

GPS/BD 双模融合的高精度时间同步方法研究

于帆,陈伟

(西安工业大学 计算机科学与工程学院,陕西 西安 710021)

摘要:为满足电力和测控通讯等领域对高精度时钟的要求,结合 GPS/BD 时钟无累积误差和晶振时钟无随机误差的特性,提出了一种新型的基于 GPS/BD 双模接收机的时钟驯服的软、硬件设计及其实现方法。该方法通过构建权重系数将 GPS 和 BD 信号滤波得到的钟差估计值和钟差速度估计值进行融合,实现了基于 GPS/BD 双模融合授时的时钟驯服系统。在系统软件设计中,采用滑动中位数方法剔除测量数据中的异常点,应用无偏 FIR 滤波算法对钟差数据进行滤波,以提高时钟偏差的滤波精度;在 ARM 的控制下,应用数字 PID 控制算法产生控制电压,由 D/A 转换器调节晶振输出频率,实现快速驯服本地时钟。实验结果表明,所提出时钟驯服方法的时间同步精度达到了 50 ns,优于基于单模 GPS 和单模北斗的时间同步系统。

关键词:GPS/BD 双模;时间同步;锁相环技术;无偏 FIR 滤波

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2017)05-0201-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2017.05.042

Research on High-precision Time Synchronization Method with GPS/BD Dual Mode Fusion

YU Fan, CHEN Wei

(School of Computer Science and Engineering, Xi'an Technological University,
Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to meet the request of high precision clock for the electric power and control communication fields, a new method of software and hardware design and implementation for clock disciplining with GPS/BD dual-mode receiver has been proposed combined with the characteristics of the GPS/BD clock without random error and oscillator without accumulation error, which could improve the estimation accuracy of clock bias by fusing the GPS clock bias data and the BD clock bias data. Furthermore, the sliding median method has been employed in the software design to eliminate the abnormal data in the measurement data and the accuracy of the clock filter has been improved with unbiased FIR filtering algorithm to filter the clock bias data. Under the control of ARM processor, the control voltage for oscillator has been acquired by adopting the digital PID control algorithm and the oscillator output frequency has been adjusted with D/A converter, which aimed at achieving a fast tamable local oscillator. According to the experimental results, the time synchronization precision of the proposed method has reached 50 ns, which is higher than single mode GPS and single mode BD time synchronization system.

Key words: GPS/BD dual-mode; time synchronization; phase-locked loop technology; unbiased FIR filter

0 引言

预计 2020 年全球将进入 5G 时代,在 5G 时代人们可以享受千倍提速的网络、通信等服务,这些便利的服务要求时钟系统具有极高的准确性和稳定性,对时钟精度要求甚至达到纳秒级别,并且各个系统都要达到严格的时间同步。

卫星授时是目前主流的时间同步技术,其中美国的全球卫星导航系统(GPS)技术最为成熟,凭借覆盖

面广、精度高等特点成为了卫星授时的首选^[1]。但是 GPS 归美国政府所有,由美国军方开发和控制,存在着故意降低精度的可能,甚至在战争等不确定因素下可能导致中国等其他地区不能使用 GPS 服务,对国内各种 GPS 应用造成了潜在隐患。

北斗卫星导航系统(BD)是中国自主建设、独立运行的卫星导航系统,全面建立完成后将为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时服务,

收稿日期:2016-08-09

修回日期:2016-11-09

网络出版时间:2017-03-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60904089)

作者简介:于帆(1963-),男,教授,研究方向为计算机控制技术与人工智能;陈伟(1991-),男,硕士研究生,研究方向为嵌入式控制。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.tp.20170313.1547.084.html>

精度也将更高。可以完全独立工作,为国内电力、导航、勘测等领域进行服务^[2]。

现有的 GPS/BD 双模授时技术是将 GPS 授时信号作为优先选择,BD 授时信号作为备份,GPS 信号不能正常工作时再使用 BD 授时信号,这种基于单模接收机的时间同步方案^[3-5],精度通常较低,系统的性能指标还有进一步提升的空间。为此,提出了一种新型的基于 GPS/BD 双模融合授时的时间同步方法,通过数据融合方法将 GPS 钟差与 BD 钟差相融合,提高了钟差的估计精度,应用无偏 FIR 滤波算法对钟差数据进行滤波,提高了钟差的滤波精度。

