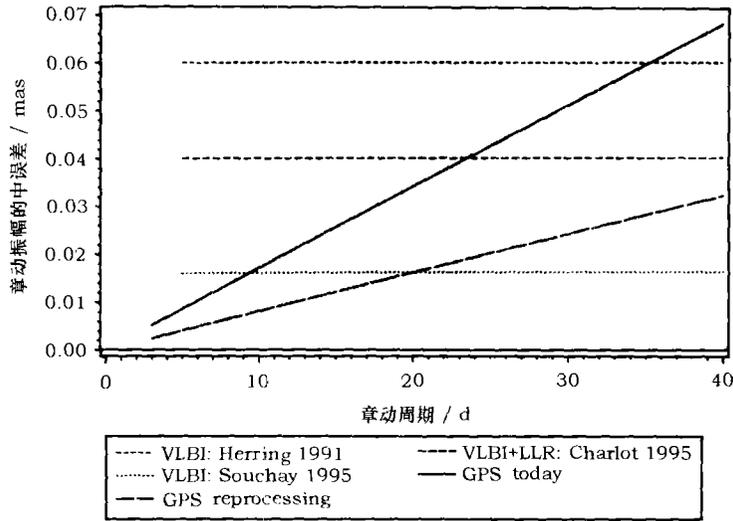


图 2 GPS 和 VLBI 观测的自转周期误差比较 [3]

图 3 是 GPS 章动结果与 IERS1996 模型 (由 VLBI 建立) 的比较。图中的阴影区给出了 GPS 方法的 2σ 误差, 可以说两者的一致性很好, 这些结果引发了研究者对 VLBI 和 GPS 章动序列共同估计的想法。

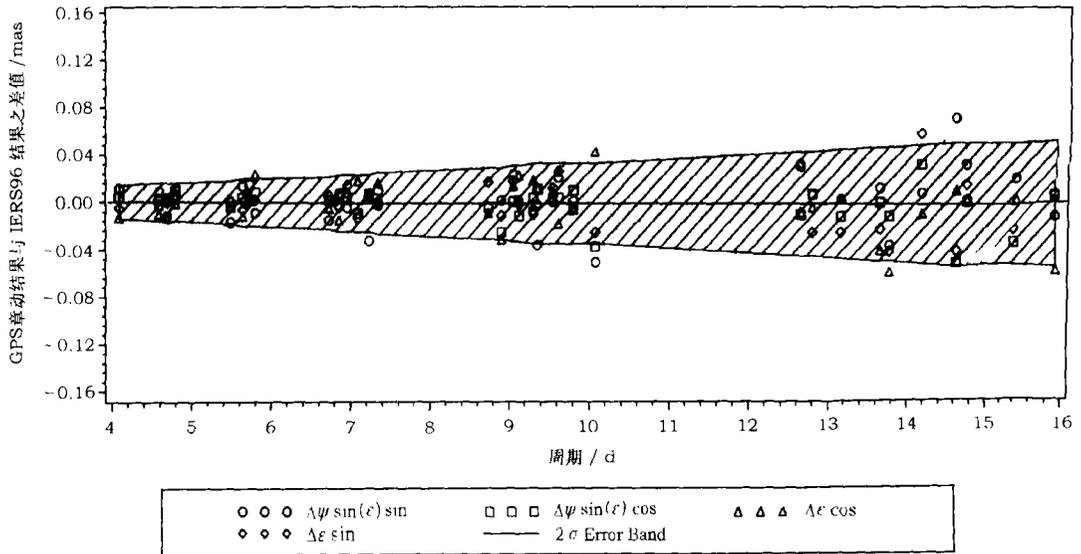
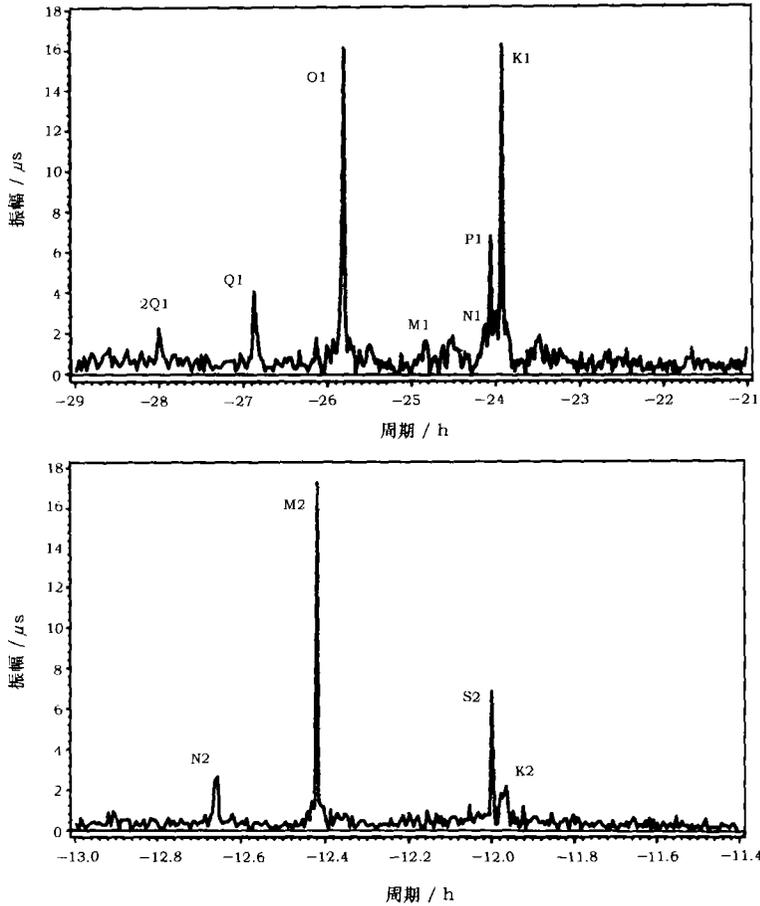


