

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.12.018

基于 GNSS 共视观测的时统数据处理技术

汪坤¹, 严发宝²

(1. 电子科技大学 空天科学技术研究院, 四川 成都 610054;
2. 中国兵器工业第五八研究所 军用电子产品事业部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对如何通过简单可靠的方法实现设备间的高精度时间同步问题, 对基于全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 共视法的时统信息处理关键技术进行研究。采用 Kalman 平滑滤波处理, 利用直接数字频率合成、精确分频移相技术, 提供高精度的时间信号和频率信号, 包括 5 MHz/10 MHz 标准频率信号、1pps 和串行时码数据等, 并分别进行短基线、超短基线测试, 同步精度分别优于 12 ns、10 ns, 同时标准频率信号的稳定度达到了 $2 \times 10^{-12}/s$ 。测试结果表明, 该方法能有效解决单站测量模式下的大时差跳动引起的观测误差问题。

关键词: 时间频率; GNSS; 共视; 移相; 时统; 分频

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A

Timing System Data Processing Based on GNSS Common View

Wang Kun¹, Yan Fabao²

(1. Institute of Air Space Science Technology, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China;
2. Dept. of Armament Electronic Products, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to simply and reliably obtain accurate timing synchronization among different devices, the paper investigates the key technology for the information procession based on global navigation satellite system (GNSS) common view method. By the Kalman filter, the direct digital frequency synthesis, and the precise frequency phase shift technology, high-precision time signals and frequency signals are provided, which include the standard frequency signal 5 MHz/10 MHz and the 1pps and serial time code data, and so on, and both the short baseline and ultra-short baseline experiments are taken to show that the time synchronization accuracy is better than 12ns and 10ns, respectively, and the standard frequency signal stability achieves at $2 \times 10^{-12}/s$. The testing results show that the method can eliminates the common observation error caused by the time difference jumping for the single station mode.

Keywords: time and frequency; GNSS; common view; phase shift; timing system; frequency division

0 引言

随着新型原子频标性能的迅速提高, 对远程时间传递技术的要求愈来愈高, 因此全球导航卫星系统 GNSS (Global Navigation Satellite System) 共视法 (Common View)、GNSS 全视法 (All-In-View)、卫星双向时间频率传递 (TWSTFT)、GNSS 载波相位 (CP Carrier Phase) 时间频率传递法、激光时间传递等技术先后发展起来并得到广泛应用。从罗兰 C 到 GNSS CP, 时间频率传递技术的日稳定度提高了 6~7 个数量级^[1-3]。其中, TWSTFT 虽然达到了亚纳秒级的精度, 甚至比 GNSS 码共视时间传递技术的精度高一个数量级^[4], 但是 TWSTFT 需要租用卫星, 设备比较昂贵。利用 GNSS 接收机并结合其他精密时间测量技术, 实现单用户、多用户之间的高精度时间同步是许多用户获得高精度时间信号的重要渠道之一, 并具有设计简单、信号精度高、价格较低等优点。随着 GNSS 的现代化, 我国北斗二

代系统的运行、Galileo 系统的建设完成, 也将拓宽更加广泛的应用领域。故在精确跟踪系统中, 对如何通过简单可靠的方法实现设备间的高精度时间同步问题进行研究。

1 GNSS共视原理

如图 1, GNSS 共视法是 2 个或多个观测站在共同视野内同时观测同一颗 GNSS 卫星, 从而消除共同观测误差, 实现测站之间高精度时间同步的一项技术。如果卫星不在共同视野内, 则要选择 GNSS 全视法或者中间过渡站。通过 GNSS 共视观测可以消除共同的卫星钟差和轨道误差, 由于大气层物理特性在较小的范围内相关性较强, 在短基线观测中, 又可以消除大部分的电离层延迟和对流层延迟误差, 测站之间通过无线或网络传输数据, 从而利用共视数据处理算法实现高精度的时间传递和同步。由于 GPS、GLONASS、北斗系统的时间分别溯源于 UTC (USNO)、UTC (SU) 和 UTC (NTSC),

收稿日期: 2010-07-15; 修回日期: 2010-09-01

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (ZYGX2009J087)

