GPS 授时校频方法研究与试验结果

赵军祥 李建辉
(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083) (北京北斗星通卫星导航技术有限公司, 北京 100086)
常 青 张其善
(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了解决多目标综合测量系统各测站之间时间同步和频率校准问题,提出了利用 GPS(Global Positioning System)单星或多星共视方法进行站间时间同步与校频,给出了这两种方法的计算公式,分析了星历误差、星钟误差、电离层折射误差、对流层折射误差、多径效应和接收机硬件延迟对时间同步精度的影响. 为了验证 GPS 授时校频精度,进行了相关试验. 通过与铯原子钟比对,表明利用 GPS 可实现纳秒级时间同步,校频精度也优于 5.0×10^{-11},多星共视具有更高的同步校频精度.

关 键 词: 全球定位系统; 误差分析; 时间同步; 频率基准
中图分类号: P 228.4
文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2004)08-0762-05

Study on GPS timing and frequency calibration method and the test results

Zhao Junxiang
(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)
Li Jianhui
(Beijing BDSTAR Navigation Co. Ltd., Beijing 100086, China)
Chang Qing Zhang Qishan
(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To solve the problem of time synchronization and frequency calibration among different stations in an integrated multi-target tracking system, two methods using global positioning system(GPS) through observing one or more GPS satellites in common view are put forward. Calculation formulas are derived, the impacts on time synchronization of error sources such as ephemeris error, satellite clock error, ionospheric error, tropospheric error, multi-path effects and receiver's hardware delay are analyzed. To validate time synchronization and frequency calibration precision, some related tests were got. Comparing with Cesium clock, it shows that nanosecond level time synchronization can be obtained and the precision of frequency calibration is better than 5.0×10^{-11} using GPS. More precise time synchronization and frequency calibration can be achieved by using multi-satellites in common view than using single satellite.

Key words: global positioning system(GPS); error analyses; time synchronization; frequency reference

收稿日期: 2003-05-27
基金项目: 国家自然科学基金资助课题(60027001)
作者简介: 赵军祥 (1965-),男,河北石家庄人,高级工程师, 博士生,zhao1965@eyou.com.

近年来随着伪码测量技术的发展,GPS(Global Positioning System)在飞行器弹道测量方面得到了广泛应用,不少基于伪码扩频原理的测量系统开始研制并陆续投入使用. 例如多目标综合测量系统就是在飞行器发射的遥测信号上调制伪码,布于地面的多个测站同时接收伪码信号,得到伪码信号到达各站的距离差,利用多站距离差精确测定飞行器的位置. 站间时间同步和频率校准精度是影响该系统测量精度的关键因素. 利用传统的长波和短波授时已不能满足要求,GPS 系统每颗卫星上都配备有铷钟或铯钟,其频率稳定度约为 $10^{-13}\sim10^{-14}$[1]. 各站通过共视高仰角 GPS 卫星,可有效消除公共误差源的影响,建立共同的时频基准,从而实现高精度站间时间同步.

1　GPS 授时校频原理

各站配备的 GPS 定时接收机接收 GPS 卫星信号,获得 GPS 系统时间,然后将本地时间与 GPS 系统时间进行比较得到本地时钟与 GPS 系统时间的偏差. 用户钟时间、卫星钟时间、GPS 系统时间之间的关系如图 1 所示.

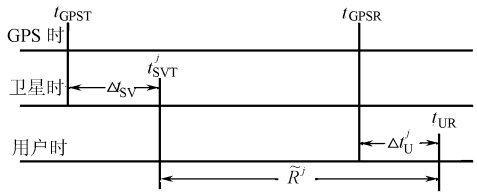


图 1　GPS 时间关系示意图

假设各站共视第 j 颗 GPS 卫星,信号发射时刻对应的 GPS 时间和卫星钟时间分别为 t_{GPST} 和 t^j_{SVT},接收机采样时刻对应的 GPS 时间和用户钟时间分别为 t_{GPSR} 和 t_{UR},Δt^j_{SV} 为第 j 颗卫星钟与 GPS 时间的偏差,可利用导航电文播发的星钟参数进行修正,Δt^j_U 为利用第 j 颗星得到的用户钟与 GPS 时间的偏差,$\tilde{R}^j$ 为定时接收机测量得到的伪距,则有

$$\frac{\tilde{R}^j}{c} = t_{UR} - t_{SVT} = \frac{R^j}{c} + \Delta\tau^j + \Delta t^j_U - \Delta t^j_{SV} \tag{1}$$

