

GPS及其在天文地球动力学中的应用

罗时芳 朱文耀 郑大伟

(中国科学院上海天文台)

提 要

本文系统地介绍了GPS应用于精密测地和天文地球动力学的基本模式、原理和误差。并讨论了在目前的天体测量新技术如甚长基线干涉仪(VLBI)、激光测卫(SLR)、激光测月(LLR)已成功地用于天文地球动力学的情况下, GPS发展的可能前景。

一、引 言

全球定位系统(Global Positioning System——GPS)是用于全球导航、定时和定位的卫星系统。全称为NAVigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System, 字数缩写为NAVSTAR GPS, 意为导航卫星定时和测距全球定位系统。

GPS系统是美国军事部门为改进它的全球导航系统而发展起来的。经过了1973—1979年的调查研究阶段, 目前进入具有7颗可用的GPS卫星的实验阶段, 即大力开发各类GPS用户型接收机、试验和观测资料的处理、观测误差的研究等。按原订计划, GPS卫星系将于1988年底投入使用, 因美国航天飞机在1986年春天发射的失败, 原订计划将被推迟两年, 至1990年中完成。到那时, 将有18颗GPS卫星均匀分布在三个轨道上, 提供给全球用户在任何时刻使用。

天文地球动力学是利用天文手段和方法研究地球的各种动力学现象, 包括整体的自转运动, 如相对空间参考系的岁差和章动, 自转速率的变化及相对地球参考系的地极移动, 还包括地球的局部运动如板块运动、大陆漂移、固体潮现象等。长期以来, 利用经典天文方法如子午仪、等高仪等来研究这些现象。近十几年发展起来的现代新技术, 如甚长基线干涉仪(VLBI), 激光测月(LLR), 激光测卫(SLR), 使天文地球动力学的研究精度提高了整整一个量级^[1]。GPS技术的出现和目前的试验表明, 它可能加入到这个新技术的行列, 为天文地球动力学的研究作出贡献。

二、GPS精密定位的主要模式及误差

1. GPS用于定位的基本原理

待测站利用接收机接收GPS卫星发射的无线电时号, 得到卫星至接收站的距离, 如果在同一时刻接收来自4颗以上的GPS卫星信号, 假定GPS卫星上的钟是严格同步的, 且已知

卫星历表, 则可根据 4 个以上的测距结果, 解得测站接收机的三个位置参数和接收机钟的偏离(对 GPS 系统钟)。根据不同的测距方式得到不同的测距精度, 从而得到不同的定位精度。为说明清楚起见, 必须了解 GPS 卫星发射的信号结构。

2. GPS 卫星的信号结构^[14]

GPS 卫星发射 L 波段的两个频率的载波, $L_1=1,575.42\text{MHz}$, $L_2=1,227.60\text{MHz}$, L_1 波段的信号由两组二进制的伪随机噪声(PRN)信号所调制。第一组的码长为 1 毫秒, 即 1,023 比特, 比特率为 1.023Mbps 的 C/A 码——“粗/拦截”码, 简称粗码。第二组的码长为一星期、比特率为 10.23Mbps 的精密码, 简称 P 码。P 码全长为 267 天, 分成每 7 天一段, 每个卫星分配到其中一段。在一个星期中, 各个卫星占用那一段由地面控制站控制。P 码的波长为 29.31 米, C/A 码的波长为 293.1 米。 L_2 波段的信号只受 P 码调制, 无 C/A 码。P 码和 C/A 码实际上是一种时间信号, 除用于测距和计时外, 还用于识别卫星。此外, L_1, L_2 波段的信号都受导航电文的调制, 电文的内容包括卫星星历、时间、卫星钟性能参数, 电离层传播延迟的模式参数(仅 C/A 码)、系统状态信息以及年历等。 L_1 波段的信号调制情况可用下列数学表达式表示:

$$L_1(t) = A_P P_i(t) D_i(t) \cos(\omega_1 t + \phi(t)) + A_C G_i(t) D_i(t) \sin(\omega_1 t + \phi(t))$$

$P_i(t), G_i(t)$ 分别为 P 码和 C/A 码的以阶梯函数出现的伪随机序列, A_P, A_C 为该两组码的相对振幅, $D_i(t)$ 为导航电文序列, ω_1 为 L_1 波段的载波角频率, ϕ 为其相位角。