图 3 GPS 章动项与 VLBI 导出的章动序列的比较 [3]

由于 GPS 测定地球自转参数 ERP (极移和 LOD) 高分辨率的特点, 地球自转周日变化成为当前研究的热点问题。利用近 3 年 IGS 的 CODE (Center for Orbit Determination in Europe) 分析中心的高分辨率的 ERP 序列 (采样率为 2 h) 进行谱分析, 得到了极移谱和 LOD 谱, 发现它们在顺行和逆行的周日和半周日谱带中均有尖锐的峰值 (极移谱的逆行周日带是一个例外: 由于它和卫星轨道根数相关, 这些项不能被 GPS 估计)。图 4 给出了相应的 LOD 估

图 4 周日和半周日逆行变化谱^[3]

计结果,从图中可以看到对应于周日和半周日逆行谱带的尖锐峰值。峰值与预期的海洋潮汐的频率有关^[14](图中标出了潮汐波)。

为了进一步说明 GPS 技术在监测 ERP 高频变化中的能力,请看图 5。图 5 中的实线表示由 GPS 实测的极移值(x_p, y_p),虚线表示由海洋潮汐引起的极移的最新模型的计算值^[15]。该模型基于 TOPEX/POSEDON 的测高数据,可能是现在可以得到的最好模型。两者比较,呈现出很好的一致性^[15,16]。

(4) 地球参考架的 IGS 实现

IGS 通过它的 7 个分析中心对国际地球参考架 (ITRF) 的实现做出了重要的贡献。一方面与 VLBI、SLR 技术并置的 GPS 站有效地提高了这些测站坐标和速度的监测精度;另一方面由于 GPS 技术的参与,大大加密了 ITRF 在全球的分布。IGS 现有 600 多个全球分布的 GPS 永久站,进行全天候的连续观测,其中有 200 个基准站连续观测的时间已超过 5 yr,这些站水平位移速度的测定精度已优于 1 mm/yr,垂直方向达 1~2 mm/yr。与 VLBI、SLR 相比,GPS 定位和监测测站位移的精度已优于 SLR,与 VLBI 相当。表 2 给出了上海天文台 (SHAC) GPS、VLBI、SLR 3 个并置站的站坐标和速度与 ITRF2000 最优解的残差^[38]

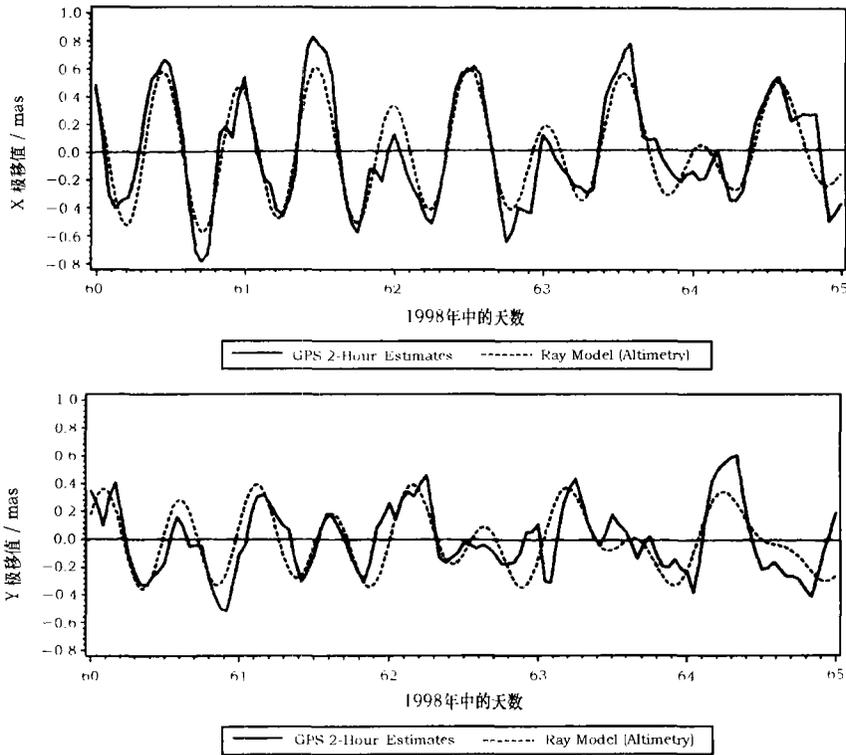


图5 GPS 测量的极移序列和 Topex/Poseidon 测高导出的海潮模型的比较 [3]

表 2 上海天文台 (SHAO) VLBI、SLR、GPS 3 个并置站的站坐标和速度残差比对

点号	技术	分析中心数	位置 /mm			速度 /mm·yr ⁻¹		
			东向	北向	垂向	东向	北向	垂向
S009	VLBI	3	-2.0	2.0	-3.3	-0.4	-0.4	0.0
M002	GPS	5	-0.1	0.0	0.1	0.0	-0.1	-1.5
S001	SLR	7	6.8	2.9	1.6	2.7	-0.3	3.7

IGS 除了 600 多个全球分布的基准站外, 还有诸多个区域性的加密网参与 ITRF 的实现, 较有影响的有南美网 (SAN)、欧洲网 (EVREF)、南极网等。综合全球 7 个 IGS 分析中心和所有区域联合分析中心的结果, IGS 正在给出一个由 GPS 独立建立和维持的 ITRF, 过去 IGS 地球参考架的实现都是基于 ITRF, 对应用 IGS 星历的 GPS 用户必须知道 IGS 星历所属的地球参考架。表 3 给出了近几年 IGS 使用 ITRF 的情况。ITRF 的 IGS 实现 IGS (ITRF**) 选取若干全球分布、建站时间较长、测量精度较高的 IGS 基准站作为参考框架站 (Reference Frame Stations)。利用这些站, 应用 14 个转换参数, 使 IGS 的站坐标和卫星轨道靠到 ITRF 上, 以此维持 ITRF 的 IGS 实现。表 3 给出了 IGS 自成立以来所用的地球参考架 IGS (ITRF**) 的日期和所选参考框架站的个数 [17,18]。

