

基于导航卫星的高精度授时技术

左兆辉*, 戴群雄, 王铮

(中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050081)

摘要: 基于导航卫星授时长期稳定度高的特点, 结合铷原子钟优良的短期稳定度和低漂移率特性, 提出了一种高精度授时技术。以导航接收机 1 PPS 为基准对铷原子钟进行驯服, 通过高精度时差测量、卡尔曼滤波、增量式 PID 算法 3 个关键技术对外提供高精度授时服务。验证结果表明, 输出 1 PPS 相位稳定性达到 ± 0.2 ns 以内, 驯服期间 1 s 稳定度达到 3.76E^{-12} 。

关键词: 有效性检查; 驯服; 状态控制; 高精度授时

中图分类号: TP368.1

文献标识码: A

High-precision timing technology based on navigation satellite

ZUO Zhaohui, DAI Qunxiong, WANG Zheng

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Based on the long-term stability of navigation satellite timing, combined with the excellent short-term stability and low drift rate of rubidium atomic clock, a high-precision timing technology is proposed. It tames the rubidium atomic clock based on 1 PPS of navigation receiver to provide high-precision timing service through three key technologies: precise clock difference measurement, Kalman filtering, and incremental PID algorithm. The verification results show that the phase stability of the output 1 PPS reaches within ± 0.2 ns, the stability reaches 3.76E^{-12} at 1 s during taming.

Keywords: effectiveness check; tame; state control; high-precision timing

0 引言

GNSS(Global Navigation Satellite System)是全球卫星导航系统的总称,现有的卫星导航系统包括 BDS、GPS、GLONASS、Galileo、QZSS、SBAS 等,其中 BDS、GPS、GLONASS、Galileo 为全球卫星导航系统,其他为区域增强系统。

GNSS除了具有导航、定位等功能外,还可利用导航卫星上搭载的高精度原子钟进行授时。通过 GNSS 进行授时,具有低成本、高精度、广域性、开放性和可对移动用户服务等特点,成为当前主要的授时方式,得到了广泛研究^[1]。GNSS 授时方式包括单向授时和双向授时^[2]两种。其中,双向授时为授权服务,本文所述 GNSS 授时均为单向授时,即由接收机自主计算完成授时。

基于导航卫星的授时设备通常由 GNSS 接收天线、GNSS 接收机、本地频率源、时频信号处理、电源等功能单

元组成。

1 高精度授时实现

高精度授时技术是时频领域的一项关键技术,授时指标与环境、系统硬件设计、软件设计等多方面有关。不同的天线、GNSS 接收机、内部信号处理流程等都能决定授时指标的好坏。

高精度授时技术一般包括时源信息数据池设计、外部时源信号处理、高精度时差测量、本地频率源驯服等步骤。

1.1 时源信息数据池设计

根据时源信号(北斗、GPS)的特性,时频信号处理单元记录北斗、GPS 时源的数据池,保存时源的基本信息和时差数据,时源信息数据池的内容主要包括以下要素:时源类型为北斗或 GPS、时间和时区信息、位置信息、1 PPS 时差数据。

左兆辉(工程师),戴群雄、王铮(高级工程师):主要研究方向为卫星导航、时间频率。

* 通信作者, E-mail: anchorzuo@126.com。

GNSS 接收机每秒送出时源的 TOD 信息,用于更新时源信息数据池中的基本信息。时频信号处理单元采用基于硬件平台的高精度时差测量技术,实时测量时频信号处理单元产生的 1 PPS 与 GNSS 接收机输出 1 PPS 的时差,更新时源信息数据池中的 1 PPS 时差数据。

1.2 外部时源信号处理

外部时源信号处理流程如图 1 所示,外部时源信号(北斗、GPS)处理主要包括时源类型鉴别、时源 1 PPS 有效性判断、时源 TOD 有效性判断、时源时间跳变检测、时源信息数据池更新以及时源状态上报等功能。