作者简介: 汪坤 (1984-), 男, 四川人, 硕士研究生, 从事测试计量及仪器研究。

因此要考虑时基的差异。为描述简单，把 GPS/GLONASS/BD 的时间尺度统一称为 GNSST。

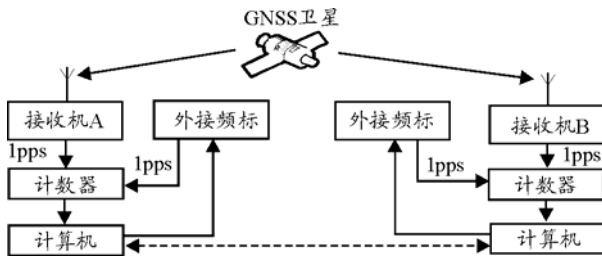


图 1 GNSS 共视原理框图

首先定义本地钟相对 GNSST 的钟差为 $\Delta T(t) = T(t) - t_{GNSST}(t)$ ，其中， $T(t)$ 为 t 时刻对应的本地钟时间， $t_{GNSST}(t)$ 为 t 时刻对应的 GNSS 系统时间。则在同一 GNSS 时刻 t ，多个观测站中的 A、B 两站相对于 GNSS 时间的钟差分别可记为：

$$\begin{cases} \Delta T_A(t) = T_A(t) - t_{GNSST}(t) \\ \Delta T_B(t) = T_B(t) - t_{GNSST}(t) \end{cases} \quad (1)$$

为消除共同观测的误差，式 (1) 有：

$$\Delta T_{AB}(t) = \Delta T_A(t) - \Delta T_B(t) = T_A(t) - T_B(t) \quad (2)$$

其中， $\Delta T_{AB}(t)$ 为 t 时刻 A、B 两站间的相对钟差。对于任意 2 个观测站 A 和 B，假设每次同时观测同一颗 GNSS 卫星 j 都有：

$$\begin{cases} R_{Aj} = T_A(t_A^R) - T_j(t^e) \\ R_{Bj} = T_B(t_B^R) - T_j(t^e) \end{cases} \quad (3)$$

其中， R_{Aj} 和 R_{Bj} 分别为 A、B 站的观测量； $T_A(t_A^R)$ 和 $T_B(t_B^R)$ 分别为 A、B 站接收同一 GNSS 卫星 j 发射信号的钟面时； t_A^R 和 t_B^R 分别为 A、B 站接收同一 GNSS 卫星 j 发射信号的 GNSS 时间； $T_j(t^e)$ 为 GNSS 卫星 j 发射信号的卫星钟面时， t^e 为 GNSS 卫星 j 发射信号的 GNSS 时间。由于 $T_A(t_A^R)$ 和 $T_B(t_B^R)$ 分别是 t_A^R 和 t_B^R 的函数，而 t_A^R 和 t_B^R 可以表示为：

$$\begin{cases} t_A^R = t^e + \tau_j^T + \tau_{Aj}^{spa} + \tau_A^R \\ t_B^R = t^e + \tau_j^T + \tau_{Bj}^{spa} + \tau_B^R \end{cases} \quad (4)$$

因此式 (4) 在 GNSS 时间 t^e 展开有

$$\begin{cases} R_{Aj} = T_A(t^e) - t^e + \tau_j^T + \tau_{Aj}^{spa} + \tau_A^R - \Delta T_j \\ R_{Bj} = T_B(t^e) - t^e + \tau_j^T + \tau_{Bj}^{spa} + \tau_B^R - \Delta T_j \end{cases} \quad (5)$$

其中， $T_A(t^e)$ 和 $T_B(t^e)$ 分别为 A、B 站在 GNSS

时间 t^e 的钟面时； τ_j^T 为卫星 j 的发射时延； τ_{ij}^{spa} ($i = A, B$) 为由卫星 j 到观测站 i 的空间传播时延（包括几何时延、电离层时延、对流层时延以及引力时延等）； τ_i^R ($i = A, B$) 为地面站 i 的接收时延（包括接收机时延和电缆等时延）； ΔT_j 为卫星 j 星载钟相对于 GNSS 系统时间的钟差（包括相对论周期项改正），可根据卫星的导航信息计算得到。考虑到各种误差的影响，卫星 j 到两站 A、B 的空间传播时延可以进一步表示为：

$$\begin{cases} \tau_{Aj}^{spa} = \tau_{Aj}^{tro} + \tau_{Aj}^{ion} + \tau_{Aj}^G + \tau_{Aj} + \tau_{Aj}^{sag} \\ \tau_{Bj}^{spa} = \tau_{Bj}^{tro} + \tau_{Bj}^{ion} + \tau_{Bj}^G + \tau_{Bj} + \tau_{Bj}^{sag} \end{cases} \quad (6)$$

其中， τ_{ij}^{tro} 、 τ_{ij}^{ion} 、 τ_{ij}^G ($i = A, B$) 分别为卫星 j 到地面 i 站的对流层时延、电离层时延和相对论引力时延； τ_{ij} 、 τ_{ij}^{sag} ($i = A, B$) 分别为计算时刻卫星 j 发射天线相位中心到地面 i 站接收时刻天线相位中心的几何距离时延和 Sagnac 效应时延。