从 IGS (ITRF92) 到 IGS (ITRF94) 仅选用了 13 个参考框架站, 而没有一个站是在我国及

周边地区的, 但从 IGS (ITRF96) 到 IGS (ITRF2000) 就有 5 个参考框架站位于我国及周边地区, 即我国的拉萨 (LHAS) 和台北 (TAIW)、俄罗斯的伊尔库兹克 (IRKT)、乌兹别克的吉塔勃 (KIT3)、日本的筑波 (TSKB)。

表 3 IGS 所用的地球参考架 IGS (ITRF**) 的日期和所选参考框架站的个数^[17]

ITRF	应用日期	参考框架站数
1992	1994-01-02~1994-12-31	13
1993	1995-01-01~1996-06-29	13
1994	1996-06-30~1998-02-28	13
1996	1998-03-01~1999-07-31	47
1997	1999-08-01~2001-06-30	51
2000	2001-06-01~	55

为了研究各 IGS (ITRF**) 地球参考架之间的相互关系和保证各个不同时期 GPS 测地参考架的统一, 可利用 IGS (ITRF**) 之间公共参考站的站坐标和速度进行 14 个参数的坐标转换。表 4 给出了不同 IGS (ITRF**) 之间的 14 个转换参数。

表 4 IGS (ITRF**) 之间的转换^[17]

ITRF 的 起止时间	历元	T_1 /mm /mm·yr ⁻¹	T_2 /mm /mm·yr ⁻¹	T_3 /mm /mm·yr ⁻¹	D /ppb /ppb·yr ⁻¹	R_1 /mas /mas·yr ⁻¹	R_2 /mas /mas·yr ⁻¹	R_3 /mas /mas·yr ⁻¹
1992~1993	1995.0	20	8	3	-0.1	1.66	0.68	0.55
		2.3	0.4	-0.8	0.11	0.12	0.15	-0.04
1993~1994	1996.5	-2.1	-1	1	-0.2	-1.27	-0.87	-0.54
		-2.7	0	2.0	-0.09	-0.13	-0.20	0.04
1994~1996	1998.1	0	-1	1	-0.4	-0.21	-0.01	-0.22
		0.2	-0.9	0.2	-0.07	-0.02	0.01	0.01
1996~1997	1999.5	-0.3	-0.5	14.7	-1.430	-0.159	0.263	0.060
		0.7	-0.1	1.9	-0.043	-0.013	0.015	-0.003
1997~2000	2001.5	-4.7±0.5	-2.8±0.6	+25.6±0.8	-1.48±0.09	-0.030±0.025	-0.030±0.021	-0.140±0.021
		+0.4±0.3	+0.8±0.3	+1.6±0.4	+0.003±0.012	+0.003±0.012	-0.001±0.011	-0.030±0.011

表 4 最后一行给出了在历元 2001 年 7 月 1 日从 IGS (ITRF97) 到 IGS (ITRF2000) 参考架转换的 14 个转换参数及其形式误差 (1σ)。这些结果与 ITRF97 到 ITRF2000 直接转换的结果在 1.2σ 范围内是一致的。

地心的运动 (地球的几何中心相对于地球质量中心的运动) 影响地球参考架的实现。目前 IGS 估算的每周的地心位置主要来自 3 个分析中心 CODE、ESA (European Space Agency) 和 JPL 的结果。从 1998 年 10 月 4 日到 2001 年 5 月 12 日 (GPS 周 0978-1113) 期间的 IGS 地心位置序列在 ITRF97 内 X 、 Y 、 Z 方向的平均偏差分别为 1.6 mm、4.0 mm 和 -17.4 mm; 而在 ITRF2000 内为 5.2 mm、3.9 mm 和 -23.3 mm。

(5) 电离层监测

GPS 技术应用于电离层的监测是从 20 世纪 90 年代开始的, IGS 从 1998 年开始向用户提供全球电子含量图和 GPS 卫星讯号的差分码偏差 (differential code biases-DCBS), 并建立了独立的 IGS 电离层模型。在全球有多个分析中心可提供电子总量图, 对于北半球, 各个分析中心的结果与 IGS 的平均结果相比, 偏差在 5 TECU 左右; 在赤道和南半球, 由于测站太少, 结果要稍差一些。为此 IGS 提出了一种电离层地图的交换格式 (Ionosphere Map Exchange Format, IONEX-Format), 它的作用是使基于各种理论和技术所获得的电离层地图能在统一规格的基础上进行综合和比较。电离层模型有各不相同的理论基础, 且获取数据来源的技术也不同, 数据的覆盖面也不完整, 所以目前只能将 IGS 和全球各种 TEC (Total Electron Content) 图以及 GPS 卫星讯号的差分码偏差以 IONEX 形式提供给全世界用户, 然后再通过比较, 逐步联合起来。

目前几种常用的电离层模型有:

1) Bent 模型, 用来计算从 0~1000 km 之间的电离层剖面上的电子含量, 进而求出导航定位中所需的全部参数;

2) Klobuchar 模型, 在 Bent 模型基础上发展起来的一种供单频 GPS 接收机用户使用的经验模型。它把夜间的电离层时延定为 5 ns, 而白天的电离层时延量是在此常数项上加上一个由此模型 8 个参数确定的余弦函数项;

3) IRI (International Reference Ionosphere) 模型, 提供每月的电子密度和离子密度以及电子和离子密度的剖面图;