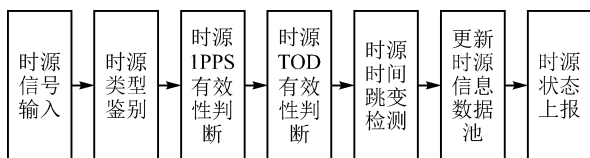


图 1 外部时源信号处理流程图

Fig. 1 External time source signal processing flowchart

1.2.1 时源类型鉴别

根据接收机 TOD 报文中的时源类别字节鉴别时源类型。

1.2.2 时源 1 PPS 有效性判断

时频信号处理单元以本地频率源为基准,每秒测量 GNSS 接收机输出 1 PPS 与时频信号处理单元产生的 1 PPS 的时差,根据前后两秒的时差判定外部时源 1 PPS 信号的有效性。针对北斗/GPS 的时源特性,若前后 2 s 的时差大于 50 ns,则判定外部北斗/GPS 时源的 1 PPS 异常,授时设备进入自主守时模式,避免在信号不好或者是强干扰情况下的异常情况。

1.2.3 TOD 有效性检查

检查 TOD 校验和,对比前后两秒的 TOD 时间信息,判断 TOD 时间是否连续,若 TOD 无效,设备进入守时模式。时源 TOD 有效性判断流程如图 2 所示。

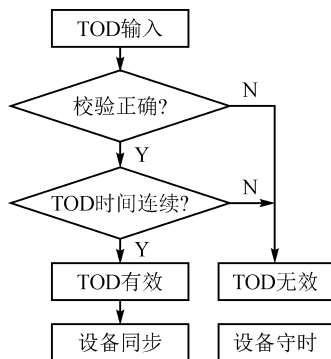


图 2 时源 TOD 有效性判断流程图

Fig. 2 Flow chart for determining the validity of time source TOD

1.2.4 时间跳变侦测

若本地时间有效(同步输出或守时输出),实时侦测外部时源参考 TOD 时间,如外部时源参考 TOD 与本地时间不一致,产生时间跳变日志及告警,授时设备自动进入守时状态。时间跳变侦测流程如图 3 所示。

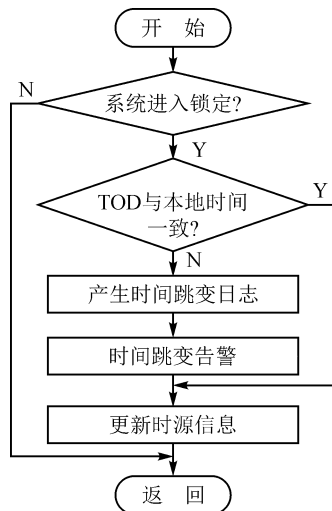


图 3 时间跳变侦测流程图

Fig. 3 Flow chart of time jump detection

1.3 本地频率源驯服

本地频率源驯服主要包括相位同步和频率同步,时频信号处理单元设计驯服模块,可实现对设备的频率源的频率控制和时间同步。

驯服模块测量出本地频率源与北斗/GPS 导航信号之间的频率差,将频率调节控制字转换为铷钟频率控制字,调节铷钟输出频率,实现铷钟的频率调节。

在设备完成预热、外部时源有效时,以授时设备与主用外部时源的时差信息为基准,调节铷钟的频率,当时差变化过大时,进入相位调节模式,直接调整授时设备输出的 1 PPS 相位;当时差变化满足频率调节条件时,将时差转换为频率调节控制字,调整铷钟频率,实现与北斗/GPS 外部时源的高精度同步。

驯服流程如图 4 所示。

1.4 时源跟踪同步状态控制

授时设备跟踪外部北斗/GPS 时源参考,跟踪、同步、锁定状态机如图 5 所示。

如图 5 所示,在北斗/GPS 参考有效时,进入跟踪;以严进宽出的原则连续 120 s,同步精度优于 10 ns 后,判定系统进入锁定状态;当连续 60 s,同步精度大于 10 ns,从锁定转入跟踪模式。在参考无效时,系统进入保持模式,根据参考有效期间的驯服数据,采用高精度守时算法实时补偿,实现授时设备的高精度守时功能。

