

高实时性 GPS 时间比对接收机实现方案

黄艳¹, 高原², 张晗¹, 李波³

(1. 北京市计量检测科学研究院, 北京 100029; 2. 中国计量科学研究院, 北京 100029;
3. 蓝星(北京)化工机械有限公司, 北京 100176)

摘要: 全球定位系统(global positioning system, GPS) 共/全视法的核心是 GPS 时间比对接收机及后处理算法. 自主研制了基于 EURO-160 GPS 引擎的高实时性 GPS 多通道时间比对接收机及实时数据处理算法. 为了验证接收机的精度, 与国外商用 GPS P3 码接收机进行了零基线共钟与零基线不共钟的实验. 实验结果表明, 研制的高实时性 GPS 时间比对接收机与国外商用 GPS P3 码接收机技术水平相当.

关键词: 计量学; 时间频率传递; 全球定位系统(global positioning system, GPS) 共/全视法; GPS 时间比对接收机
中图分类号: P 228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-0037(2013)08-1166-06

Development of the High Real-time GPS Time Transfer Receiver

HUANG Yan¹, GAO Yuan², ZHANG Han¹, LI Bo³

(1. Beijing Institute of Metrology, Beijing 100029, China; 2. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;
3. Bluestar (Beijing) Chemical Machinery Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: Global positioning system (GPS) common/all-view method is currently international hot technology for long-distance time and frequency transfer, and it is also one of the main tools. Its core is the GPS time transfer receiver and post-processing algorithms. The high real-time multi-channel GPS time transfer receiver based on EURO-160 GPS board and the real-time data processing algorithms are introduced in this paper. To verify the accuracy, the experiments of common clock and non-common clock on zero-based line with the foreign commercial GPS P3 code receivers are carried out. Results show that the high real-time GPS receiver and the foreign commercial GPS P3 code receiver have the same technology level.

Key words: metrology; time and frequency transfer; global positioning system(GPS) common/all-view method; GPS time transfer receivers

时间是国际单位制中 7 个基本物理量之一, 是目前所有物理量中准确度最高的物理量. 各国家或地区使用的标准时间都要直接或间接溯源到国际计量局(Bureau International des Poids et Mesures, BIPM)建立的协调世界时(coordinated universal time, UTC). 目前采用的溯源方法主要是利用全球定位系统(global positioning system, GPS)共/全视法和卫星双向法进行远距离国际比对^[1-4]. 使用 GPS

共/全视法时频传递技术, 用户可将 GPS 作为一种媒介, 直接与国家级守时实验室的原子钟实现同步, 即直接溯源到国家标准时间. 同时, 国家守时实验室也可通过 GPS 共/全视法参与国际原子时(international atomic time, TAI)和 UTC 的计算, 由 BIPM 定期公布该国家守时实验室和标准 UTC 的时差. 这样, 通过国家守时实验室, 使用 GPS 共/全视技术的用户可进一步溯源到国际标准时间 UTC^[5-7].

收稿日期: 2012-02-20.

基金项目: 国家科技基础条件平台建设计划(PT0610-2).

作者简介: 黄艳(1973—), 女, 高级工程师, 主要从事时间频率计量方面的研究, E-mail: huangy11@sina.com.

GPS 共/全视系统的核心是 GPS 时间比接收机及后处理算法。为了适应原子频标的发展及远距离高精度时间频率传递的需要,许多国家开展了测地型 GPS P3 码双频接收机的研究^[8-10]。近年来, BIPM 要求逐渐采用接收数据比较稳定的 GPS 双频接收机,于是许多国内外计量院利用商品化 GPS 接收引擎自行开发 P3 码双频接收机,取得了良好效果^[11-14]。本文按照 BIPM 的要求,自主研制了高实时性 GPS 时间比接收机,并参加了 TAI 合作,实现了时间频率量值的传递和溯源。

1 基本原理

GPS 时间比接收机,实际上是一种集成系统,由 GPS 接收引擎和相关的硬件和软件组成,主要用于 GPS 共/全视时间传递技术。基于 EURO-160 GPS 引擎的 GPS 时间比接收机组成如图 1 所示。EURO-160 引擎与 TIC 计数卡共同集成在接收机内部,由单片机控制,通过总线与计算机传递数据。