1 系统总体设计

1.1 时间同步方法原理

卫星授时信号具备较高的长期稳定性和高准确度等特点,利用卫星授时技术产生一个稳定的秒脉冲信号(1 PPS)周期性地对本地时钟源进行驯服,使本地时钟源输出高稳定的频率信号且滤波后的误差明显减小^[6],系统可以获得一个短期准确度和长期稳定性都较高的时间频率标准^[7-9]。所使用恒温晶体振荡器作为本地时钟源。

系统的基本调控原理基于锁相环的调节机制^[10-11],使用 PID 控制算法调节恒温晶振的输入信号,使输出信号和输入信号保持一个固定关系。系统由卫星接收模块、时间间隔测量模块、数据处理模块和恒温晶振等构成,其中时间间隔测量模块在 FPGA 中编程实现,数据处理模块由 ARM 编程实现。时间同步方法原理图如图 1 所示。

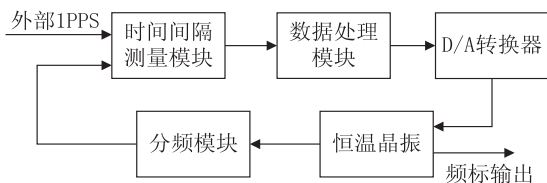


图 1 系统原理图

卫星接收模块输出 1PPS 作为 FPGA 中时间间隔测量模块的输入,恒温晶振经分频后产生频率为 1 Hz 的周期信号作为时间间隔测量模块的另一输入,时间间隔测量模块的功能包括脉冲计数、分频和测频等,测量出恒温晶振分频 1 Hz 信号与 GPS 的 1PPS 之间的钟差;数据处理模块使用无偏 FIR 滤波算法对钟差数据进行处理,可以提高钟差的滤波精度,PID 控制算法计算出恒温晶振相对于 GPS 的频率偏差,将偏差值送入到 D/A 转换器转换成模拟电压输入到恒温晶振的压控输入端,调整恒温晶振的输出频率。

1.2 双模融合

为进一步提高授时精度,提出了一种新型的基于

GPS/BD 双模融合授时的时间同步方法。通过构建权重系数将 GPS 和 BD 信号滤波得到的钟差估计值和钟差速度估计值进行融合,实现基于 GPS/BD 双模融合授时的时钟驯服系统。使用无偏 FIR 滤波算法对钟差数据进行滤波,消除了卫星授时信号不稳定以及测量引起的误差,提高了钟差的滤波精度,获得了高精度的钟差估计值和钟差速度估计值。融合计算公式如下:

$$x = \frac{x_{BD}}{x_{GPS} + x_{BD}} x_{GPS} + \frac{x_{GPS}}{x_{GPS} + x_{BD}} x_{BD} \quad (1)$$

其中, x 为融合后的钟差估计值; x_{GPS} 为基于 GPS 的钟差估计值; x_{BD} 为基于 BD 的钟差估计值。

$$\dot{x} = \frac{\dot{x}_{BD}}{\dot{x}_{GPS} + \dot{x}_{BD}} \dot{x}_{GPS} + \frac{\dot{x}_{GPS}}{\dot{x}_{GPS} + \dot{x}_{BD}} \dot{x}_{BD} \quad (2)$$

其中, \dot{x} 为融合后的钟差速度估计值; \dot{x}_{GPS} 为基于 GPS 的钟差速度估计值; \dot{x}_{BD} 为基于 BD 的钟差速度估计值。