式中　R^j 为第 j 颗卫星到测站的空间距离;c 为光速;

$$\Delta\tau^j = \sum_{i=1}^{9}\Delta\tau^j_i$$

其中,$\Delta\tau^j_1$ 为星历误差;$\Delta\tau^j_2$ 为星钟误差残差;$\Delta\tau^j_3$ 为地球旋转项误差;$\Delta\tau^j_4$ 为电离层误差;$\Delta\tau^j_5$ 对流层误差;$\Delta\tau^j_6$ 为多径效应误差;$\Delta\tau^j_7$ 为站址误差;$\Delta\tau^j_8$ 为硬件延迟变化;$\Delta\tau^j_9$ 接收机噪声等引起的误差.

令 $\tau^j=\frac{R^j}{c}$,$\tilde{\tau}^j=\frac{\tilde{R}^j}{c}$,则根据(1)式,由第 j 颗 GPS 卫星信号计算可得到的用户钟差估值为

$$\Delta\hat{t}^j_U = \tilde{\tau}^j - \tau^j + \Delta t^j_{SV} - \Delta\tau^j \tag{2}$$

假设 t 时刻接收机频率准确度为 A_α,测量得到的第 j 颗卫星的多卜勒频率为 $f_d{}^j$,则有

$$f_d{}^j = \frac{\dot{R}^j}{\lambda_{L_1}}(1 + A_\alpha)$$

式中　$\dot{R}^j$ 为第 j 颗卫星到接收机的距离变化率,通过卫星速度计算得到;λ_{L_1} 为 GPS L_1 信号波长.

根据上式,由第 j 颗卫星信号得到的用户接收机频率准确度估值为

$$\hat{A}^j_\alpha = \frac{\lambda_{L_1}}{\dot{R}^j}f_d{}^j - 1 \tag{3}$$

当站间共视 n 颗卫星进行授时校频时,假设各授时通道之间测量噪声相互独立,第 j 颗卫星伪距测量噪声方差为 σ^2_{Rj},伪距变化率测量噪声为 $\sigma^2_{\dot{R}j}$,则 n 颗卫星得到的接收机钟差和频率准确度的最优估计为[2]

$$\Delta\hat{t}_U = \sum_{j=1}^{n} p_j\Delta\hat{t}^j_U \tag{4}$$

$$\hat{A}_\alpha = \sum_{j}^{n} q_j\hat{A}^j_\alpha \tag{5}$$

式中　p_j,q_j 为加权因子,

$$p_j = \frac{\sigma^2_R}{\sigma^2_{Rj}}$$

其中

$$\frac{1}{\sigma^2_R} = \sum_{j=1}^{n}\frac{1}{\sigma^2_{Rj}}$$

$$q_j = \frac{\sigma^2_{\dot{R}}}{\sigma^2_{\dot{R}j}}$$

其中

$$\frac{1}{\sigma^2_{\dot{R}}} = \sum_{j=1}^{n}\frac{1}{\sigma^2_{\dot{R}j}}$$

根据前面的公式可知,对每一采样时刻均可计算出接收机的瞬时钟差和频率准确度,从而实现授时和校频.

2　时间同步精度分析

影响时间同步精度的误差源主要有星历误差、星钟误差、电离层和对流层折射误差、多径干扰,站址误差、接收机硬件延时不稳定性误差、测量噪声等,下面分别讨论这些误差的影响.