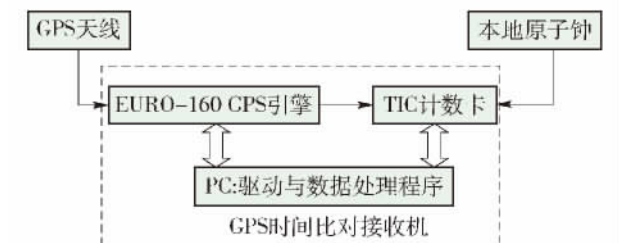


图 1 GPS 时间比接收机的组成
Fig. 1 GPS time transfer receiver

计数卡将接收机输出的每秒 1 个脉冲信号作为开门脉冲,将本地原子钟的每秒 1 个脉冲信号作为关门脉冲,测量出 2 个秒脉冲之间的差值作为时间间隔值,如图 2 所示。

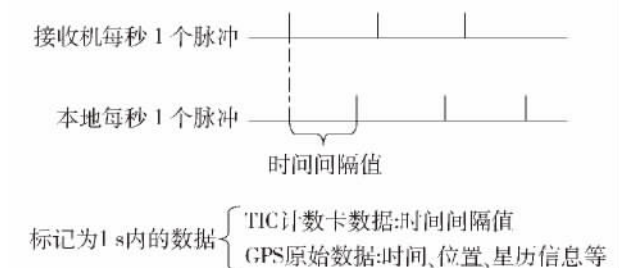


图 2 TIC 计数卡工作原理
Fig. 2 Working principle of TIC counting card

在每一秒周期内的关门脉冲之后,下一秒开门脉冲到来之前,计数卡将测量的时间间隔值发送给计算机,同时计算机还会收到 GPS 接收引擎发来的时间、位置和星历等原始信息,由程序标记为 1 s 内

的数据。然后由上层软件对时间间隔值进行修正和拟合运算,最后写入标准数据文件。来自 GPS 引擎的原始数据为二进制信息,还应解码、存储之后才能使用。这 2 部分原始数据经过数据处理运算后可得到标准数据文件中所需的一系列参数。

2 硬件与底层软件设计

高实时性 GPS 时间比接收机主要由 3 部分组成:自主研制的高精度时间间隔计数卡(TIC 卡)、EURO-160 GPS 引擎及上层和底层应用程序。

TIC 卡和 GPS 引擎属于接收机的硬件部分。TIC 卡为一块与 PC 总线兼容的插卡,插入计算机中,与接收机和计算机组合为一台整机,其主要功能是测量本地秒脉冲信号与 GPS 秒脉冲信号的差值,并作为 GPS 引擎的数据转发器和控制器。EURO-160 GPS 引擎具有解码并输出 GPS 信号的功能。应用程序包括上层和底层软件,上层软件为 Windows 桌面应用程序,主要完成数据的处理、保存和显示,具有图形化数据显示界面和接收机功能设置的用户接口;底层软件包括动态链接库(DLL)和设备驱动程序,动态链接库用于为用户应用程序和设备之间提供接口,设备驱动程序作为 DLL 与总线之间的接口,完成总线 I/O 端口读写功能。

接收机的硬件和底层软件可划分为 5 个模块:硬件电路、单片机控制部分、总线端口、设备驱动程序、动态链接库程序。每个模块中分别有不同的工作部件完成不同的功能,各部件之间处于并行关系。图 3 为该 GPS 时间比接收机硬件部分、底层软件部分各部件工作时序。