接收机同时在 L_1 及 L_2 波段测量, 可用来消除电离层效应的影响。

由此可见, 根据 GPS 卫星发射的信号, 用它进行定位的测量模式有两类。第一类为利用代码信息的伪距测量, 第二类为利用载波信号的相位测量。

3. 伪距测量与载波相位测量的比较^[2]

伪距测量是通过接收 P 码或 C/A 码信号, 直接测得卫星至接收机距离。利用 P 码的测量精度比利用 C/A 码的测量精度高, 因为 P 码的波长短些(29.3 米), 简单内插可得分米级的测量精度, 而且可以在 L_1 和 L_2 两个波段上观测, 用以消除电离层的影响。但 P 码只提供在美国军事部门及其盟友使用, 不对所有用户开放。C/A 码可供全球用户使用。

伪距测量从代码信号中得到卫星历表及有关钟的信息, 因而它可得到实时定位结果。在导航和动态定位(如飞机、船只等)中常使用这种方法。

但这种方法受卫星历表的影响较大, 定位精度一般在几米至十几米, 不宜作为精密大地测量和地球动力学应用。

GPS 卫星发射的频率是 P 码的 154 倍, 波长为近 19 厘米(L_1 波段)和 23 厘米(L_2 波段), 简单的内插就可使测量精度达厘米级。测量受多普勒影响的卫星信号的相位与测站标频信号相位之差, 就是载波差拍相位测量, 或简称载波相位测量。载波相位测量有两种方法, 一种是对 L 波段的载波相位测量, 一种是从伪随机码 P 码的相位结构“转换”来的载波相位测量, 后者在测量精度上低于前者, 但因为波长为 30 米, 故在相位测量中产生的整周模糊度问题容易解决。

载波相位测量的精度比伪距测量的精度高, 但需要外来历表, 且有整周模糊度问题。通常称这种简单相位测量为单向相位测量(one-way phase)。同样受许多误差如卫星历表误差、

大气传播误差、卫星钟和地方钟不稳定等的影响。利用载波相位差分观测及相干型测量等进一步提高测量精度。

4. 差分观测

差分观测是由载波相位观测发展而来,分为单差观测、双差观测和三差观测。

单差观测:将两接收站在同一时刻对同一卫星的载波相位观测相减,得单差观测量。单差观测能消除卫星钟不稳定的影响。

双差观测:它是将同一时刻对不同卫星得的单差观测量进行差分求得,能消除卫星钟和测站钟不稳定的影响。

三差观测:它是将在相邻时刻得到的双差观测量再进行差分求得。三差观测能消除整周模糊度问题,而测量精度却低于双差观测。

为说明清楚起见,差分观测的数学表达如下:

设载波相位观测量 $\Delta\phi_j^i(t_R)$ 表示卫星发射的载波相位 $\phi^i(t_i)$,与地方接收机接收信号时本地钟信号的相位 $\phi_j(t_R)$ 之差为:

$$\Delta\phi_j^i(t_R) = \phi^i(t_i) - \phi_j(t_R) \quad (1)$$

上标*i*表示卫星,下标*j*表示台站。信号从卫星发射的时刻为 t_i ,接收时刻为 t_R 。途经的时间为 $\rho_j^i(t_i)/c$, c 为光速, ρ_j^i 表示卫星*i*至台站*j*的距离,可由卫星历表和测站坐标求得。

$$t_R = t_i + \rho_j^i(t_i)/c$$

$$\begin{aligned} \text{则} \quad \Delta\phi_j^i(t_R) &= \phi^i(t_R - \rho_j^i(t_i)/c) - \phi_j(t_R) \\ &= \phi^i(t_R) - (f/c)\rho_j^i(t_i) - \phi_j(t_R) + N_j^i \end{aligned} \quad (2)$$

N_j^i 表示信号传播的整周数。 f 为载波频率。设 $t_R = t$,则有

$$\Delta\phi_j^i(t) = \phi^i(t) - \phi_j(t) - (f/c)\rho_j^i + N_j^i \quad (3)$$

(3)式是载波相位观测的基本方程。

由此,单差观测量为

$$(\Delta\phi)_{2-1}^i(t) = \phi_1(t) - \phi_2(t) + (f/c)(\rho_1^i - \rho_2^i) + N_2^i - N_1^i \quad (4)$$