4) VTEC (Vertical Total Electron Content) 模型, 可以由 GPS 实测数据确定, 与特定时段和区域内电离层中电子含量比较接近的一种实测模型。它与 Klobuchar 模型一样, 基于 SLM (Single Layer Model) 假设。建立这种模型时并不要求对电离层的变化规律有透彻的了解。此模型已能够反应出时间尺度较长的一些电离层变化。

因为影响电离层折射的因素很多, 无法建立严格准确的数学模型。如果模型与实际情况有一定差异, 对于模型改正正在个别情况下会出现采用模型改正还不如不改正的现象。因此, 改正模型应视具体情况而定。

目前通过监测电离层, 主要可以进行以下几方面的研究工作。

1) 太阳耀斑监测: 电离层的状态从根本上说是受太阳活动控制的, 其表现有好几个周期分量的叠加, 即 11 yr 的太阳黑子活动周期、季节和日际的变化周期。除了这些带有周期性的变化之外, 还有强烈的无规律变化和与地磁暴有关的局部扰动。监测电离层电子密度变化的观测方法主要有基于信标卫星的法拉第旋转法、地面上的非干涉散射雷达测量和频移法。

2) 电离层磁暴和低潮监测: 太阳耀斑到达地球表面引起的地球磁场的急剧变化称为磁暴。高能质子沿地球磁场落到高纬度地区, 同自然大气相互作用产生离子, 导致发生红、绿光。同时这些质子也产生电子和强大的电磁场反应, 导致电离层总电子含量的急剧变化, 而 GPS 监测的总电子含量可以反映这种变化。

3) 监测电离层的不规则活动: 电离层的活动是 GPS 测量中失锁和周跳的主要误差源, 通过全球 GPS 监测电离层 TEC 的变化, 可研究电离层的活动规律。

4) 电离层的 Tomography 技术应用: 电离层各层, D、E、F1、F2 和 H 层的主要特性不同, 且对 GPS 定位的影响也不同, 通过层析技术 Tomography 可研究电离层的电子含量分

布情况。

目前影响基于 GPS 的全球电离层 TEC 监测精度和可靠性的关键因素是

1) 电离层 TEC 的拟合模型: 由于电离层 TEC 昼夜变化甚大, 目前常用的球谐函数拟合模型不能反映全球电离层 TEC 随时间的变化特征, 有必要寻求一个四维的拟合模型来可靠地反映全球电离层 TEC 的变化信息。

2) GPS 观测的空间分布: 以地基 GPS 基准站为例, 从理论上讲全球 80 个基准站可以较好地模拟全球电离层 TEC 的信息, 但实际上全球 IGS 站分布极不均匀, 在大洋和南半球甚为稀疏, 致使利用 GPS 资料建立全球电离层模型的精度和可靠性受到很大的限制。

3) 电离层“单层假说”: 地基 GPS 监测到的是整层电离层的 TEC 信息, 因此在处理中总假设电离层的自由电子集中分布于 TEC 最密集的薄球层内, 即“单层假说”。由于薄球层的高度与 TEC 和 VTEC (Vertical TEC) 之间的投影函数的选择密切相关, 薄球层的高度选择对 TEC 计算的影响甚大。目前 IGS 建议在全球范围内统一取 450 km 作为电离层薄层高度。然而由于电离层 TEC 最密集区域的高度呈现很大的局部特性, 且在全球范围内的变化甚为复杂, 因此为了提高全球电离层 TEC 的监测精度, 必须根据不同区域的电离层局部特性选择不同的电离层薄层高度, 但目前尚难做到这一点。

CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload) 等 LEO 卫星和 COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) 的 LEO 星座系统的 GPS 掩星数据所获得的全球覆盖、垂直分辨率高的 TEC 变化信息, 加上地基 GPS 电离层监测系统所给出的 TEC 图像, 有望建立时空分辨率较高的四维电离层 TEC 变化图像, 有利于对电离层电子时空结构的监测、研究和应用取得重要突破^[19~22]。

(6) 对流层监测和天气预报

1992 年 Bevis 等人第一次提出把 GPS 用于气象研究。地面 GPS 探测大气的原理也就是通过 GPS 数据处理获得总天顶延迟, 再用地面气压资料得到天顶干延迟, 从而获得天顶湿延迟 ZWD, 将其转换为大气可降水量 PWV (Precipitable Water Vapor) 的垂直积分。地面 GPS 网可提供几乎连续的 (30 min 甚至更短)、高精度的 (1~2 mm)、近实时的、高地面覆盖率的 PWV 序列。

从 20 世纪 90 年代起, 美国首先进行了一系列的地面 GPS 监测大气的实验和研究, 如有名的“GPS/STORM”和“CLAM (Clandestine Littoral Acoustic Mapper)”等。1993 年 Yuan 等利用美国国家大气研究中心 (NCAR) 的公共气候模型 (CCM) 生成的模拟大气数据, 来测试 GPS 用于探测全球和区域性气候变化的可行性, 考察 GPS 基本测量变量 (湿延迟和可降水量等) 是如何随 CO₂ 含量的倍增变化的。由于 CO₂ 倍增的模型中具有较高的水汽含量, 使得热带和中纬度地区的湿延迟和可降水汽量明显增加。变热信号最大可达 40 mm, 天顶湿延迟 ZWD 的误差约为 10 mm, 即信噪比约为 4。这说明可降水汽量 PWV 和 ZWD 对气候变化颇具敏感性。此模拟实验为地面 GPS 探测气候变化奠定了坚实的基础, 同时印证了地面 GPS 网探测气候变化的可能性。随后, 其它国家如德国、日本等, 也都开始重视 GPS 气象学, 他们成功地组织了数次较大规模的实验观测, 获得了一系列研究成果, 并已经将它们应用于气象服务中。我国 1997 年首次成功地完成了 GPS 气象学实验和上海地区 GPS/STORM 实验, 目前由上海天文台牵头的上海地区 GPS 综合应用网已初步建成, 其中一项重要的应用就是 GPS