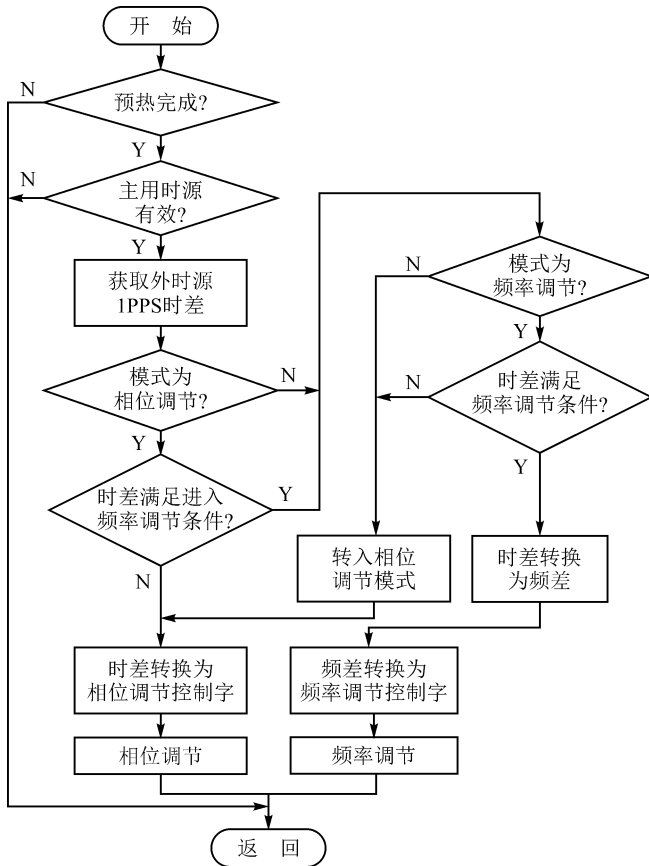


图 4 驯服流程图

Fig. 4 Taming process diagram

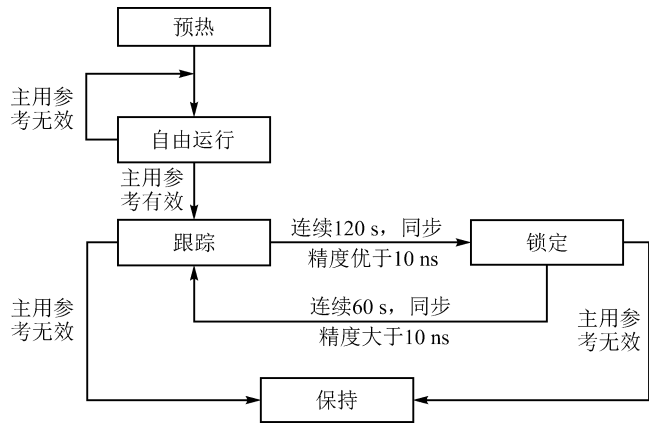


图 5 参考同步状态机

Fig. 5 Reference synchronous state machine

2 高精度授时关键技术

2.1 高精度时差测量

高精度时差测量采用时钟内插与时间数字转换 (TDC) 技术结合的方式实现。时钟内插完成初步测量, 采用 10 MHz 时钟采样, 测量分辨率为 10 ns, 测量范围宽, 可达 ± 1 s; TDC 完成精测, 采用德国 ACAM 公司的 TDC-

GPX 时间测量芯片, 测量精度可达到 27 ps。采用两种方式结合, 实现高分辨率、全范围的测量^[3], 为本地频率源驯服提供基础钟差依据, 实现高精度频率产生。高精度时差测量原理如图 6 所示。

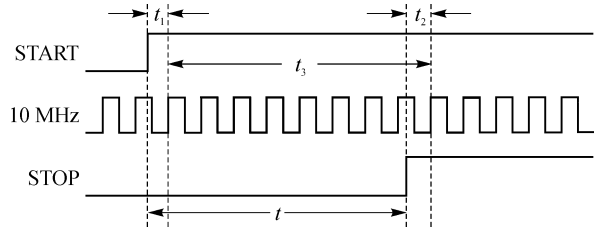


图 6 高精度时差测量原理

Fig. 6 Principle of high-precision time difference measurement

时钟内插完成时差信息的初步测量, 统计 START 信号与 STOP 信号之间的时钟周期数 N , 获取初始钟差信息 $t_3 = (N \times 1/10^7)$ s; 使用 TDC-GPX 时间测量芯片测量 START 与 10 MHz 信号上升沿之间的时差 t_1 以及 STOP 信号与 10 MHz 上升沿之间的时差 t_2 , 最终获取时差结果 t :