双差观测量为(以第4,9号卫星为例):

$$\begin{aligned} (\Delta\phi)_{2-1}^{4,9}(t) &= (\Delta\phi)_{2-1}^4(t) - (\Delta\phi)_{2-1}^9(t) \\ &= (f/c)(\rho_1^4 - \rho_2^4 - \rho_1^9 + \rho_2^9) + (N_2^9 - N_1^9) - (N_2^4 - N_1^4) \end{aligned} \quad (5)$$

三差观测量由相邻历元的双差观测量求得。由(4),(5)式,我们可以看出双差观测何以与卫星钟及测站钟不稳因素无关的。整周模糊度在观测期间不变,故三差观测能消除整周模糊度问题。

近期试验表明,对几十公里至几百公里的基线测量,双差观测的测量精度可达厘米级^[7]。因此,它将是用于高精度测地和天文地球动力学的主要方法之一。

5. 相干观测

它的测量原理与甚长基线干涉测量的原理相同。基本观测量为同一波前到达两台站的时间差,即时延 τ 及延迟率 $\dot{\tau}$ 。由于GPS信号的强度是射电源的 10^5 倍,接收机的天线可做得很小,从而使接收机非常轻便。而且,记录清晰,使相关处理比XLBI方法容易。但是GPS卫星离测站的距离较近(与河外射电源相比),信号到达两测站不能作为平面波处理,而且作

为参考系使用的GPS卫星,本身也有相当快速的运动,从而使数据的后处理变得相当复杂。

6. GPS用于精密定位的主要误差

GPS用于精密定位的主要误差是:(a)仪器误差;(b)传播介质效应;(c)卫星轨道误差。

(a) 仪器误差

主要是卫星及接收机频标(钟)的误差。现有的频标有晶振和原子频标。晶振的稳定度为 10^{-6} — 10^{-10} ,频率波动太大,因而几乎不能用于测地测量。原子钟,如铷钟,其稳定度为 10^{-11} ,铯钟达 10^{-13} ,几小时的观测,可将接收机钟描述为线性或抛物线模型来解算。但卫星钟和接收机钟的历元差及高次项波动仍会影响精确定位。利用双差观测可避免卫星钟和接收机钟的影响。

(b) 传播介质误差

由于卫星高度较高(20,200公里),传播介质中中性大气的影响是很重要的。大气中的“干分量”可用地面温度、压力及相对湿度进行模拟,模拟误差小于1厘米。而湿分量,即水气的影响,在微波部分达几十厘米。因为地面湿度不能完全反映地面以上的水汽分布。特别是带有大量水蒸气的云块会对信号路径长度产生明显影响(如灰色云块的影响达3厘米)。解决这个影响的办法是观测足够长的时间,并避免在阴云密布的天气进行观测。此外,利用微波水汽辐射计测定大气中水汽含量来进行改正,能较大幅度削弱中性大气的影响。一般讲,大气误差的影响为1ppm(1×10^{-6})。

(c) 卫星轨道误差即卫星历表误差

对单点定位,GPS轨道误差几乎全部转化为定位误差。用差分观测或相干观测进行的相对定位中,轨道误差几乎与介质误差有相同量级,且与相对定位测定的基线长度有关。粗略估计卫星轨道误差与基线长度及其测定误差的关系为

$$\frac{\text{基线长}}{\text{卫星高度}} \times \text{历表误差} = \text{基线误差(历表影响的)}$$

一条10公里长的基线,如历表误差为20米,则由此而引起的基线测定误差为1厘米。如果基线越长,若要求测定基线误差达厘米级,则对轨道精度(历表精度)的要求就越高。例如对100公里的基线,如基线测定精度要求为1厘米,则历表精度必须在 ± 2 米之内。目前GPS卫星的历表有两种,一种为广播历表,它是对卫星轨道的预测,精度为50米左右,因此,对短基线的测定,相对定位精度可达几厘米;另一种为精密历表,它是利用卫星跟踪资料求出的精确的“过去”卫星轨道,它的精度与跟踪站的分布及其位置精度、观测时间的长短及归算中使用的几何、力学模型有关。对某些天文地球动力学课题,卫星历表的影响是关键问题。

三、天文地球动力学研究现状

天文地球动力学的各种现象一直是天体测量工作者的研究对象。

岁差常数的测定已有几百年的历史,最初的岁差常数值是由著名的天文学家 Bessel 在十九世纪初期公布的(1818年、1830年)。随着观测手段的改进,观测精度的提高,许多学者仍不断对它进行研究和改进。近来美国有关学者已开始利用激光测月(LLR)的资料^[4]和甚长基