气象学。IGS 成立了由德国地学研究中心 GFZ 的 Gendt 任组长的对流层计划 (Troposphere Project) 工作组, 目前 GFZ 利用全球分布的 100 多个 IGS 站的测量资料给出全球 PWV 的连续变化图像 (采样率为 2 h)。由 GPS 测得的 PWV 与水汽辐射计 WVR 的结果相比一致性优于 1 mm。

GPS 气象学包括 GPS 无线电掩星技术和地面 GPS 探测大气两大技术, 星基或空基 GPS 掩星的原理是将 GPS 接收机放在某一低轨卫星 (LEO) 或飞行器的平台上, 该 GPS 接收机一方面起到对该卫星 (或飞行器) 精确定轨的作用, 同时又应用 GPS 掩星技术起到大气探测器的作用, 利用卫星信号在穿透地球大气层时的延迟或多普勒测量, 求出测点上空大气层的温度、压力和湿度的分层结构。

1995 年 4 月由美国 UCAR (University Corporation for Atmosphere Research) 主持的 GPS/MET 项目正式启动, 发射了一颗低轨 (LEO) 卫星 Microlab-1 (轨道高度约为 750 km), 每天可观测到 200 多个下降的掩星过程。对 GPS/MET (Meteorology) 数据处理的结果表明, GPS 掩星观测可获得 5 到 45 km 高度范围内温度及气压的垂直分布, 高度的分辨率为 200~500 m, 温度反演精度为 1~2 K, 证实了通过 LEO 卫星的 GPS 掩星技术可以精确地测定对流层顶和锋面的垂直结构。研究还表明: 如果 5 km 以下温度垂直分布可由其它方法独立确定, 而且温度的精度优于 2 K, 则可由 LEO 卫星测定的折射率分布进一步确定 5 km 以下大气层的水汽压垂直分布^[23]。GPS 掩星技术由于其覆盖面广、垂直分辨率高、全天候和数据获取速度快的优点, 对提高数值天气预报水平和开展天气系统的研究具有很大的潜力^[24]。另外, 对 GPS/MET 数据的同化研究表明, GPS 掩星技术能显著地提高全球和区域性天气预报分析的精度^[25]。而且由该技术获取的对流层区域温度信息及垂直分辨率使气象工作者可以对整个对流层的温度梯度作更详细的研究, 从而掌握未来几十年里全球大气辐射变化的信息, 以监测气候变化和环境迁移的趋势。

近几年已发射和将发射的一系列 LEO 卫星有 OERSTEDT、CHAMP、SAC-C (Satelite de Aplicaciones Cientificas-C)、GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) 等, 这些卫星的 GPS 掩星资料加上地基 GPS 资料将能给出一个全球尺度的电离层 TEC 和对流层水汽量连续变化的四维图像。德国地学研究中心 (GFZ) 的 CHAMP 卫星于 2000 年 7 月 15 日升空, 它是一颗近圆形的极轨道卫星, 轨道高度 454 km^[26]。CHAMP 卫星的 GPS 掩星每天可提供约 230 次利用掩星数据所获得的分布全球的干湿垂直廓线, 与欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 提供的相应全球气象分析结果进行比对, 温度的偏差在对流层顶之上小于 1 K; 在纬度大于 30° 的地区, 地表以上处于 12~20 km 之间的偏差甚至低于 0.5 K^[27]。这表明由于星载 GPS 接收机性能的提高, 得到的地球表面的大气参数廓线比 GPS/MET 试验有显著的提高。

继单频 LEO 卫星进行 GPS 掩星探测大气应用研究实验后, 中国台湾的太空计划署与美国的 UCAR、JPL 和海军研究实验室等进行合作, 推出了 COSMIC 星座计划, 该计划将在 2005 年发射 6 颗 LEO 卫星, 形成 LEO 卫星星座。预计每颗 LEO 卫星能得到 500 个大气剖面观测数, 整个星座每天可产生全天候、覆盖全球的 3000 多次掩星事件, 这将有力地增强目前的全球观测系统, 展现出利用 GPS 掩星技术监测全球气象变化的巨大前景^[28]。

(7) 时频传递

1998 年, IGS 开始利用 GPS 相位和码观测来进行时间和频率比对研究, 它的主要目的在于开发和利用 GPS 观测值, 提高进行精确时频比对的可能性。IGS 有全球的 GPS 跟踪站网、连续运行的大地测量标准、双频接收机、有效的数据传输系统、数据分析中心、数据处理方法及其产品。而 BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) 和时间实验室则致力于研究高精度的度量衡标准、单位和时间校准方法、维持稳定时间比例的算法, 以及 UTC 的构成和分发^[29,30]。

目前这方面的主要研究工作如下:

1) 配置 GPS 接收机: IGS 的跟踪网目前有 200 多个全球分布的、永久性连续跟踪站。在这些站中, 有 38 个站用氢钟作为外部频标, 23 个站用铯钟, 17 个站用铷钟, 其余站用的是内置的晶体振荡器;

2) GPS 数据分析: IGS 的分析中心大部分都提供星钟和站钟估计值。目前 IGS 正在它的产品中增加组合的接收机钟参数和卫星钟参数;

3) 仪器延迟: 目前正在发展一种测量接收机内部时钟和外部频标偏差的技术。当 IGS 的观测站能够进行时间比对工作时, IGS 的产品中就可以直接包含 UTC 和时钟的比对结果, 这是 IGS/BIPM 计划面临的最大挑战;