星历误差引起的站间时间同步误差可按下式估算[3]:

$$\delta\tau_{ephe} \approx \frac{d}{D} \times \frac{\delta R}{c}$$

式中 d 为两个测站之间的距离；D 为目标到 GPS 卫星的距离（$D \approx 20\ 000$ km）；δR 为星历误差. 若使用广播星历，取 $\delta R = 2.62$ m[4]，当 $d = 100$ km 时，由星历误差引起的时间同步误差小于 0.05 ns，完全可以忽略.

尽管利用星钟参数进行星钟误差修正后还存在剩余残差，但两个测站采用同步采样，可以抵消该残差，不会影响站间时间同步精度.

电离层误差是 GPS 定位中一项主要误差，对站间时间同步精度的影响与站间距离、共视星仰角有关. 本文依据参考文献[5]提供的电离层在不同高度上的电子浓度，沿测站至卫星的斜路径进行数值积分，对相距 100 km 的两个测站，计算了在卫星可见弧段内电离层对站间时间同步精度的影响，结果如图 2 所示. 对 100 km 基线，当两站共视高仰角（通常大于 50°）卫星时，电离层引起的时间同步误差小于 1 ns.

对流层一般指从地面向上 40 km 范围内的大气底层，对流层延迟与大气压力、温度和湿度有关，在天顶方向延迟约为 2.3 m，卫星仰角为 10° 时可达 20 m. 对流层误差一般用模型进行改正，如结合实测地区气象资料，能减少对流层延迟达 92% ~93%[1]. 在气象条件较稳定时，两测站进行同步观测，能更好地削弱大气折射的影响. 另外，由于两站共视高仰角卫星，因此可以认为对流层对站间时间同步精度影响很小，可忽略.

多路径影响与天线安装环境有关. 对各测站来讲，多路径影响是完全不相关的. 要取得较高同步精度，必须选择合适的天线安装环境. 天线使用抗多径阻塞环能有效抑制多径误差，接收机内部采用抗多径信号处理技术如窄距相关、脉冲孔径相关（PAC）、多路径估计延迟锁定环路（MEDLL）技术等，都能降低多径信号的影响.

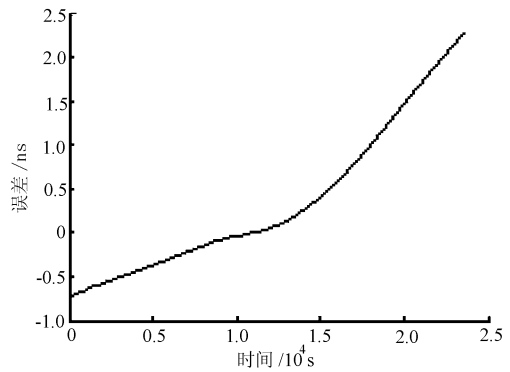


图 2 电离层对站间时间同步精度的影响

接收机测量噪声是影响时间同步精度的主要误差源. 对高仰角卫星，其信噪比较高，有利于接收机降低测量噪声，根据对部分实验数据统计，授时接收机 C/A 码噪声小于 4 ns.

接收机硬件延迟稳定性是影响时间同步精度的一个因素，硬件延迟变化与环境温度、信号强度等因素有关. 采用数字信号处理技术，尽可能靠近前端对 GPS 信号进行 A/D 采样，把模拟信号变为数字信号，利用软件对数字信号进行处理，这样，可以减少模拟信号传输的环节，降低硬件延迟的变化.

测站站址误差也将对站间时间同步精度产生影响，这种影响主要取决与两个站址的相对测量精度. 采用 GPS 载波相位技术进行大地测量，两站之间的相对定位精度可以达到 5 mm + 1.5 × 10^{-6} × 基线长. 对 100 km 基线，相对定位误差小于 0.2 m，由此引起的时间同步误差不足 1 ns.

3 授时试验结果

2001 年 10 月在北京跟踪与通信技术研究所对专门研制的 4 台授时接收机进行了授时校频精度测试，这 4 台接收机编号分别为 A，B，C，D，均有两个授时通道，可同时跟踪 2 颗 GPS 卫星. 比较标准采用 HP5061A Option004 选型铯束原子频标，其标称频率准确度 $A_\alpha \leqslant 2\times10^{-12}$，稳定度 $\sigma_y = 5\times10^{-12}/(1s)$，试验系统组成如图 3 所示.