线干涉观测(VLBI)资料^{[12], [9]}测定岁差常数的改正,然而,由于它们的资料跨度小(几年),最终的改正值尚未有结论。

章动系列的研究也有几十年的历史,早期的章动序列是由美国天文学家Woolard在1953年给出的,称为Woolard章动。经过多年的实践和研究,利用新的章动理论和新的地球模型,Wahr给出了新的章动系列^[11]。可是,近来的VLBI观测已经检测出,1980年的章动系列(Wahr系列)也是有缺陷的。它的某些项系数(主要是周年项和半年项)存在较大的误差^{[8], [9]}。至于长周期项的系数问题,则需要更多的观测来验证。

新技术如VLBI、SLR、LLR,对地球自转参数的研究作出了极大的贡献。特别是1980—1985年,由国际天文学联合会(IAU)及国际大地测量和地球物理学联合会(IUGG)联合发起的国际地球自转联测(MERIT)计划,促进了这三种技术开展定期的常规观测,而且得到了高精度(精度达 $\pm 1-3$ 厘米)的地球自转参数(UT1,极坐标 x, y)序列(BIH Annual Report, 1985)。对此序列的研究,获得了对地球自转高频变化的新认识^[13],明确了大气角动量变化与地球自转速率(UT1或LOD)高频变化的确定关系^{[5], [6]}。为进一步探索变化机制打下了良好基础。

地壳移动、大陆漂移是长期而缓慢的地壳运动过程,每年的移动量大约为几个毫米至几厘米量级。利用这些新技术,可以在几年之内对这些运动进行验证^[15]。

现代研究表明,强烈的地震是有前兆的,在各种前兆现象中,断层活动、地倾斜的特征性变化十分明显^[17]。而且,这种变化不仅局限在震中地区,常常涉及到震中周围上百公里的地区。国外利用流动的VLBI和SLR站的观测,对这些临震活动进行定量的研究,例如美国宇航局(NASA)进行的地壳动力学计划,其内容之一就是新技术的流动站对美国的圣·安德列斯断层进行监测。

总之,利用VLBI,SLR,LLR等新技术,目前对以上这些天文地球动力学现象的测量精度已能达厘米量级,因而使有关课题的研究取得了新的成果。

可是,这些新技术的技术难度大,维持正常观测需要相当多的经费。虽然七十年代后期发展了流动式的装备,但发展这些设备而需要的费用也十分昂贵,设备的体积也相当大,因而很难在全球得以推广。GPS技术的出现,似乎能够填补这个缺陷。

四、GPS用于天文地球动力学测量的基本原理

设 F_0 为GPS观测量, $F(X)$ 为利用参数 X 算得的观测量的数学模式,则

$$F_0 = F(X) + e, \quad e \text{ 为观测误差,}$$

对 F 线性化为

$$\begin{aligned} F(X) &= F(X_0) + \sum \frac{\partial F}{\partial X_j} \Delta X_j \\ &= F(X_0) + B \cdot x \end{aligned}$$

$F(X_0)$ 为用初始参数 X_0 计算得的理论值。 B 为观测量对参数偏导数矩阵, x 为参数修正值 $x = X - X_0$ 。通常理论值的归算在特定的参考坐标系(如J2000的太阳系质心参考系)中进行。于

是得到 GPS 用于测定有关参数的基本方程为:

$$F_0 - F(X_0) = B \cdot x + e \quad (6)$$

式中 $F(X_0)$ 、 B 是利用接收站初始坐标、卫星历表、卫星钟和台站钟状况及转换参数矩阵;岁差、章动、自转和极移来求得。用最小二乘法就可以求得待求参数的改正 x 。待求参数改正的最佳估计由卫星的分布及台站网几何状态决定。因而,从原理上讲,GPS技术也与新技术一样^{[16], [19]},能用于各种天文地球动力学的研究。

五、GPS技术在天文地球动力学中应用的展望

据目前的试验,GPS技术用于短距离(几公里至几十公里)的基线测量已经达到厘米级精度^[7],因此,它用于区域性的地球动力学现象,如断层活动、小板块的位移、地震前兆监测等的研究,在精度上能与新技术的移动站相当^[10],在经费上却便宜得多。