4) 比对实验: 正在进行的几项控制实验均是利用同时的、独立的技术比较大地测量时间结果。然而, 如果能尽可能地减小环境引起的变化, 高精度的频率比对就可行了。

专用的 GPS 授时接收机已经用了很长时间, 这些接收机是单频 (L1) C/A 码接收机, 可以以 1 ms 的精度提供即时的精密时间测量。这些接收机可以用于共视模式, 同时观测同一颗卫星, 并且参照接收机组的观测资料的差值进行分析。在这种模式下, 精度受到以下因素的限制: C/A 码的噪音、差分电离层折射、站坐标的精度、广播星历的误差。

在这个实验性的计划中涉及到许多技术问题, 包括时间传输终端电缆延迟的精密测量等。有一点是值得提的, 即用于时间传输的测地型接收机允许使用接收机内部时钟 (接收机内部时钟对观测进行时间标记), 另外内部接收机时钟对于相位和码观测量必须是一致的。希望能够获得远远低于 ns 级的 (理想情况下几十微微秒)、高度有效的和非常精确的时间传输, 并且希望频率传输在本质上只受到相位观测量噪音的限制。而且, “时间测量网”适当地并入 IGS 网也是研究的一个重要方面^[1]。

4 GPS 存在的问题

在以前的国际地球参考架 (ITRF94、ITRF96 和 ITRF97) 的建立和维持中, GPS 与 VLBI、SLR 一样均作为 ITRF 定义的基准技术, 如 ITRF97 所定义的地球参考框架的原点是由 SLR 和 GPS 各分析中心解算结果的加权平均得到的 (VLBI 技术不能定义地球参考架的原点), 地球参考架的尺度因子及其变化速率是由 VLBI、SLR 和 GPS 的各分析中心解算结果的加权平均得到的, 但在最新的国际地球参考架 ITRF2000 中, 尽管全球 GPS 测站的数量大大增加, 站坐标和速度的测定精度有了显著的提高, ITRF2000 所定义的地球参考架的原点和尺度因子却去除了 GPS 技术的作用, GPS 已不再作为 ITRF 定义的基准技术, 其原因来自 GPS 技术本身存在的问题^[31~33]。

(1) 尺度上可能存在的问题

有两颗 GPS 卫星 (PRN5 和 PRN6) 装有激光反射镜, 可同时进行 SLR 和 GPS 观测, 为了进行两种技术在尺度上的比对, 1999 年 Springer 等人选用了全球最好的 25 个 SLR 站, 将这两颗卫星连续 4 yr 多 (从 1995 年 1 月到 1999 年 7 月) 的 SLR 观测结果, 与 GPS 的计算结果进行了比对, 计算值中 SLR 站的坐标选自 ITRF97, GPS 卫星的轨道取自 IGS 的精密星历, 图 6 给出了两者的比对结果。从图中可以看出 SLR 的观测值与 GPS 的计算值之间有一个平均为 -5.5 cm 的系统偏差, 负号表示 SLR 的观测值比 GPS 计算值小。值得注意的是, 一个量级相当符号相同的偏差 (-3.9 cm) 也出现在对 GLONASS 卫星的 SLR 观测结果中。这些结果意味着两种独立的观测技术: 微波和激光之间存在着一个尺度的系统偏差^[34]。

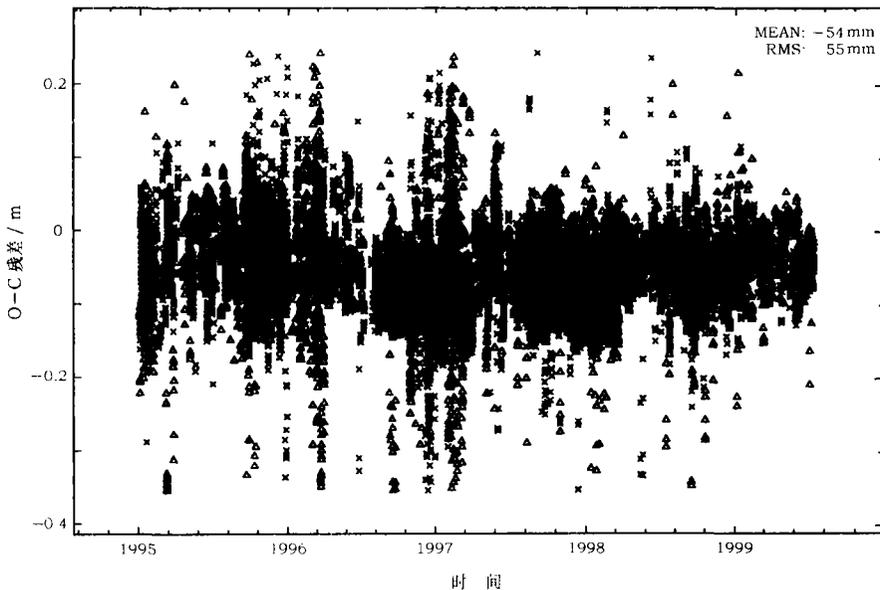


图 6 SLR 观测值和 GPS 计算结果的比对^[34]

(2) 天线相位中心存在的问题

卫星天线相位中心偏差的不确定性, 是精密的 GPS 测地应用中难于解决的重要问题, 根据已有的估计, 卫星天线相位中心的径向偏差 (指向地心, Z 轴方向) 与原来设计的标准偏差之差对 Block II 和 Block II A 型卫星达几个分米, 对 Block II R 卫星 (PRN13 卫星) 竟达 1 m 多 (简直不可思议)。目前 IGS 的几个分析中心 CODE、GFZ 和 JPL, 对每个天线相位中心的偏差进行了估计。图 7 标出了 GFZ 从 1998 年第 145 天到 365 天, 每 5 d 一个间隔所估算的 3 个轨道面上 14 颗 GPS 卫星天线相位中心的偏差^[35]。从图中可看出, 除了 PRN13 卫星与其它卫星之间的天线相位中心有 1 m 多的较大系统偏差外, 其他各个卫星之间也存在着 dm 级的系统偏差。而且每颗卫星的天线相位中心的位置 (在星固坐标系中) 都是在变化的, 变化值可达 10 cm 量级。应该指出, 卫星天线相位中心的可测性是颇低的, 一方面是由于天线一直对向地心, 卫星-接收机矢量与卫星-地心矢量间的“观测角”最大时仅为 14° , 这意味着 Z 偏差的大部分表现为一个距离偏差, 它可能被整周模糊度或星钟的偏差所吸收, 并在