$$t = t_1 + t_3 - t_2$$

通过采用上述技术, 时差测量分辨率可达 50 ps, 测量精度优于 ± 50 ps。

2.2 卡尔曼滤波

在时差测量过程中, 由于导航信号与环境带来的测量抖动误差可以利用卡尔曼滤波去除, 获得较为准确的 1 PPS 时差数据。

数据滤波是去除噪声、还原真实数据的一种数据处理技术, Kalman 滤波在测量方差已知的情况下能够从一系列存在测量噪声的数据中动态估计设备的状态。由于它便于计算机编程实现, 并能够对现场采集的数据进行实时更新和处理, Kalman 滤波是目前应用最为广泛的滤波方法, 在通信、导航、制导与控制等多领域得到了较好的应用^[4]。图 7 为卡尔曼预估计计算的数学建模基本方程式。

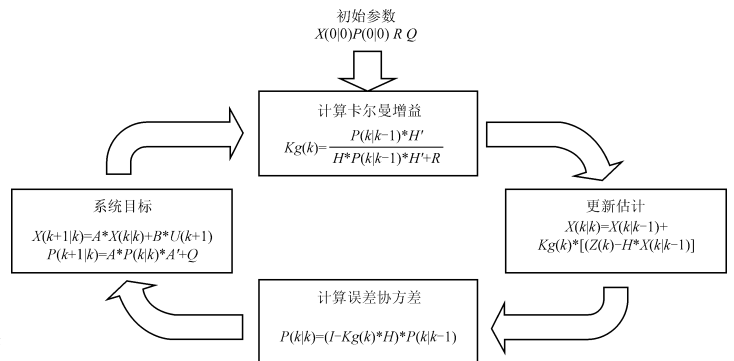


图 7 卡尔曼预估计计算

Fig. 7 Kalman estimation calculation

图 7 中是经典的卡尔曼滤波的 5 个基本公式,利用这 5 个公式就可以完成卡尔曼滤波的求解过程。根据迭代过程分成两个方程集合,一个是 time update 方程,一个是 measurement update 方程,求解过程如图 8 所示。

Time Update	Measurement Update
$\hat{x}_k = A\hat{x}_{k-1}$	$K_k = \bar{P}_k H^T (H \bar{P}_k H^T + R)^{-1}$
$\bar{P}_k = A P_{k-1} A^T + Q$	$\hat{x}_k = \hat{x}_k + K_k (z_k - H \hat{x}_k)$
	$P_k = (I - K_k H) \bar{P}_k$

图 8 求解过程

Fig. 8 Solution process

利用实时数据动态更新卡尔曼的相关参数,用来计算最终的时差值。短时间内的时差观察数据与最后滤波值的对比图如图 9 所示。

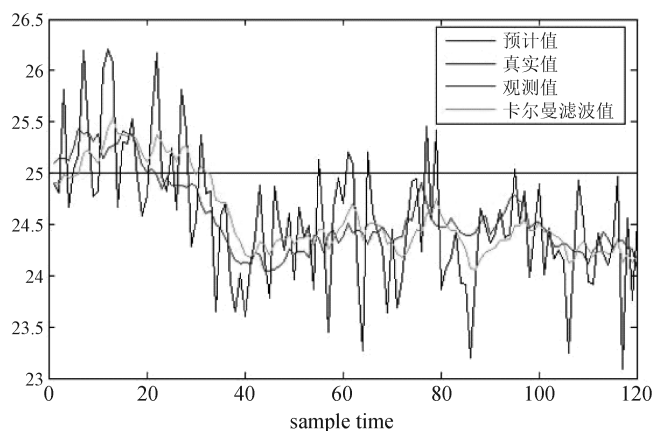


图 9 滤波值的对比图

Fig. 9 Comparison of filter values

从图 9 中可以看出,经过卡尔曼滤波后的时差值很平稳,最终映射到动态调节铷钟的调节量就非常平滑与稳定,能有效提高系统输出信号的稳定度。

2.3 增量式 PID 算法

采用“动态环路带宽技术”,结合“增量式 PID 自动控制算法”,实现对频率源的高精度驯服^[5]。

针对北斗/GPS 导航信号的长期稳定特点,结合铷钟的短期稳定性,预建立对应的 PID 参数列表,预设相应的环路带宽控制参数,根据驯服过程压控数据变化情况、跟踪锁定相位情况以及时间参量,智能判定环路带宽适宜性,自动增减环路带宽。通过增量式 PID 控制算法实现高精度驯服功能,降低驯服对本地频率源稳定度的影响,实现时源跟踪驯服功能。增量式 PID 算法基本原理如图 10 所示。