影响GPS用于长距离的相对定位精度的主要原因是卫星轨道误差即历表误差^[8]。目前从C/A码得到的历表精度为30—50米,而精密历表的精度约20米。因此,即使用精密历表对长达1,000公里基线的相对定位精度也只能达1米左右,它影响着GPS用于测定地球自转参数、洲际及大板块之间的基线测定。近来已有利用GPS技术测定地球自转参数的试验。这些试验在美国本土进行,测定精度为UT1: $\pm 1\text{ms}$, $x, y: \pm 0''.04 \sim 0''.07$ ^[11]。试验取得成功,精度却不够理想。为此,改进GPS星历表显得十分重要。

影响卫星历表精度的主要原因是:(1)跟踪资料的不精确,包括跟踪站的分布,跟踪站初始位置不精确,接收机的测量误差等;(2)归算使用的力学模型不准确,特别是太阳辐射压的模型。改进历表精度的主要方法是:(1)建立国际性的GPS跟踪网;(2)采用可进行差分观测或相于观测的GPS接收机;(3)改进归算用的力学模型;(4)利用已知精确坐标的台站作为跟踪站。为此,可以把跟踪站与VLBI、LLR站及SLR站结合起来,利用这些新技术给出的精确的台站坐标,来改进GPS历表的测定。

可以预料,GPS卫星历表精度问题的解决,GPS技术在天文地球动力学方面的应用将像其他新技术一样广泛和重要。又由于GPS接收机体积小而轻,运转费用低等优点,将来取代VLBI、LLR和SLR新技术的移动站是可能的。经过一段时期的比对观测后,甚至有可能取代新技术的一部分固定台站,以节省运行费用。而且,各种技术的并置和比对观测,又有利于各种参考系误差的研究和它们之间转换关系的建立。

在用于天文地球动力学的研究中,GPS技术正向VLBI、SLR、LLR技术挑战。

参 考 文 献

- [1] Abbot, R. I., R. W. King, Y. Bock and C. C. Counselman, IAU Symposium No.128, (in press) (1986).
- [2] Anderle, R. J., *Navigation*, 1(1982), 11.
- [3] Colombo, O. L., *Bull. Geod.*, 60(1986), No.1, 64-84.
- [4] Dickey, J. O., Newball, X. X. and Williams, J. G., IAU Symposium No.125, p.274, (1985).
- [5] Dutton, C. E. and Fallon, F. W., IAU Symposium No.125, p.450. (1985).

- [6] Eubanks, T. M., IAU Symposium No.125, p.469, (1985).
 [7] Goad, C. C. and Remondi, B. W., *Bull. Geod.*, 58(1984). No.2, 193.
 [8] Herring, T. A. et al., EOS Trans. Am. Geophys. Union, 64(1983). 674.
 [9] Herring, T. A. et al., IAU Symposium No.125, p.307, (1985).
 [10] Mader, G. L. and M. D. Abell, First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, 1(1985), 549.
 [11] Seidelmann, P. K. *Celestial Mechanics*, 27(1982), 76-106.
 [12] Sovers, O. J. et al., *J. Geophys. Res.*, 89(1984), No. B9, 7597-7607.
 [13] Shifang Luo, Dawei Zheng, Robertson, D. S. and Carter, W. E., to be presented to *J. Geophys. Res.*
 [14] Spilker, J. J., *Navigation*, 1 (1982), 29.
 [15] Tapley, B. D., Schutz, B. E. and Eones, R. J., *Celestial Mechanics*, 37(1985), 247-261.
 [16] Wilkins, G. A. and Mueller, I. I., *Bull. Geod.*, 60(1986). No.1, 85-100.
 [17] 梅世蓉, 大陆地震活动和地震预报国际讨论会文集, 264, (1982).
 [18] 罗时芳, 陈型, 天文进展, 3(1982), No.1, 37.
 [19] 金文敬, 郑大伟, 天文进展, 2(1981), No.2, 1.

(责任编辑 刘金铭)

GPS and its Applications to Astro-geodynamics

Luo Shifang, Zhu Wenyao, Zheng Dawei

(Shanghai Observatory, Acadimia Sinica)

Abstract

In this paper, the basic models, principle and error sources of GPS applied to precise geodesy and astro-geodynamics are introduced systematically. Under the recent situation that new astronomical techniques, for example, Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Satellite Laser Ranging (SLR) and Lunar Laser Ranging (LLR), are successfully applied to astro-geodynamics, the possible trends of GPS are discussed.