双差观测中被消除；另一方面卫星天线相位偏差的确定与对流层天顶延迟和地球参考尺度的估算是高度相关的，因此卫星天线相位中心偏差并不是很容易得到的，对它的精密估算也是相当困难的。

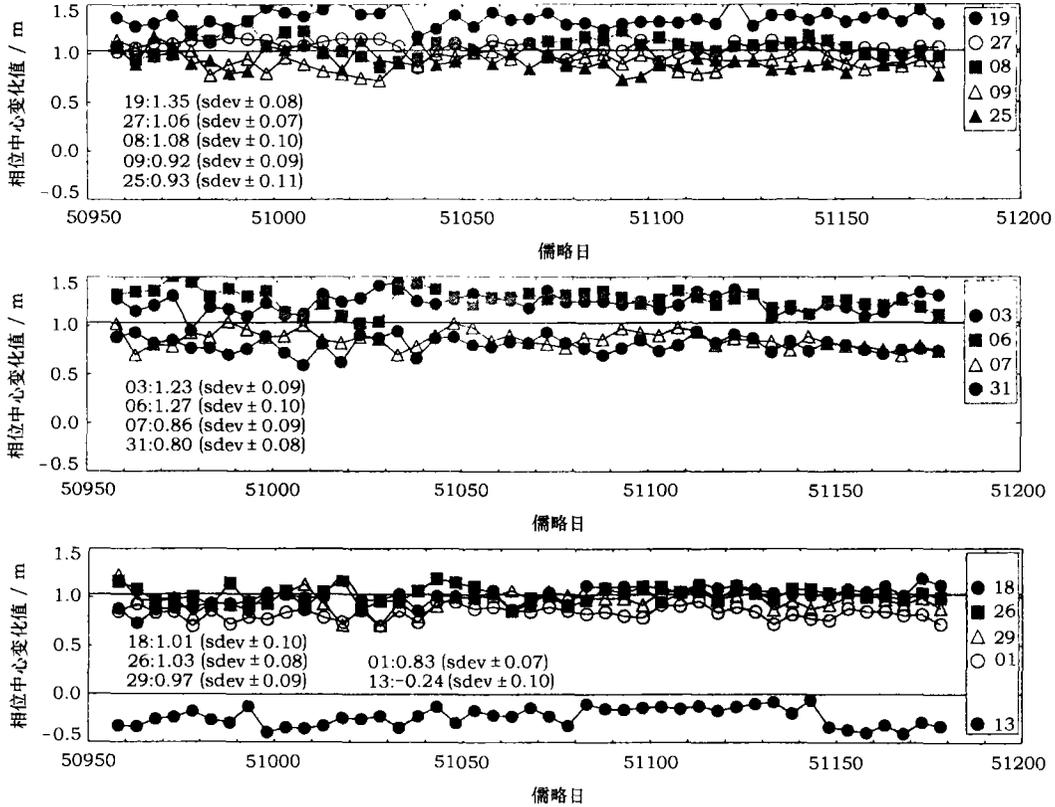


图 7 卫星天线相位中心偏差 [34]

卫星天线相位中心偏差的这种不确定性，对全球解的轨道和测站坐标的影响并不灵敏，而对星钟解的影响却十分灵敏，因此若要作为地球参考架定义的基准，GPS 技术显然是不行的。

另外接收机天线相位中心也存在一定的问题，根据 Hatamaka 等人 [36] 的研究发现，GPS 坐标解序列中出现的季节性变化与接收机天线相位中心模型有一定的关系，相位中心模型误差将使测站位置季节性变化振幅增大几个毫米。

(3) 可能存在的周年效应

最近几年由于全球 GPS 台站连续观测资料的长期积累，已从站坐标的连续变化序列中很好地分离出测站坐标 (特别是垂直方向) 的周年变化信息，许多学者对 GPS 确定的站坐标垂直方向的周年变化产生的机制进行了地球物理过程的探讨，研究了大气、海洋、积雪、地表水的负荷变化对测站垂直方向周年变化的影响 [10,11]，但尚未给出令人满意的解释。而且对一些 VLBI 和 GPS 的并置台站，由 VLBI 研究的高程的周年变化结果与 GPS 的结果并不完全一致，其中有些台站差异明显，这不得不令人注意到 GPS 技术本身可能存在的周年效应，已发

现的周年效应如下:

1) GPS 卫星辐射压摄动的周年效应: 太阳辐射压摄动是 GPS 卫星定轨的主要误差源, 它主要来自 GPS 卫星太阳翼板的指向误差 (设计时太阳翼板应朝向太阳), 这个指向误差显然有一个周年周期;

2) 测站与 GPS 星座配置的周年效应: 由于 GPS 卫星的运行周期是半个恒星日 (11 h 58 min), 对同一测站而言每天早 4 min 回到前一天测站与 GPS 星座同样的几何配置, 这就使测站与卫星星座的几何配置有一个周年周期的变化, 而 GPS 的多路径效应强烈地依赖于这个几何配置;

3) 如前所述, 已发现接收机天线相位中心的偏差可能存在振幅达几个毫米的周年变化。

解决上述问题的最好办法就是把 GPS 结果与其他测地技术的结果进行比较。当然, 不同 IGS 分析中心进行比较也有可能得出一些结论, 但在很多情况下 GPS 的时间序列都非常一致, 只有 IGS 站较少的地方例外。显然, 比较 IGS 和 IVS 的结果将有助于解决 GPS 技术可能存在的周年效应^[3]。