将式 (5) 带入式 (6) 并求差可得：

$$\begin{aligned} \Delta T_{AB} = \Delta T_A - \Delta T_B = (R_{Aj} - R_{Bj}) - (\tau_A^R - \tau_B^R) - \\ (\tau_{Aj}^{tro} - \tau_{Bj}^{tro}) - (\tau_{Aj}^{ion} - \tau_{Bj}^{ion}) - (\tau_{Aj}^G - \tau_{Bj}^G) - \\ (\tau_{Aj} - \tau_{Bj}) - (\tau_{Aj}^{sag} - \tau_{Bj}^{sag}) \end{aligned} \quad (7)$$

其中： ΔT_{AB} 表示 A、B 两站的钟差， R_{ij} ($i = A, B$) 表示地面 i 站相对卫星 j 的时差， τ_i^R ($i = A, B$) 表示地面站 i 的接收时延（包括接收机时延和电缆等时延），式 (7) 即为任意两站 A、B 进行 GNSS 共视比对的计算模型。从式 (7) 可以看出，经过对 A、B 两站共视求差，卫星钟差和发射时延被完全消除。

如果改用 T_i 表示具体应用中各测站的时标，则各测站和 GNSST 之间的时差可以表示为：

$$\Delta T_i = GNSST - T_i \quad (8)$$

在应用中，对 ΔT_i 的大小要求不是考虑的最主要因素，主要关注的是 $|\Delta T_i - \Delta T_{i-1}|$ 的大小，即要求 $|\Delta T_i - \Delta T_{i-1}| \leq xms$ ，这样更加有利于各测站跟踪目标。图 2 为各测站之间的常用观测模式，时统安装于各个测站上，每个测站单独进行观测，记录观测结果 $\Delta T_i = GNSST - T_i$ ，然后传递观测结果，在主站进行共视比对计算，主站和副站之间可选择利用无线网络传递比对测量结果，各测站根据比对结果，软件实时监控进行移相，保证各台站之间的同步精度

实时控制在一定的精度范围内。

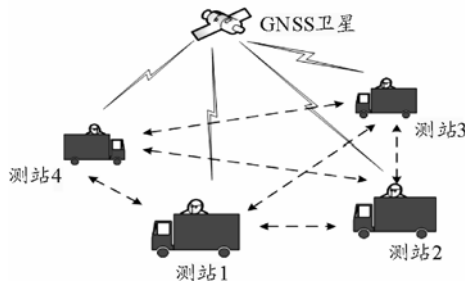


图 2 测站常用观测模式

2 信息处理模式

2.1 时统主要组成

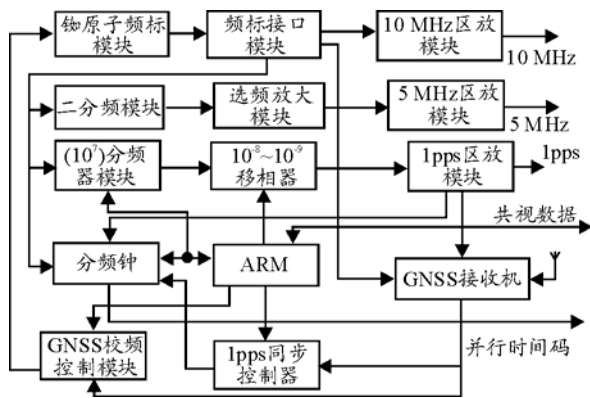


图 3 时统主要组成模块

时统主要组成如图 3, 图 3 中, 接收设备部分主要由 GNSS 接收机、外接频标模块、脉冲展宽电路等组成。外接频标选择 PRS10 型铷原子振荡器, 频率稳定度 $\leq 1 \times 10^{-11}$, $\tau = 1 \text{ s}$, 频率准确度为 $\pm 5 \times 10^{-11}$; 计数器选用 HP5350B 计数器。比较图 2 和图 3 看出, 该系统不同于一般意义上的共视比对处理, 一般意义上的 GNSS CV 不进行移相处理和驯钟, 而该系统增加了驯钟回路, 即当本地 1pps 和 GNSS 1pps 的差达到预定门限时, 则用控制软件发送移相指令对本地钟进行移相驯钟处理, 主要靠系统内部的 ARM 处理器完成。时统主要由频标模块、频标接口模块、10 MHz 区分放大模块、2 分频模块、5 MHz 选频放大模块、 10^7 (可变) 分频钟模块、 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 移相模块、1PPS 信号区分放大模块、北京时间分频模块、ARM、GNSS 接收机、显示器、1PPS 同步控制器等模块组成。频标部分由铷原子频标模块、频标接口模块、频标隔离放大模块组成; 定时部分 GNSS 定时接收机、定时方式选择切换模块组成; 标准时间产生 (移相板) 部分由 UTC/北京时间产生模块、1pps 秒信号分配放大模块、ASCII 码分配放大模块; RS422 共视数据发送/接收模块, 每个模

