

GPS 在测定地球自转参数等方面的应用

王解先

(同济大学, 上海 200092)

何妙福 朱文耀 黄 斌

(中国科学院上海天文台, 上海 200030)

提 要

本文介绍了近年来全球定位系统 (GPS) 在地球动力学和地球自转服务等领域中的广泛应用, 并给出了两次 GPS 联测 GIG'91 和 IGS'92 在高精度高分辨率的地球自转参数、高精度的全球尺度基线长度和地心坐标的测定中取得的令人瞩目的成果。本文还简要地叙述了 GPS 高精度测量中存在的一些主要问题。

一、GPS 系统的发展

GPS 系统是 1973 年开始筹建的, 1978 年发射了第一颗卫星, 至 1988 年共发射了 10 颗 block I 试验卫星, 目前仍有 4 颗运行正常 (PRN3, 11, 12, 13); 1989 年 2 月至 1992 年 8 月共发射了 14 颗 block II 卫星 (PRN2, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 28), 并正以每年 5 颗的速度发射, 直至系统全面建成 (21 + 3 颗)^[2]。block II 卫星装有两台铯钟, 两台铷钟, 可存贮 180 天信息, 全部实行选择使用 “SA” (Selective Availability) 和精码可改 “A-S” (Anti-Spoofing) 政策, 并自动检测出错。

系统建成后将发射 block II R 卫星以更新 block II 卫星。它能对其他卫星测距, 从而改正自身的导航信息; 能自动控制位置, 发布低频导航信息; 能存贮 360 天的信息。目前已发射了用于这些方面试验的卫星 (PRN 23, 24, 25, 26, 28)。

目前 GPS 系统由美国本土的五个站监控, 每星期更新一次卫星信息, 在测地应用方面的接收机和软件层出不穷。

二、GPS 在测定地球自转参数方面的应用

VLBI 和 SLR 技术的发展使地球自转参数的高精度实测成为可能, 目前用这些技术测定地球自转参数的内部符合精度达到了 3mm, 外部符合精度为 3cm^[5]。但由于 VLBI, SLR 等技术设备大而昂贵, 且不便流动, 通常只能在 1 天以上的时间内给出 1 个解。

近些年地球自转参数的研究重点已从提高观测精度转向了提高时间分辨率^[6]。GPS 技术设备小而便宜, 便于流动, 数据密集。因此, 从 80 年代后期, 人们开始探讨 GPS 用于地球自转参数测定的可能性。

第一次用于论证 GPS 可否测定地球自转参数的实验在 1987 年进行^[5], 尽管实验结果不

理想,但却表明,如果提高轨道精度,则 GPS 完全可以用于地球自转参数的测定,当时主要是因为 Y 轴偏差未引起注意。1988 年 9 月进行了为期 1 个月的观测 (GOTEX 网),由于接收机性能不好(后来采用较多的 ROGUE 接收机当时尚未出现),故结果仍不理想,但更增强了人们对 GPS 测定地球自转参数的信心。

IUGG 在 1991 年 1 月 22 日—1991 年 2 月 13 日组织了全球 120 个站进行了名为 GIG'91 的 GPS 国际地球自转服务和地球动力学试验,其中有 80 个站与 VLBI、SLR、PRARE 或 DORIS 站并置。

此次实验取得了极大的成功,全球有多家研究单位给出了令人满意的结果:

1. 美国麻省理工学院是最早给出地球自转参数解的单位^[5],他们选择了全球分布的 20 个 ROGUE 接收机站,先用 GAMIT 软件解出单天解的基线和协方差,然后用 GLOBK 综合每个单天解信息,用滤波方法解出地球自转参数,第一天的值固定为 IERS 公报值。

若 8 天共用同一轨道,则去掉由坐标系引起的系统差 1mas 后与 IERS 公报平滑值相比, x_p 、 y_p 的中误差分别为 0.9mas, 0.6mas, UT1R-AT 的中误差为 0.12ms。

若轨道取为 1 天弧段,并看作随机过程,则 x_p 、 y_p 的中误差分别为 0.4mas, 0.4mas, UT1R-AT 的中误差为 0.19ms。

2. 美国喷气推进实验室(JPL)的 Lindquister^[7]选取了全球分布的 10—12 个站(每个半球不少于 5 个站)用 GIPSY 软件单天解得的 x_p 、 y_p 与 VLBI、SLR 的结果相比,中误差均为 0.5mas。

3. JPL 的 Lichten^[8]用 GIPSY 软件几小时数据解出的 x_p 、 y_p 与 VLBI、SLR 结果相比,中误差均为 0.7mas, UT1-UTC 的中误差为 0.03ms。

4. 美国 Texas 大学的 Schutz^[9]选用全球分布的 21 个站(多种仪器),采用 TEXGAP 软件单天解得的 x_p 、 y_p 与 VLBI、SLR 结果相比,中误差分别为 1.5mas、1.4mas(系统差为 5mas)。