增量式 PID 算法公式如下:

$$\Delta p_{wpm} = K_P [e_k - e_{k-1}] + K_I e_k + K_D [e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}]$$

式中, e_k 表示本次相差, e_{k-1} 表示上一次相差, K_P 、

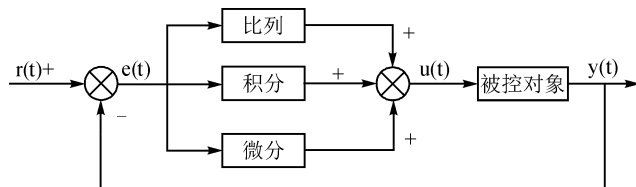


图 10 增量式 PID 算法原理图

Fig. 10 Schematic diagram of incremental PID algorithm

K_I 、 K_D 分别表示比例、积分、微分控制系数, Δp_{wpm} 表示本次压控调节增量。

通过采用增量式 PID 算法将卡尔曼滤波后的时差测量值作为 PID 的自变量,根据实测值与预估值实时对比结果,以及不同铷钟类型、不同驯服时间阶段来动态调整 PID 控制参数,即实时更改 K_P 、 K_I 、 K_D 参数使最终输出控制量更加精确、稳定。增量式 PID 算法流程如图 11 所示。

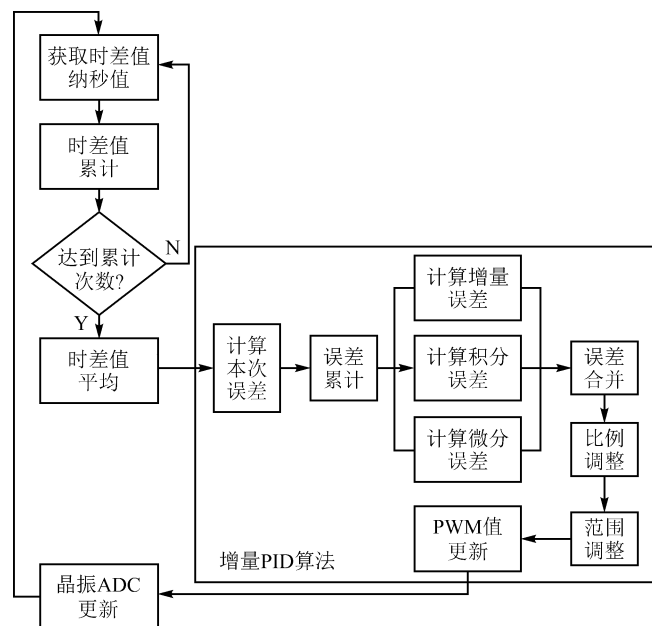


图 11 PID 算法流程

Fig. 11 PID algorithm process

3 设计验证

基于导航卫星的高精度授时技术已应用于我单位多款授时型终端产品中,通过实际测试,设备跟踪北斗/GPS 外时源参考时,输出 1 PPS 相位稳定性达到 ± 0.2 ns 以内,图 12 为跟踪准确度的实测结果。

在对铷原子钟进行驯服后,实测 1 s 稳定度达到 $3.76E^{-12}$, 10 s 稳定度达到 $1.13E^{-12}$, 100 s 稳定度达到 $4.1E^{-13}$ 。图 13 为驯服下的铷原子钟输出 10 MHz 信号频率稳定度测试结果。