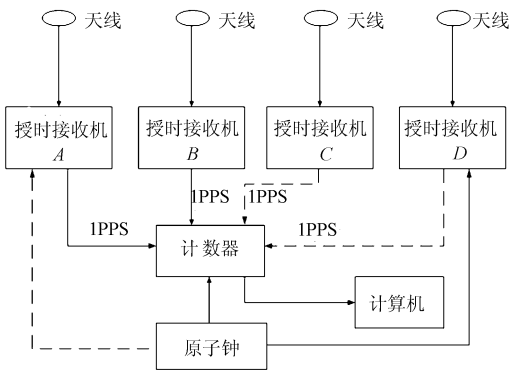


图 3 授时试验系统组成示意图

每个授时接收机均输出秒脉冲信号，接收机可计算出对应该秒脉冲的准确时间，将两台接收机的秒脉冲信号送给计数器，其中一路作为开门信号，另一路作为关门信号，计数器可以测出两个接收机秒脉冲之间的时间间隔，再与接收机计算出的两个秒脉冲间隔比较，便可得到时间同步精度.

下面以接收机 A 和接收机 B 为例,说明时间同步精度计算方法. 设接收机 A 和接收机 B 对应输出的秒脉冲对应的 GPS 时间分别为 t_{P}^{A},t_{P}^{B},设备延迟分别为 τ_{dev}^{A},τ_{dev}^{B},而 τ_{dev}^{A},τ_{dev}^{B} 代表设备零值. 假设接收机 A 在 t_{P}^{A} 时刻采样的信号是在 t_{R}^{A} 时刻到达 GPS 接收天线的,接收机 B 在 t_{P}^{B} 时刻采样的信号是在 t_{R}^{B} 时刻到达 GPS 接收天线的,t_{R}^{A},t_{R}^{B} 可由接收机测量数据计算得到. 显然,有以下关系:

$$t_{\mathrm{P}}^{A} = t_{\mathrm{R}}^{A} + \tau_{\mathrm{dev}}^{A}$$

$$t_{\mathrm{P}}^{B} = t_{\mathrm{R}}^{B} + \tau_{\mathrm{dev}}^{B}$$

以上两式相减,得到两台接收机秒脉冲时间差 $\Delta t_{\mathrm{P}}^{AB}$:

$$\Delta t_{\mathrm{P}}^{AB} = t_{\mathrm{P}}^{A} - t_{\mathrm{P}}^{B} = \Delta t_{\mathrm{R}}^{AB} + \Delta\tau_{\mathrm{dev}}^{AB}$$

其中

$$\Delta t_{\mathrm{R}}^{AB} = t_{\mathrm{R}}^{A} - t_{\mathrm{R}}^{B}$$

$$\Delta\tau_{\mathrm{dev}}^{AB} = \tau_{\mathrm{dev}}^{A} - \tau_{\mathrm{dev}}^{B}$$

$\Delta t_{\mathrm{P}}^{AB}$ 的精确值由高精度时间间隔计数器测量得到. τ_{dev}^{A},τ_{dev}^{B} 绝对值难以准确测得,但两者的差值可由大量实测数据统计得到. 假设有 N 组测量数据,则

$$\Delta\tau_{\mathrm{dev}}^{AB} = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(\Delta t_{\mathrm{P}i}^{AB} - \Delta t_{\mathrm{R}i}^{AB}\right) \qquad (6)$$

两接收机之间的时间同步精度用 $\sigma_{\mathrm{syn}}^{AB}$ 表示,其计算方法为

$$\sigma_{\mathrm{syn}}^{AB} = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(\Delta t_{\mathrm{P}i}^{AB} - \Delta t_{\mathrm{R}}^{AB} - \Delta\tau_{\mathrm{dev}}^{AB}\right)^{2}} \qquad (7)$$

从(6)式和(7)式可知,计数器测定的两接收机秒脉冲时间间隔与接收机计算出的时间间隔之差的均值反映了两接收机设备零值的差,均方误差反映了两接收机之间的时间同步精度.