5. 德国的 Gendt^[10]选用全球 21 个 ROGUE 接收机站,采用 GEPARD-6 软件,得出的结果与 IERS 公报相比, x_p 、 y_p 的中误差,2 天解分别为 0.7mas, 0.6mas, 1 天解为 1.0mas, 1.1mas, 8 小时解为 1.7mas, 2.0mas, UT1 的 1 天解为 0.06ms, 8 小时解为 0.11ms。

另外还有一些单位给出了 GIG'91 的结果,精度基本一致,轨道精度为 3m 以下,基线精度为 10^{-8} — 10^{-9} ,地球自转参数测定的精度为 3cm 左右 (1mas),与 VLBI、SLR 技术的精度相当,从而论证了 GPS 测定地球自转参数的可行性。

全球 GPS 跟踪网 CIGNET 自 GIG'91 开始常年观测至今,IGPP 的 Bock^[11]处理了自 1991 年至 1992 年 9 月的 CIGNET 网资料,得出的 x_p 、 y_p 的精度为 1mas。

GIG'91 的成功推动了国际地球动力学服务——IGS (International GPS Geodynamics Service)的建立,IGS 的主要目的是为从事地球动力学研究提供精密星历、地球参考系、地球定向参数、全球和局部的地壳运动信息及其他成果。预期精度为几个 ppb,IGS 由跟踪网、数据中心和数据分析中心等组成。全球 IGS 跟踪网主要由约 80 个核心跟踪站组成,定期加密数百个点作某些区域性研究,如冰后期回跳、地壳形变等。

表 1 IGS'92 各分析中心结果与 EOP(IERS)90C04 的系统差

技术	序	列	$x(0''.001)$	$y(0''.001)$	UT1(0.0001s)	资料数
VLBI	EOP (NOAA)	92 R 01	-0.15+ -0.08	-0.03+ -0.09	0.00+ -0.06	39
VLBI	EOP (NOAA)	92 R 02			0.11+ -0.05	90
VLBI	EOP (USNO)	92 R 03	-0.43+ -0.06	-0.12+ -0.08	0.03+ -0.06	27
LLR	EOP (UTXMO)	92 M 02			-0.91+ -0.29	17
SLR	EOP (CSR)	91 L 01	0.09+ -0.07	0.17+ -0.05	0.10+ -0.09	48
SLR	EOP (DUT)	91 L 02	0.98+ -0.18	-0.84+ -0.21		29
GPS	EOP (CODE)	92 P 04	-0.31+ -0.36	-0.07+ -0.45		122
GPS	EOP (CSR)	92 P 01	-0.18+ -0.37	2.46+ -0.48		69
GPS	EOP (EMR)	92 P 01	-0.44+ -0.45	1.08+ -0.46		44
GPS	EOP (EMR)	92 P 02	0.71+ -0.39	-0.22+ -0.46		8
GPS	EOP (ESOC)	92 P 01	1.01+ -0.38	0.01+ -0.48		112
GPS	EOP (GFZ)	92 P 01	-2.68+ -0.43	-3.29+ -0.56		27
GPS	EOP (GFZ)	92 P 02	+1.68+ -0.36	1.92+ -0.45		68
GPS	EOP (JPL)	92 P 01	-0.19+ -0.38	1.51+ -0.50		28
GPS	EOP (JPL)	92 P 02	0.09+ -0.35	0.14+ -0.45		79
					LOD: 0.16+ -0.15	43
GPS	EOP (SIO)	92 P 03	0.35+ -0.35	1.68+ -0.44		137

表 2 IGS'92 各分析中心结果去掉系统差后与 EOP(IERS)90C04 比较的中误差

技术	序	列	$x_p(0''.001)$	$y_p(0''.001)$	UT1(0.0001s)	资料数
VLBI	EOP (NOAA)	92 R 01	0.47	0.58	0.36	39
VLBI	EOP (NOAA)	92 R 02			0.48	90
VLBI	EOP (USNO)	92 R 03	0.30	0.42	0.29	27
LLR	EOP (UTXMO)	92 M 02			1.18	17
SLR	EOP (CSR)	91 L 01	0.47	0.37	0.62 (1)	48
SLR	EOP (DUT)	91 L 02	0.90	1.08	3.41 (2)	29
GPS	EOP (CODE)	92 P 04	0.83	0.89	0.89 (3)	132
GPS	EOP (CSR)	92 P 01	0.90	1.87	2.73	69
GPS	EOP (EMR)	92 P 01	1.45	0.80		44
GPS	EOP (EMR)	92 P 02	0.49	0.39		8
GPS	EOP (ESOC)	92 P 01	1.29	1.73		112
GPS	EOP (GFZ)	92 P 01	1.35	1.83		27
GPS	EOP (GFZ)	92 P 01	1.04	0.72		76
GPS	EOP (JPL)	92 P 01	0.72	1.31		28
GPS	EOP (JPL)	92 P 02	0.42	0.48		78
					LOD: 0.99	43
GPS	EOP (SIO)	92 P 03	0.67	0.62		137