由图 3 可看到,各部件之间的工作在时序上是

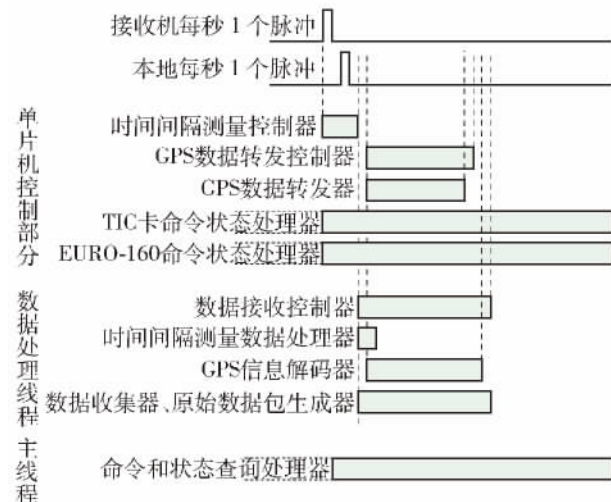


图 3 各部件工作时序
Fig. 3 Sequence of components

交叉、同时进行的。多部件同时、并行工作,在时序交叉的部分容易引起冲突,因此在稳定性和实时性方面对接收机硬件和底层软件设计提出了更高的要求。

如图3所示, GPS时间比对接收机的数据处理周期为1 s,时间间隔测量值最先测得,大部分数据转发、采集和解码操作都集中在开关门脉冲结束后的一小段时间内,与命令状态查询操作并行进行。系统在下一个秒脉冲到来之前,就必须尽快做好测量、状态控制查询、数据传输、数据解码等所有的工作,还要为上层软件的数据处理留出更多的时间,因此实现系统的高实时性是必须的要求,也是实现高稳定性的基础。因此,在硬件及软件设计中,主要采用了双通道设计及多线程DLL、秒标识等关键技术,在实现高实时性的同时保证了高稳定性。本文采用的解决方案如图4所示。

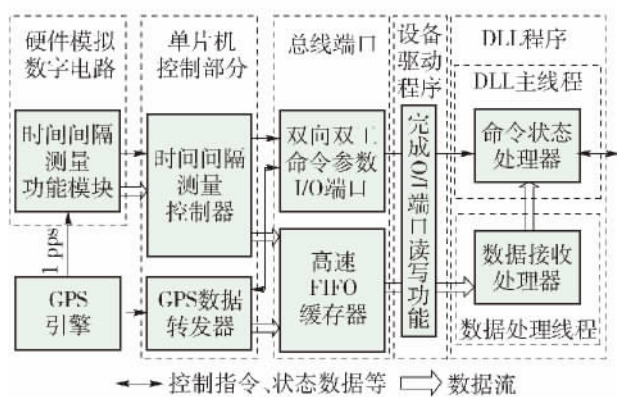


图4 控制和数据流实时处理解决方案

Fig. 4 Block diagram of the control and data flow real-time processing solution

2.1 硬件设计要点

2.1.1 单片机和总线端口采用了双通道设计

单片机控制部分分为时间间隔测量控制器和GPS数据转发器2部分,使时间间隔值和GPS数据包分两路并行传输。总线端口使命令传输通道和数据传输通道分离。命令传输通道采用双向双工的I/O端口设计,发送和接收来自计数卡、GPS引擎和动态链接库的控制、状态信息,成为整个系统控制命令的中转站。数据传输通道采用高速FIFO数据缓存器,来自计数卡和GPS引擎的两路数据经过高速缓存器到达数据处理程序,使数据传输速度大大增加。这样两路通道相互隔离,在硬件上保证了系统的高实时性。

2.1.2 TIC卡的设计

采用了大规模可编程逻辑器件,做成一块与计

算机总线兼容的插卡,具有体积小、准确度高的特点。此卡采用内插方法,分辨率优于100 ps,测量准确度达1 ns。

2.2 底层软件设计要点

2.2.1 动态链接库多线程工作

目前的Windows操作系统都支持多线程工作,为系统提供了同时处理多任务的能力。动态链接库设计为多线程模式,主线程为命令状态处理器,负责控制命令的双向传输,数据处理线程负责数据的接收和存储,使查询控制命令与数据处理分别同步进行,相互独立。

2.2.2 引入互斥量解决端口冲突

多线程工作虽然提高了响应速度,但是由于操作系统中两个线程共享虚拟地址空间,因而可能发生某个线程访问计算机I/O端口的同时另一个线程也访问同一端口的情况,这将导致线程冲突和阻塞,引起程序崩溃。为解决这个问题,程序中引入了互斥量对象,使同一时刻只允许一个线程访问端口,有效避免了同一端口同时访问的问题,使得程序在高实时性的同时也具有高稳定性。