2001 年 10 月 13 日、14 日、16 日进行了授时试验,编号为 A 的接收机秒脉冲信号一直与计数器连接,编号为 B,C 和 D 的接收机输出的秒脉冲信号顺序与计数器相连,计数器分别测出接收机 A 的秒脉冲与其它接收机秒脉冲的时刻差,用(6)式和(7)式计算不同接收机之间的延迟差和同步精度. 本文分别计算了单星授时和双星授时情况下两接收机的时间同步精度,结果见表 1、表 2. 由表可以看出在不同的试验时间,两接收机硬件延迟差比较稳定,采用单星授时时间同步精度可达到 15 ns,双星授时可达到 10 ns,高于单星授时精度. 根据前面分析,在 100 km 范围内,时间同步误差随两站距离变化不大,该结果基本反映实际布站条件下站间时间同步精度.

表 1　GPS 单星授时试验结果

接收机组合	试验时间	单星授时		
		共视星	均值/ns	方差/ns
A-B	13 日	17#	4.81	0.5
	14 日	17#	3.6	7.9
	16 日	22#	3.2	7.2
A-C	13 日	17#	−14.1	7.2
	14 日	17#	−11.8	13.3
	16 日	22#	−14.2	8.0
A-D	13 日	17#	15.6	13.9
	14 日	17#	14.4	14.8

表 2　GPS 双星授时试验结果

接收机组合	试验时间	双星授时		
		共视星	均值/ns	方差/ns
A-B	13 日	17#,23#	4.4	6.4
	14 日	17#,23#	4.1	6.6
	16 日	3#,22#	4.6	5.3
A-C	13 日	17#,23#	−13.9	4.9
	14 日	17#,23#	−12.2	7.4
	16 日	3#,22#	−13.1	6.7
A-D	13 日	17#,23#	14.9	7.9
	14 日	17#,23#	14.7	8.3

为了验证校频精度,铯原子钟输出两路 5 MHz信号同时送给接收机 A 和接收机 D,接收机利用5 MHz 信号作为外部频标,代替内部的本振,接收机根据 GPS 卫星信号的测量值实时估计原子钟频率准确度,然后与原子钟的标称频率准确度比较,验证校频精度. 两台授时接收机利用 3#卫星测量得到的原子钟的频率准确度见图 4、图 5. 接收机 A 测量的原子钟频率准确度均值为 -8.1×10^{-12},方差为 1.8×10^{-11}. 接收机 D 的测量结果为均值 -6.8×10^{-12},方差为 1.9×10^{-11}. 同时利用两颗 GPS 卫星得到的原子钟的频率准确度见图 6、图 7,接收机 A 的测量结果为均值 -5.9×10^{-12},方差 2.4×10^{-11},接收机 D 的测量结果为均值 -6.1×10^{-12},方差 2.4×10^{-11}. 由图可知,利用GPS进行实时校频,校频精度可以达到5.0×