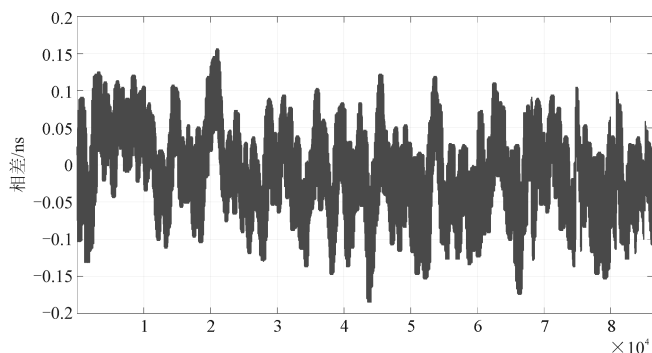


图 12 1 PPS 跟踪相位图

Fig. 12 1 PPS tracking phase diagram

Allan Deviation $\sigma_y(\tau)$		
1h 46m		Local
$\tau_0 = 1 \text{ ms}$		NEQ BW = 500 Hz
Integration Time τ	Allan Deviation $\sigma_y(\tau)$	NEQ BW
0.4	5.832×10^{-12}	1.88404×10^{-13}
1	3.757×10^{-12}	9.27997×10^{-14}
2	2.649×10^{-12}	6.12864×10^{-14}
4	1.843×10^{-12}	3.27940×10^{-14}
10	1.127×10^{-12}	1.94741×10^{-14}
20	7.84×10^{-13}	1.34496×10^{-14}
40	5.52×10^{-13}	1.01076×10^{-14}
100	4.1×10^{-13}	6.90541×10^{-15}
200	3.6×10^{-13}	4.29497×10^{-15}
400	3.1×10^{-13}	
1000	4.2×10^{-13}	
2000	2.7×10^{-13}	
Input: 10.0 MHz 10 dBm		
Reference: IN-REF		
Collecting**		
SN 1709001148		

图 13 驯服下的铷原子钟输出稳定度测试结果

Fig. 13 Output stability test results of rubidium atomic clock under taming

4 结 语

本方案以导航接收机接收导航卫星授时信号后恢复出的 1 PPS 时间信号为基准,实现设备内置铷原子钟的高精度驯服,进而生成高精度授时信号。文中对基于导航卫星的高精度授时相关技术进行了详细设计,验证结果表明,该方案有效抑制了接收机 1 PPS 引入的抖动,输出

1 PPS 相位稳定度达到 $\pm 0.2 \text{ ns}$ 以内,驯服期间 1 s 稳定度达到 3.76×10^{-12} , 10 s 稳定度达到 1.13×10^{-12} , 100 s 稳定度达到 4.1×10^{-13} , 可为用时系统提供准确、可靠的时间和频率基准信号。

参考文献

- [1] 柯腾伦,孙光辉,吴荣刚,等.基于“当前”统计模型的卡尔曼滤波在北斗单向授时中的应用[J].导航定位与授时,2023,10(3):39-48.
KE T L, SUN G H, WU R G, et al. Application of Kalman Filter Based on "Current" Statistical Model in Beidou Unidirectional Time Service[J]. Navigation Positioning and Time Service, 2023, 10(3): 39-48 (in Chinese).
- [2] 徐劲松.基于 GNSS 的抗干扰高精度授时技术研究[C]//中国卫星导航学术年会组委会,2020.
XU J S. Research on GNSS based anti-interference high-precision time service technology[C]//Organizing Committee of the China Satellite Navigation Academic Annual Conference, 2020 (in Chinese).
- [3] 左兆辉,淮鸽,戴群雄.短波授时在高精度授时领域的应用[J].计算机与网络,2021(24):55-58.
ZUO ZH H, HUAI G, DAI Q X. Application of shortwave timing in high-precision timing[J]. Computer and Network, 2021(24): 55-58 (in Chinese).
- [4] 马海淘.基于 BDS/INS 组合导航定位若干关键技术的研究[D].桂林:桂林电子科技大学,2022.
MA H T. Research on Several Key Technologies of BDS/INS Integrated Navigation and Positioning[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2022 (in Chinese).
- [5] 孙雪淋.基于北斗授时系统的恒温晶振驯服守时技术研究[D].绵阳:西南科技大学,2021.
SUN X L. Research on Constant Temperature Crystal Oscillator Taming and Timekeeping Technology Based on the Beidou Timing System[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021 (in Chinese).

(责任编辑:薛士然 收稿日期:2023-08-30)