IGS 在 1992 年 6 月 21 日—1992 年 9 月 22 日组织了第一次联测, 在此期间的 7 月 26 日—8 月 7 日两周时间有多达 600 多个台站参加了加强观测 (EPOCH'92)。

此次联测的最后报告《GPS、SLR 和 VLBI 地球自转参数确定的比较》已于 1992 年 11 月公布^[10], 表 1 为各分析中心的系统差, 表 2 为各分析中心的结果与综合解的中误差。

从表 2 的结果可以看出 GPS 技术测定地球自转参数的精度为 1mas 左右。

三、GPS 在地球参考系建立方面的应用

GPS 全球资料得到的全球尺度上相对于地球参考架 (ITRF) 的三维地心坐标的精度, 已达到了 3cm 的水平 (G.Blewitt, 1991)。因此, GPS 技术在今后建立高精度地球参考系的工作中将发挥重要作用。90 年代国际上将建立一个用于精密测地的国际自然科学基准网络 (FLINN), 由全球均匀分布的 200 个基准站组成, 基于 VLBI, SLR, GPS 三种技术, VLBI 提供一个联接射电源的准惯性天球坐标系, SLR 提供地心位置和连结一个地球引力场, GPS 对此地球参考系起时空的加密作用, 提高分辨率。这个参考系建立后, 测定地球上任何一点的位置用 GPS 一天的观测资料就能达到 1cm 的精度。

与 SLR 相比, GPS 卫星的高度更高, 对地心的敏感性相对要差一些, 但也能确定地心位置。JPL 的 Vigue^[12]对 GIG'91 数据求得地心位置的精度, x, y 分量分别为 5cm, z 分量为 30cm。

四、GPS 在其他测地工作上的应用

1. 目前 GPS 测定基线的精度已达到了 10^{-8} — 10^{-9} 的相对精度^[13], 即在几千公里的尺度上达到了几个厘米的精度, 因而可以用来验证板块运动的模型, 特别是在板块边缘地区及一些缺乏 VLBI、SLR 站的地区, 甚至可以相信将来 GPS 技术测定的基线成果将用于板块运动模型的建立。

2. GPS 在区域性地壳形变方面的应用已取得了不少成果, 日本的 GPS 地震监测网 GPS Japan 自 1989 年开始工作, 曾于 1991 年成功地预报了一次五级地震^[14], 美国加州 pgga 地震监测网由 4 个相距 200km 左右的点组成, 其资料与全球 GPS 网统一解算, 基线精度为毫米级, 当 1992 年该地区发生 5 级地震时, 该网中有一条基线的南北分量出现明显的 4.2cm 的跳跃^[11]。当然, 如何更可靠地根据基线向量的变化累积来预报地震, 还有待于地质学家的分析。

3. 沿海地区 VLBI 与 GPS 的联合观测可用于监测验潮站基底地壳的垂直运动, 从而使真正的海平面上升从潮标观测中分离出来。

4. GPS 系统建成后发射的更新替代卫星, 将具有互相跟踪从而修正自身轨道的能力, 因此一般的卫星上若装载 GPS 接收机, 则能确定其轨道, 从而提高测地能力。

5. 目前 GPS 测定基线需用 1 天以上的观测资料才能达到 10^{-8} — 10^{-9} 的相对精度, 但当上面所述的 FLINN 网建成后, 1 个小时的 GPS 观测资料就能得到 10^{-9} 的基线相对精度, 因此 GPS 将可用于固体潮研究, 改变目前单纯依靠重力测量手段研究固体潮的局面。

6. GPS 技术还可用于精化大地水准面^[20], GPS 技术可得到高精度的大地高, 将其与水准测量数据或重力场资料结合, 便可得出大地水准面资料, 这在一些水准测量有困难地区, 以及高程精度要求不是很高的地区(如物探)很有实用价值。

五、影响 GPS 技术高精度测量的因素

GPS 在测地方面发挥着越来越重要的作用, 1992 年 12 月初发布的 IERS 公报 B58 (自 1992 年 10 月开始) 将采用 GPS 1 天解的结果。