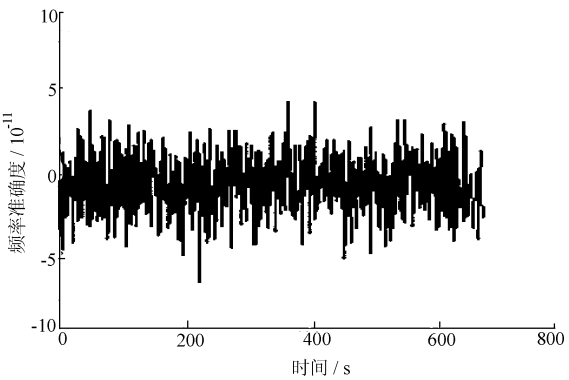


图 4　接收机 A 单颗星校频结果

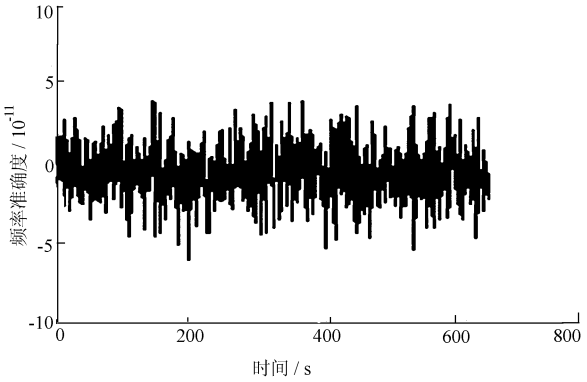


图 5 接收机 *D* 单颗星校频结果

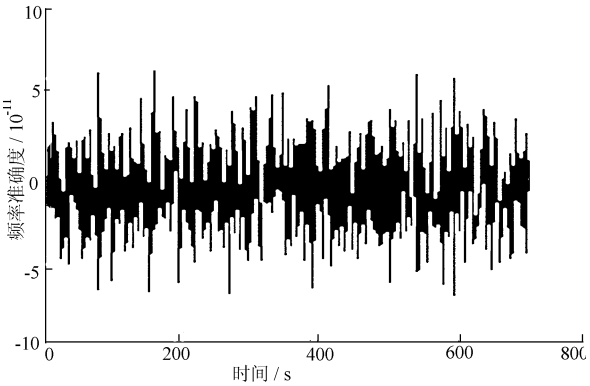


图 6 接收机 *A* 双星校频结果

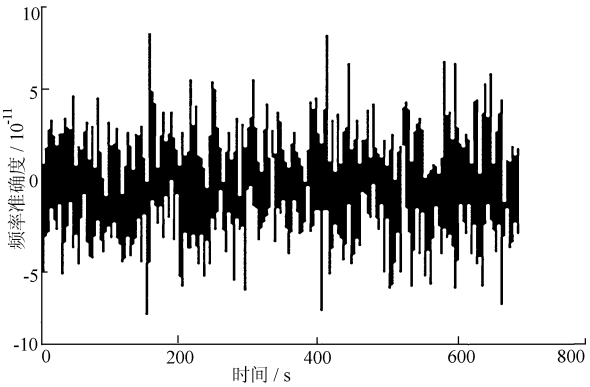


图 7 接收机 *D* 双星校频结果

10^{-11},能够满足绝大多数测量设备频率校准的要求. 利用单颗卫星和两颗卫星估计频率准确度结果虽然没有非常明显的差别,但是利用两颗卫星两台接收机对同一频标频率准确度的估计结果更为一致,利用多颗卫星校频,说明校频精度略有提高.

4 结 束 语

通过本文的分析和试验结果可知,在 GPS 测量中由于许多误差源在空间上呈现很强的相关性,在一定范围内这些误差对各测站影响基本相同,对站间时间同步精度影响很小,利用 GPS 可以实现纳秒级站间时间同步. 多星共视对测量噪声具有抑制作用,其时间同步精度优于单星共视的精度. 由于 GPS 卫星钟使用了稳定度极高的原子钟,因而利用 GPS 可以实现高精度实时校频,精度可达到 5.0×10^{-11},在许多测量系统具有重要应用价值.

参考文献 (**References**)

[1] 刘大杰,施一民,过静君. 全球定位系统(GPS)的原理与数据处理[M]. 上海:同济大学出版社,1999
Liu Dajie, Shi Yimin, Guo Jingjun. The principle of global positioning system (GPS) and its data processing[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1999 (in Chinese)

[2] 张世英,刘智敏. 测量实践的数据处理[M]. 北京:科学出版社,1977
Zhang Shiying, Liu Zhimin. The data processing of measurement practice[M]. Beijing: Science Press, 1977 (in Chinese)

[3] Adam Roulston, Nicholas Talbot, Zhang Kefei. An evaluation of various GPS satellite ephemerides[A]. IONGPS-2000[C]. Salt Lake City, UT, 2000. 45 ~ 54

[4] Gregory S Bierman. Error modeling for differential GPS[D]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 1995

[5] 黄 捷. 电波大气折射修正[M]. 北京:国防工业出版社,1999
Huang Jie. Atmosphere refraction correction[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999 (in Chinese)