2.2.3 设置秒标识

由于数据处理要求每秒1个周期,但在采集到的数据信息中并没有实际的秒标识。系统中数据流是以串行码的方式发送的,如何在串行码流中找到秒标识是个难点。在本文的解决方案中,将时间间隔测量值用作秒标识,确保数据在2个秒标识之间转发并处理完毕,因此保证了系统的高实时性。

3 上层软件设计

上层软件用于完成对原始数据实时、连续地处理,并提供界面以显示数据图形和各种GPS信息及为接收机功能设置提供接口,产生的标准数据文件可方便地为远程时间传递服务。软件根据CCTF发布的GPS接收机软件标准化技术指南^[15]和EURO-160接收机编程手册编制,用Visual C++ 6.0在WindowsXP操作系统上实现。

3.1 算法分析

根据GPS接收机软件标准化技术指南规定的数据处理算法,每1秒的时间间隔值需要经过一系列的拟合和修正运算,最终得到的数据才能用于共视比对^[16]。

指南规定每次跟踪GPS卫星时间为16 min,其中前2 min等待,后13 min(780 s)收集数据,最后1 min做处理。一次卫星跟踪周期内的数据处理算法

如图 5 所示. 收集到的 780 s 数据被分为 52 组, 每组有 15 个测量值(测量值 1 s 一个), 这 15 个数值作一个二次曲线拟合, 然后对拟合结果作各项时延修正. 在 13 min 的跟踪周期内会有 52 组二次曲线拟合, 每组拟合取其中点值, 得到由 52 个数值组成的一个数组. 然后用标准最小方差求这个数组的一次线性方程. 这个一次线性方程的中点值就是整个 13 min 跟踪周期的最终结果. 与结果有关的参数(一次线性方程的斜率、残差的均方根 RMS 等)也同时给出. 最终得到的数据写入标准数据文件中的 REFGPS 参数, 是两地时间比对最重要的参考数据.

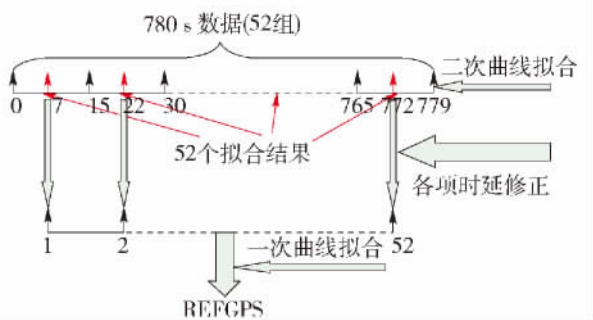


图 5 一次卫星跟踪周期内的数据处理

Fig. 5 Data processing method of a satellite tracking period

在指南规定的各项时延修正中, 电离层时延是影响共视比对最重要的误差来源, 呈周日性变化, 修正方法主要有模型法修正和双频实测值修正^[17-18]. 单频接收机采用模型法, 至多只能修正实际电离层影响的 60%. 根据电离层的折射率是工作频率的函数这一特性, 双频 P3 码接收机利用 L1/L2 两个频率上测得电离层时延, 可较大地提高共视传递的精度.

本文采用的 P3 码修正公式为

$$P = \frac{P_2 - \gamma P_1}{1 - \gamma} \quad (1)$$

式中: $P_i (i=1, 2)$ 是分别在 L1 和 L2 频段上的电离层时延测量值; P 是通过两个频段电离层时延计算得到的双频电离层修正值. 而 γ 用式(2)计算:

$$\gamma = (f_{L1}/f_{L2})^2 = (1575.42/1227.6)^2 = (77/60)^2 \quad (2)$$

由于 2 个频段的电离层延时不一样, 通过修正式(1)(2)可更好地对电离层时延进行修正.

3.2 用户程序界面

为了方便用户观测数据, 软件设计了用户程序界面, 显示共视比对和 GPS 卫星的相关信息, 并随时更新状态和变化. 用户程序界面如图 6 所示.