为了进一步提高 GPS 测量精度, 下列因素尚待进一步深入研究。

1. 对 GPS 观测主要误差源的研究

(1) 大气改正模型目前仍较多采用一些比较早的模型如用 Saastamoinen、Marini 等公式来改正对流层影响, 并采用双频数据组合来减弱电离层的影响。需引入大气改正参数参加估计, 还需设计专门适合于 GPS 的大气改正模型。

(2) 目前接收机天线相位中心的变化可达 1cm 量级, 而且两个波段频率的相位中心不同。

2. GPS 数据处理技术的研究

载波相位测量是 GPS 测量中精度最高的方法, 但模糊度的解算、失周的判断和修复都没有出现完全可靠、有效、自动的方法。

3. GPS 精密星历的研究

目前 GPS 卫星轨道确定的精度为 1—3m, 而影响轨道精度的主要因素是卫星的力学模型误差, 其中主要是由于卫星形状复杂, 有太阳翼板和姿态控制装置, 导致了建立直接的和间接的太阳辐射压模型的困难, 目前已建立的最好的模型也只能计及其实际影响的 70%^[17]。

4. 对 SA 政策的对策研究

没有特权的用户将受到 SA 政策的影响, SA 政策使得广播星历精度降低, 卫星钟差改正精度降低, 卫星频率稳定度降低^[18]。其中第三项影响最为重要, 目前的办法是采用同步观测, 或连接高精度频标。

参 考 文 献

- [1] Bock Y., *Bull. Geod.*, 62 (1988), No. 2, 142.
- [2] Bagley L. C. et al., NAVSTAR joint program office and a status report on the GPS program, in Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Ohio State University, March, 1992.
- [3] Abbot R. I., et al., Earth rotation from radio interferometric tracking of GPS satellites, in Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Ohio State University, March, 1992.
- [4] Swift E. R., Comparison of GPS-derived earth orientation parameters with final BIH/IERS and USNO values. *Review of Geophysics, Suppl.*, p. 172, April, 1989.
- [5] Herring T. A. et al., Current and future accuracy of earth rotation measurements, U. S. National Report to International Union of Geodesy and Geophysics, 1987-1990.
- [6] Herring T. A. et al., The rotation of the earth, in Proceedings of AGU Champan Conference on Geodetic VLBI: Monitoring Global Change, p. 306, Washington D. C. (USA), April, 1991.
- [7] Lindquister U. J., Measuring high frequency polar motion with global positioning system, in Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Ohio State University, March, 1992.
- [8] Lichten S. M. et al., Estimation of sub-daily UT1 variations with GPS observations, in Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Ohio State University, March, 1992.
- [9] Schutz B. E., et al., GPS reference frame and earth rotations, in Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Ohio State University, March, 1992.
- [10] Gendt G., et al., Global and regional network analysis from GPS observations, in 7th International Symposium Geodesy and Physics of the Earth, IAG-Symposium No. 112, Potsdam, October, 1992.

- [11] Bock Y., One year of daily satellite orbit and polar motion estimation for near real time crustal deformation monitoring, IAU Symposium No. 156, Shanghai, September, 1992.
- [12] Vigue Y., et al., Using the global positioning system for precise determination of geodetic station coordinates in Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Ohio State University, March, 1992.
- [13] Anderson P. H., et al., GPS orbit determination and relative positioning using data from the GIG'91 campaign, in Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Ohio State University, March, 1992.
- [14] Shimacla S., et al., *J. G. R.*, 97 (1992), No. 89, 12437.
- [15] Mccarthy D. D., International earth rotation service standards, in Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Ohio State University, March, 1992.
- [16] King R., et al., Surveying with GPS., (1985).
- [17] Flieget H. F., et al., *J. G. R.*, 97 (1992), No. B1, 559.
- [18] Feigl K. L., et al., *J. G. R.*, 16 (1991), No. 7, 1289.
- [19] IGS'92 Campaign Final Report, Comparisons of GPS, SLR, and VLBI earth orientation determinations, (1992).
- [20] 王解先, 中国科学院上海天文台年刊, (1992), No.13, 67.

(责任编辑 林一梅)

The Applications of GPS to Geodesy and Geodynamics

Wang Jiexian

(Tongji University, Shanghai 200092)

He Miaofu Zhu Wenyao Huang Cheng

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

Abstract

The current applications of GPS (Global Positioning System) to geodesy and geodynamics, especially to earth rotation service, establishment of terrestrial reference-frame and so on, are introduced. The satisfactory results of earth rotation parameter monitoring with high accuracy and resolution, and the precise determination of global scale baseline lengths and geocentric position obtained from GIG'91 and IGS'92 global campaign are given. Some main problems associated with precise GPS surveying are briefly discussed.