GPS 信号和 BD 信号都含有不同的噪声成分,通过提出方法可以相互抵消一部分噪声,提高精度。

2 软件设计及算法

2.1 软件设计

软件部分包括 FPGA 软件和 ARM 软件,时间间隔测量在 FPGA 中进行,精确测量出 1 PPS 和恒温晶振分频产生的 1 Hz 信号上升沿的时间间隔。FPGA 中采用 Verilog 硬件描述语言并结合自身的 IP 核相对较容易实现脉冲计数、分频和测频等功能。在此不考虑 FPGA 软件程序设计。

数据处理模块由 ARM 编程实现,执行数据处理程序计算、分析和判断时间间隔测量模块送入的钟差数据,并计算出频率偏差值,根据频率偏差值通过 D/A 转换器对恒温晶振进行频率修正。系统的工作过程可以抽象为 4 个状态,包括初始化状态、跟踪状态、稳定状态和守时状态,主要是根据接收机接收信号状态和滤波得到的钟差估计值大小来区分。系统状态切换图如图 2 所示。

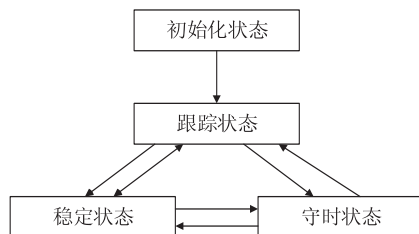


图 2 系统状态切换图

初始化状态:加电后初始化整个系统,包括 ARM 初始化、下载配置 FPGA 等。

跟踪状态:快速调节本地晶振输出频率达到与参

考频率高度同步的状态。

稳定状态:区别于跟踪状态每个控制周期对恒温晶振进行调节,稳定状态下当且仅当钟差值超过设定阈值时才进行调节。

守时状态:卫星信号不能正常工作时系统进入守时状态,通过钟差预测模型对恒温晶振进行校正,保持恒温晶振秒脉冲和频率输出的精度。

2.2 算法设计

无偏 FIR 滤波算法:有限长单位冲激响应滤波器,又称为非递归型滤波器,是数字信号处理系统中最基本的元件,它可以在保证任意幅频特性的同时具有严格的线性相频特性,同时其单位抽样响应是有限长的,因而滤波器是稳定的系统。

时钟驯服系统中实现对恒温晶振的精密控制,关键一部分在于使用滤波算法提高钟差的滤波精度。无偏 FIR 滤波算法在接收机钟差估计的应用,首先由国外 Yuriy S. Shmaliy 教授提出,在其文献中说明了相应的公式推导过程,并通过实验比对得出在接收机钟差估计中无偏 FIR 滤波比卡尔曼滤波效果更好的结论^[12-13],与 Kalman 滤波相比,其 Allan 方差要稍微好些。在软件实现中将无偏 FIR 滤波算法改进成迭代形式,不需要存储大量数据,便于算法移植。

无偏 FIR 滤波的思想是,通过采集一定数量的观测值再利用卷积公式来计算要求的状态估计值,计算公式如下:

$$\omega(n) = \sum_{i=0}^{N_1-1} W(i)\lambda(n-i)$$

(3)

其中, $\lambda(n)$ 为钟差观测值; N_k 为采样周期长度; $W(i)$ 为卷积系数。

$$W(i) = \begin{vmatrix} \xi_k(i) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \xi_{k-1}(i) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \xi_0(i) \end{vmatrix}$$

(4)

将无偏 FIR 滤波算法应用到系统中,采用的基本思想是通过低阶的状态估计量计算高阶观测量,从而利用无偏 FIR 滤波得到控制算法需要的钟差估计值和钟差速度估计值。时间间隔测量模块送入数据处理模块的是钟差观测量,钟差估计值的计算方法如下:

$$\omega_1(n) = \sum_{i=0}^{N_1-1} \xi_1(i)\lambda_1(n-i)$$

(5)

将一阶的观测量 $\lambda_1(i)$ 在采样周期 N_1 中与卷积系数 $\xi_1(i)$ 进行卷积计算,可以得到一阶的状态估计值 $\omega_1(n)$,即钟差估计值。通过一阶状态估计值 $\omega_1(n)$ 计算得到二阶观测值 $\lambda_2(i)$,计算公式如下:

$$\lambda_2(i) = \frac{1}{\tau}(\omega_1(i) - \omega_1(i-1))$$

(6)