块的工作状态在前面板指示显示, 进行故障报警, 测站坐标信息、移相数据、主站、副站设置、UTC/BJT 切换等功能都在前面板可以进行设置。

2.2 共视算法处理

GNSS 共视算法是在共视基本原理的基础上改进设计的。目前广泛应用的 GNSS 接收机为多模多通道接收机, 但可以更加灵活的设计共视比对算法。传统的 GNSS 共视比对算法可以参考文献[3], 笔者对共视算法做了如下改进:

1) 跟踪长度是 240 s。1 次跟踪长度为 3 min, 加 1 min 的预置准备和数据处理, 全长为 4 min 跟踪时间。3 min 卫星跟踪每秒采集一个数据, 因此采集 180 个数据点, 对这 180 个数据点采用最小二乘拟合, 取中间两点的平均值作为该跟踪时间的时差。因此在一天时间中有 360 个数据计算点。

2) 卫星仰角选择大于 20° 。

3) 在主站接收到对应测站的传递数据时, 选择相同的观测历元, 对 2 个测站在同一时刻观测同一颗卫星, 从而消除卫星钟的误差。同时, 对于较小基线的测站, 可大大降低由于卫星位置误差和电离层干扰等引起的误差。处理流程见图 4。

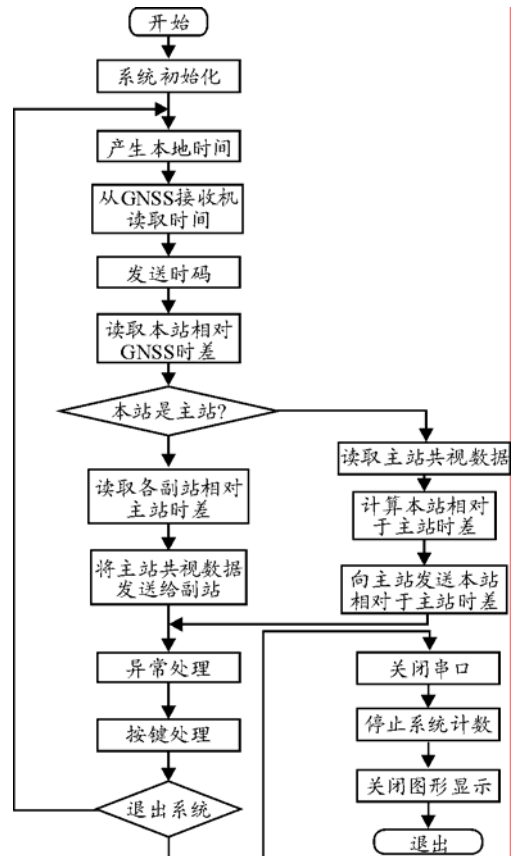


图 4 GNSS 共视数据处理流程

2.3 移相分频控制

移相分频控制电路是其中的关键技术之一。1 pps 时钟板中移相和分频主要由主控 CPU、移相器、 10^7 (可变) 分频器、1PPS 信号整形电路、TTL 到差分信号转换电路完成, 利用 10^7 (可变) 分频器, 产生 1 pps 信号, 在 CPU 的控制下对 1pps 信号进行精密移相, 移相范围为 000 000~999 999.9 μ s, 输出经过移相的 10 M 信号, 供其他设备使用; 控制 GNSS 接收机所输出的秒 (1pps) 信号可对分频器进行粗同步, 同步精度优于 0.1 μ s。 10^{-8} ~ 10^{-9} 移相器的主要功能是根据计算机或单片机的控制命令, 进行 10^{-8} ~ 10^{-9} 范围内的精密移相。使得通过它所输出的 1pps 信号与其它测站 10^{-8} ~ 10^{-9} 移相器输出的 1pps 信号同步精度优于 15 ns。移相采用 AD9852 实现。系统加电后, CPU 首先对 AD9852 进行初始化, 设置其工作方式。然后用 GNSS 接收机所输出的秒 (1pps) 信号对分频器进行粗同步, 之后一直等待处理命令。如果收到粗同步命令, 则用 GNSS 接收机所输出的秒 (1pps) 信号对分频器进行粗同步; 若收到移相命令, 则在此基础上对输出的 1PPS 信号进行移相。