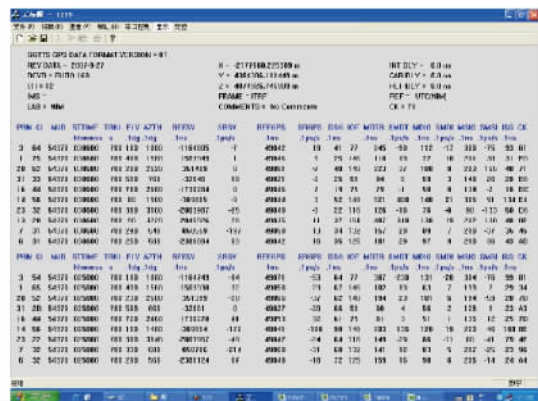


图 6 用户程序界面

Fig. 6 User program interface

系统经过数月的调试, 已经在中国计量科学研究院原子钟房连续稳定运行, 得到了满意的效果. 图 7 为研制的高实时性 GPS 时间比对接接收机.



图 7 高实时性 GPS 时间比对接接收机

Fig. 7 High real-time GPS time transfer receiver

4 实验结果

4.1 零基线共钟试验

使用高实时性 GPS 时间比对接接收机与一台国外商用 P3 码接收机 SEPT POLARX2 做零基线共钟比对. 高实时性 GPS 时间比对接接收机使用单频 CA 码观测, 观测数据在 MJD(约化儒略日) 54 312 ~ 54 316 之间, 每 16 min 一个取样点, 共采集了 5 d 数据. 图 8 为比对结果, 横坐标代表相邻 2 点之间间隔 16 min, 频差为 -1.33×10^{-14} , 均方根误差(RMSE)为 2.2 ns. 从图 8 可看出数据呈现周日性变化.

图 8 为高实时性 GPS 时间比对接接收机的 CA 码与国外商用 P3 码接收机的 P3 码的比对结果, 由于 CA 码是单频观测, 使用电离层模型进行修正, 因此数据呈现周日性变化, 但是由于电离层延迟对于零基线比对影响不大, 仍能得到 2.2 ns 的比对精度.

又用 2 台 EURO-160 接收机进行了零基线共钟实验, 2 台都使用 ionofree P3 码观测, 观测数据在

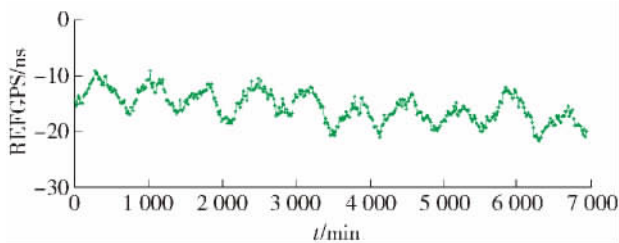


图8 零基线共钟1(MJD54312-54316) 比对结果

Fig.8 Experiment result of common clock on zero-based line

MJD54559 ~ 54561 之间,每 16 min 一个取样点,共采集了 3 d 数据。图 9 为比对结果,横坐标代表相邻 2 点之间间隔 16 min,频差为 -0.875×10^{-14} , RMSE 为 1.45 ns。从图 9 可看出数据没有明显的周日性变化。