计算得到 N_0 个二阶观测值 $\lambda_2(i)$ 后,与卷积系数 $\xi_0(i)$ 进行卷积计算,得到二阶状态估计值 $\omega_2(n)$,即系统中的钟差速度,计算公式如下:

$$\omega_2(n) = \frac{1}{\tau} \sum_{i=0}^{N_0-1} \xi_0(i)\lambda_2(n-i) = \frac{1}{\tau} \sum_{i=0}^{N_0-1} \xi_0(i)(\omega_1(i) - \omega_1(i-1))$$

(7)

系统中使用数字 PID 控制算法计算电压控制字,数字 PID 控制算法则是根据 PID 控制原理应用在计算机或硬件控制中的程序算法,该算法具有稳定、快速和准确的特性^[14-15]。在设计中,为了简化编程,减少了对存储单元的占用。通过无偏 FIR 滤波得到控制算法需要的钟差量和钟差速度量。系统中的时钟模型如下:

$$x(i+1) = x(i) + \dot{x}(i)$$

$$\dot{x}(i+1) = \dot{x}(i) + u(i)$$

(8)

其中, $x(i)$ 为钟差; $\dot{x}(i)$ 为钟差速度; $u(i)$ 为控制量。

因为恒温晶振具有较好的短期稳定性,假设一个控制周期内钟差速度保持不变,即钟差是速度的累积,则下一个控制节点的钟差为:

$$x(i+n) = x(i) * n$$

(9)

其中, n 为控制周期。

在一个周期 n 后需要将钟差消除为零,因此需要施加的控制量 $u(i)$ 为:

$$u(i) = k_d \cdot (-\dot{x}(i)) + k_p \cdot \frac{-x(i)}{n}$$

(10)

其中, k_d 为微分系数; k_p 为比例系数。

钟差调节示意图如图 3 所示。

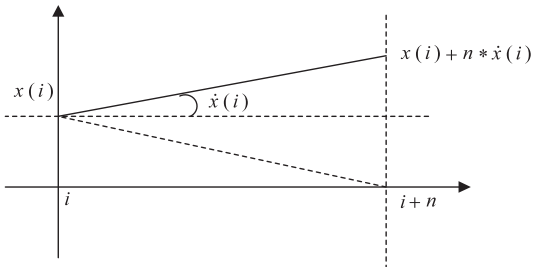


图3 控制量计算示意图

将控制量 $u(i)$ 输入 D/A 转换器转换成模拟电压输入恒温晶振压控输入端,调整恒温晶振输出稳定。

3 实验结果

对所提出的一种新型的基于 GPS/BD 双模融合授时的时间同步方法进行验证,分别使用单模 BD 授时信号、单模 GPS 授时信号和 GPS/BD 双模融合授时对恒温晶振进行驯服,计算驯服后的恒温晶振分频产生