2.4 Kalman 滤波处理

在设备等待下一组共视时差处理的过程中, 可以用 Kalman 滤波进行预测平滑。可以把任意一测站的观测时差建模为系统状态为标量时的 Kalman 滤波, 此时离散状态方程和观测方程可分别写为:

$$s_k = \Phi_{k,k-1}s_{k-1} + w_{k-1}; x_k = s_k + n_k \quad (9)$$

式中, s_k 为状态量, $\Phi_{k,k-1}$ 为状态转移矩阵, w_{k-1} 为扰动噪声, x_k 为观测量, n_k 为观测噪声, 其中, 离散状态方程和观测方程中噪声分量的统计特性服从假设 $E(w_k) = \mu_{w_k} = 0$, $E(w_j w_k) = \sigma_{w_k}^2 \delta_{jk}$, $E(n_k) = 0$, $E(n_j n_k) = \sigma_{n_k}^2 \delta_{jk}$ 。系统的初始状态分别为 $E(s_0) = \mu_{s_0}$, $Var(s_0) = \sigma_{s_0}^2$, 并且 s_0 与 s_0 , w_k 与 n_k 互不相关。

故可获得滤波方程和状态一步预测方程为:

$$\hat{s}_k = \Phi_{k,k-1} \hat{s}_{k-1} + K_k (x_k - H_k \Phi_{k,k-1} \hat{s}_{k-1}) \quad (10)$$

$$\hat{s}_{k+1|k} = \Phi_{k+1,k} \hat{s}_k \quad (11)$$

式 (10) 中, K_k 为滤波增益, $\hat{s}_0 = \mu_{s_0}$, $\epsilon_0^2 = \sigma_{s_0}^2$ 。

3 实验结果

为了测量时统的时间同步精度和频标稳定度, 分别进行了超短基线、短基线比对测量。在超短基线测量中, 各台设备的 GNSS 天线架在某大楼楼顶, 天线四周开阔, 避免了多路径干扰, 信号接收良好; 短基线测量的一台设备选择在某单位大楼楼顶, 另外一台设备天线安装在相距 80 km 的某单位测试车上; 短基线和超短基线的测试结果表明, 各时统之间进行共视数据处理后, 各台站之间的时间同步精度能够控制在 15 ns 以内。图 5 给出了其中一组段基线观测的结果, 同步精度 12.4 ns, 偏差 2.1 ns。图 6 给出了其中一组超短基线的观测结果, 同步精度 10.6 ns, 偏差 2.9 ns。在观测周期中, 每个单站采用 Kalman 预测, 抑制了时差的较大跳动。

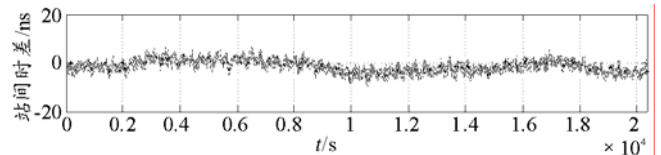


图 5 短基线测试

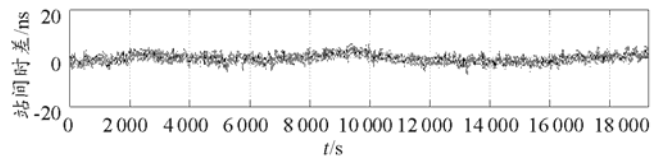


图 6 超短基线测试

4 结论

经过短基线、超短基线测试, 最差同步精度分别为 12.4 ns 和 10.6 ns, 标准频率信号的稳定度达到了 $2 \times 10^{-12} / 1s$ 。测试结果表明, 该方法能解决单站测量模式下的大时差跳动引起的观测误差问题。

参考文献:

- [1] B Guinot and E F Arias. Atomic time keeping from 1955 to present[J]. Metrologia, 2005, 42(3): 20-30.
- [2] Thomas E. Parker and Demetrios Matsakis. Time and Frequency Dissemination Advances in GNSS Transfer Techniques[J]. GPS world, 2004, 15(11): 32-38.
- [3] D.W.Allan and C.Thomas. Technical Directives for Standardization Software[R]. Paris: International Reports: Metrologia, 1994: 69-79.
- [4] P. Tavella, V. Pettiti, R. Costa, D. Orgiazzi, Description of the GPS Common View Data Processing Algorithm"; Technical Note n.14 issue 1.0 del 25/7/03 for Galileo System Test Bed V1.
- [5] 李滚. GPS 载波相位时间传递研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文, 2007.