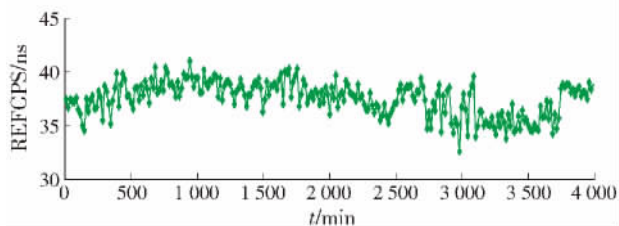


图9 零基线共钟2(MJD54559-54561) 比对结果

Fig.9 Experiment result of common clock on zero-based line

2 台接收机使用完全相同的数据处理过程,数据的 RMSE 为 1.45 ns,此结果与国际上其他实验室研制的 P3 码接收机的比对精度水平相一致。

4.2 零基线不共钟试验

使用高实时性 GPS 时间比对接收机与 1 台国外商用 P3 码接收机 SEPT POLARX2 做零基线不共钟比对,高实时性 GPS 时间比对接收机连接 1 台铷钟,国外商用 P3 码接收机 SEPT POLARX2 连接 1 台铯钟,2 台接收机均使用 P3 码进行观测,测试范围为 MJD54502 ~ 54506,每 1 h 一个取样点。图 10 为比对结果,上方曲线是 2 台接收机的 REFGPS 之差,频差为 -1.54×10^{-14} ,RMSE 为 3.41 ns,下方曲线是铷钟与铯钟直接比对的钟差,频差为 -1.66×10^{-14} ,RMSE 为 3.15 ns。

图 10 所示的零基线不共钟比对结果,反映了 2 台接收机测得的数据与 2 台钟直接比对之间的差异,图中可看出 2 条曲线吻合得很好,频差相当接近,说明接收机的时间传递性能很好。2 台接收机数据的 RMSE 比直接比对钟差稍大,这是由于接收机内部引入了噪声。

零基线共钟与零基线不共钟的实验结果说明,本文研制的高实时性 GPS 时间比对接收机与国外

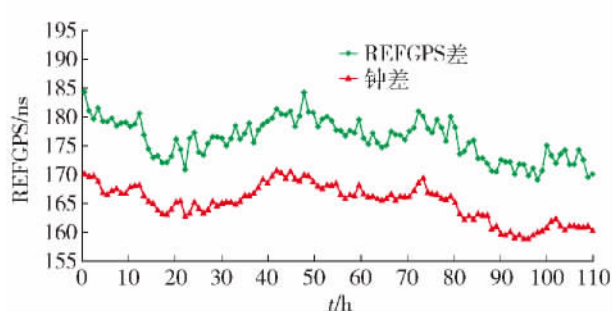


图10 零基线不共钟(MJD54502-54506) 比对结果

Fig.10 Experiment result of non-common clock on zero-based line

商用 P3 码接收机技术水平相当。

5 结论

1) 基于 EURO-160 GPS 引擎,研制成功了高实时性 GPS P3 码时间比对接收机。软硬件解决方案中的双通道通讯、双向双工的总线端口设计、动态链接库的双线程工作、实时显示界面等措施帮助系统实现了高实时性。

2) 由于 EURO-160 接收机具有优良的性能,如实测电离层修正、用载波相位平滑数据、毫米级的定位精度、10 cm 的码测量精度和 0.1 mm 的载波相位测量精度、多径抑制算法等,其输出的原始数据本身就具有很高的精度,又采取了其他措施以进一步提高比对精度,如精确测定了天线坐标,数据处理中剔除了异常数据,使接收机外接 10 MHz 频率源,不跟踪低仰角卫星等,实验证明达到了很好的效果,因此比对结果的频差和均方根误差准确地反映了系统的噪声水平。

3) 本系统已经在中国计量科学研究院原子钟房连续稳定运行,得到了满意的效果。资料表明,当前多通道 GPS 接收机比对精度已达 5 ns 以内,P3 码接收机比对精度在 3 ns 以内,研制的高实时性 P3 码时间比对接收机的零基线比对精度为 1.45 ns,与现用的代表国际先进水平的 P3 码时间比对接收机相比:噪声水平相当,达到了国际先进水平。

4) 高实时性 GPS 时间比对接收机,不仅可参与国家守时实验室之间的时间频率比对,还可使用户直接与国家级守时实验室的原子钟实现同步,即直接溯源到国家标准时间,为完善中国的时间频率传递体系作出贡献。

参考文献:

[1] 高小珣,高源,张越,等. GPS 共视法远距离时间频率传

- 递技术研究[J]. 计量学报, 2008, 29(1): 80-83.
- GAO Xiao-xun, GAO Yuan, ZHANG Yue, et al. GPS common view method for remote time and frequency transfer [J]. Acta Metrologica Sinica, 2008, 29(1): 80-83. (in Chinese)
- [2] LEVINE J. A review of time and frequency transfer methods [J]. Metrologia, 2008, 45(6): 162.
- [3] 朱江淼, 韩东, 高源, 等. 卫星双向法时间频率比对系统的研究与构建 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(3): 509-516.
- ZHU Jiang-miao, HAN Dong, GAO Yuan, et al. Research and establishment of two way satellite time and frequency transfer system [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(3): 509-516. (in Chinese)
- [4] 朱江淼, 韩东, 高源, 等. 卫星双向时间频率比对数据处理及其误差分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(增刊): 238-245.
- ZHU Jiang-miao, HAN Dong, GAO Yuan, et al. Data processing and error analysis of two-way satellite time and frequency transfer [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(sup): 238-245. (in Chinese)
- [5] PIESTER D, BAUCH A, BREAKIROU L, et al. Time transfer with nanosecond accuracy for the realization of international atomic time [J]. Metrologia, 2008, 45(2): 185.
- [6] ESTEBAN PALACIO H, GALINDO J, et al. Improved GPS-based time link calibration involving ROA and PTB [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2010, 57(3): 714-720.
- [7] LIANG K, FELDMANN T, BAUCH A, et al. Summary of the link calibration between NIM and PTB using a traveling GPS receiver [C] // Joint Conference of the IEEE International: Frequency Control and the European Frequency and Time Forum, San Fransisco, May 2-5, 2011: 280-285.
- [8] LIAO C. Around-the-world GPS common-view closures with conventional P3 and smoothed P3 codes [J]. Electronics Letters, 2006, 42(11): 646-647.
- [9] LI Gun, LI Bian, DONG Shao-wu. A comparative study of GPS P3 and GPS L3 [C] // Proceedings of the 2005 IEEE International: Frequency Control Symposium and Exposition, Vancour, August 29-31, 2005: 672-676.
- [10] YANG Sung-hoon. Time comparison by GPS C/A, GPS P3, GPS L3 and TWSTFT at KRISS [C] // Proceedings of the 2005 IEEE International: Frequency Control Symposium and Exposition, Vancour, August 29-31, 2005: 716-720.
- [11] 杨旭海, 胡永辉, 李志刚. 基于 Motorola VP Oncore 接收机的新型 GPS 共视时间传递系统 [J]. 电子测量与仪器学报, 2005, 19(2): 15-19.
- YANG Xu-hai, HU Yong-hui, LI Zhi-gang. New GPS common-view time transfer system based on motorola VP oncore receiver [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2005, 19(2): 15-19. (in Chinese)
- [12] 张越, 高小珣, 高源, 等. 多通道 GPS 共视法时频传递接收机的研制 [J]. 宇航计测技术, 2004, 24(2): 35-39.
- ZHANG Yue, GAO Xiao-xun, GAO Yuan, et al. Research on multi-channel GPS common-view method time & frequency transfer receiver [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2004, 24(2): 35-39. (in Chinese)
- [13] YERABATI S, HU Z, ELKEELANY O. Real-time GPS receiver implemented using altera FPGA board [C] // Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2010, Concord, March 18-21, 2010: 332-337.
- [14] ZHANG Lei, WANG Jian-yu. System design and signal processing of optimized GPS SR receiver [C] // International Conference on Computer Design and Applications, Qinhuangdao, June 25-27, 2010, 14: 104-107.
- [15] ALLAN D W, THOMAS C. Technical directives for standardization of GPS time receiver software [J]. Metrology, 1994, 31(1): 69-79.
- [16] JIANG Z, LEWANDOWSKI W. Some remarks on the CCTF CGGTTS format [C] // Joint Conference of the IEEE International: Frequency Control and the European Frequency and Time Forum, San Fransisco, May 2-5, 2011: 317-322.
- [17] 苏建峰, 王正明. GPS 共视时间比对中的电离层时延改正问题 [J]. 时间频率学报, 2003, 26(2): 144-152.
- SU Jian-feng, WANG Zheng-ming. Ionospheric time delay corrections for GPS time transfer [J]. Journal of Time and Frequency, 2003, 26(2): 144-152. (in Chinese)
- [18] FUJIEDA M, IMAE M, SHIBUYA Y. Effects of ionospheric correction on GPS time transfer throughout Asia [J]. Metrologia, 2004, 41(3): 145-151.

(责任编辑 杨开英)