参 考 文 献

- 1 Hatch R. GPS Solutions, 2000, 3(4): 1
- 2 Hay C. GPS world, 2000, 11(6): 56
- 3 Beutler G, Rothacher M, Springer T et al. In: Gowey K, Neilan R, Moore A eds. IGS Directory 1999, California: JPL, 2000: xxiii~xiv
- 4 Willis P, Beutler G, Gurtner W et al. Advances in Space Research, 1999, 23(4): 659
- 5 Weber R, Slater J A. GPS Solutions, 2001, 4(4): 61
- 6 Weber R, Springer T. In: IGS Central Bureau eds. IGS 2000 Annual Report, Pasadena: JPL, 2002: 14
- 7 Zhu Wenyao, Wang Xiaoya, Cheng Zongyi et al. Science in China (Series D), 2000, 43(4): 394
- 8 Wang Qi, Zhang Peizhen, Freymuller J T. Science, 2001, 294: 574
- 9 Gross S, Larson K. Eos Trans. AGU, 1998, 79: F182
- 10 Dong D N, Fang P, Book Y et al. JGR, 2002, 107(B4): ETQ9-1
- 11 Zhu Wenyao, FuYang, Li Yan. Science in China (Series D), 2003, 33(3), 待发表
- 12 东京大学地震研究所要览 2001~2002, 东京: 东京大学地震研究所, 2001: 44~59
- 13 Kato T, Kotore Y, Nakao S et al. GRL, 1998, 25(3): 369
- 14 Rothacher M. Habilitationsschrift der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, Bern: Druckerei der Universität Bern, 1998: 73
- 15 Ray R D, Steinberg D J, Chao B F et al. Science, 1994, 264: 830
- 16 Salstein D A. In: IERS Central Bureau eds. 1996 IERS Annual Report, Frankfurt: IERS Central Bureau, 1997: I-57
- 17 Ferland R. In: IGS Central Bureau eds. IGS 1999 Technical Reports, Pasadena: JPL, 2000: 387
- 18 Ferland R. In: IGS Central Bureau eds. IGS 1998 Annual Report, Pasadena: JPL, 1999: 24
- 19 Feltens J, Schaer S. In: Dow J M, Kouba J, Springer T eds. Proc. of the 1998 IGS Analysis Center Workshop, Germany: Darmstadt, 1998: 225
- 20 Mannucci A J B, Wilson D, Yuan D N. In: International Union of Radio Scientists (URSI) Commission eds. Proc. of the Beacon Satellite Symposium, Wales: Aberystwyth, 1994: 483
- 21 Schaer S, Gurtner W, Rothacher M. In: Dow J M, Kouba J, Springer T eds. Proc. of the 1998 IGS Analysis Center Workshop, Germany: Darmstadt, 1998 (c): 307
- 22 Schaer S, Gurtner W, Feltens J. In: Dow J M, Kouba J, Springer T eds. Proc. of the 1998 IGS Analysis Center Workshop, Germany: Darmstadt, 1998 (e): 233

- 23 陈世范. 气象学报, 1999, 57(2): 242
- 24 Kutsinski E R, Hajj G A, Sofield J T *et al.* JGR, 1997, 102: 23429
- 25 Kuo Y H, Sokolovsky S V, Anthes R A *et al.* Terrestrial, Atmosphere and Oceanic Science, 2000, 11: 157
- 26 http://op.gfz-potsdam.de/champ/more/newsletter_CHAMP_003.html
- 27 Wickert J, Galas R, König R *et al.* Phys. Chem. Earth (A), 2001, 26: 503
- 28 Fang P, Geudt G, Springer T *et al.* GPS Solution, 2001, 4(4): 2
- 29 Ray J, Arias F, Petit G *et al.* GPS Solution, 2001, 4(4): 47
- 30 Ray J, Petit G. In: IGS Central Bureau eds. IGS 1999 Technical Reports, Pasadena: JPL, 2000: 427
- 31 Springer T A. In: Vandenberg N R, Baver K D eds. IVS 2000 General Meeting Proceedings, Germany: Kötzing, 2000: 296
- 32 Springer T A. PhD thesis, Berne: Astronomical Institute, University of Berne, 1999: 3~12
- 33 Altamimi Z. In: IGS Central Bureau eds. IGS 2000 Annual Report, Pasadena: JPL, 2002: 22
- 34 Rothacher M, Springer T, Bentler G *et al.* In: IGS Central Bureau eds. IGS 1998 Technical Reports, Pasadena: JPL, 1999: 61
- 35 Gendt G, Dick G, Sohn W. In: IGS Central Bureau eds. IGS 1998 Technical Reports, Pasadena: JPL, 1999: 79
- 36 Hatamaka Y, Sawada M, Horica A *et al.* Earth Planets and Space, 2001, 53(1): 23
- 37 <http://igscb.jpl.nasa.gov>
- 38 <http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/ITRF2000-CODE/Valsit/21605.i.gif>

Recent Progress of GPS in Geodynamics

Song Shuli Zhu Wenyao Liao Xinhao

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract

In this paper, the modernization of GPS and the update research results of IGS (International GPS Service) are introduced. The main contents include the realization and maintenance of ITRF (International Terrestrial Reference Frame), the monitoring of the solid earth, earth orientation, crustal motion and sea level, the determination of scientific satellite orbit, and the application of GPS in atmosphere research and weather forecast. The main problems in GPS technology including the system bias to SLR, its own annual variety and the change of GPS satellite antenna phase center are also discussed.

Key words astrometry—GPS—review—crustal movement—earth rotation—ITRF—atmosphere monitoring