的秒脉冲信号与 GPS 的秒脉冲信号之间的差值,采样周期 150 s,采集 100 组数据,三种模式下的秒脉冲精

度如图 4 所示。

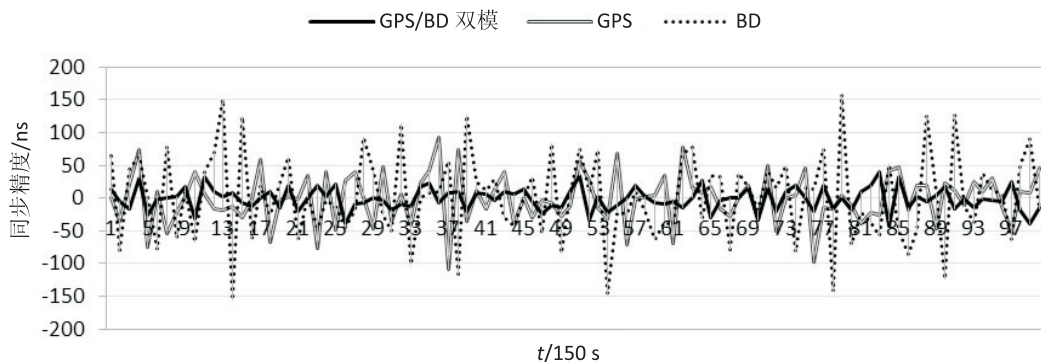


图 4 秒脉冲精度

由图 4 可知,在系统中卫星授时信号正常工作情况下,系统进入锁定状态后恒温晶振分频产生的秒脉冲信号与 GPS 的秒脉冲信号相位跟踪误差保持在一定范围内,基于单模接收机的时间同步方案,其中基于单模 GPS 的时间同步精度优于基于单模 BD 时间同步系统,但是其时间同步精度仍然大于 60 ns,并且存在较大波动;基于 GPS/BD 双模融合授时的时间同步方法提高了钟差的估计精度,时间同步精度始终保持在 50 ns 以内。所提出的新型基于 GPS/BD 双模接收机的时钟驯服方法的秒脉冲精度明显优于基于单模 GPS 或单模 BD 的授时方案。

4 结束语

针对电力和测控通讯等领域对高精度时钟的要求,提出了一种新型的基于 GPS/BD 双模接收机的时钟驯服方法。基于双模融合的设计原理、软件设计流程和算法设计等要点,设计实现了 ARM 和 FPGA 相结合的时钟驯服系统。实验结果表明,采用数据融合方法提高了钟差的估计精度,时间同步精度也进一步得到了提高,分别优于基于单模 GPS 和单模北斗的时间同步系统,且能够输出高精度的频率基准和时间同步信号,可为各领域提供精度更高、更准确的时间频率信号。

参考文献:

- [1] 单庆晓,杨俊. 卫星驯服时钟系统的新进展[J]. 测试技术学报,2009,23(5):396-401.
- [2] 郭彬. 基于北斗/GPS 双模授时的电力系统时间同步技术研究[D]. 长沙:湖南大学,2010.
- [3] 周大勇,刘鹏,刘树昌,等. BD2/GPS 高精度同步时钟装置的设计与应用[J]. 吉林大学学报:信息科学版,2014,32(3):262-266.
- [4] 党晓园,单庆晓,肖昌炎,等. 基于 GPS 与北斗双模授时的

压控晶振校频系统的研究与设计[J]. 计算机测量与控制, 2009,17(11):2246-2248.

- [5] 郭彬,单庆晓,肖昌炎,等. 电网时钟系统的北斗/GPS 双模同步技术研究[J]. 计算机测量与控制,2011,19(1):139-141.
- [6] Mosavi M R. Use of accurate GPS timing based on radial basis probabilistic neural network in electric systems[C]//International conference on electrical and control engineering. [s. l.]:[s. n.],2010:2572-2575.
- [7] 张国琴,吴玉蓉. 基于 GPS 校准晶振的高精度时钟的设计[J]. 仪表技术,2010(4):23-24.
- [8] 谢强,钱光弟. 基于授时 GPS 的高精度频率源设计与实现[J]. 工业控制计算机,2007,20(3):15-16.
- [9] 于跃海,张道农,胡永辉,等. 电力系统时间同步方案[J]. 电力系统自动化,2008,32(7):82-86.
- [10] Kim B. Dual-loop DPLL gear-shifting algorithm for fast synchronization[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-II:Analog and Digital Signal Processing,1997,44(7):577-586.
- [11] 侯兴勃,崔保健,赵海鹰. 全数字低频锁相环的研究与应用[J]. 计算机测量与控制,2010,18(9):2181-2182.
- [12] Shmaliy Y S. An unbiased FIR filter for TIE model of a local clock in applications to GPS-based timekeeping[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control,2006,53(5):862-870.
- [13] Shmaliy S Y, Munoz-Diaz J, Arceo-Miquel L, et al. Optimum time step and memory for GPS-based unbiased FIR estimates of the local clock TIE model[C]//IEEE international frequency control symposium jointly with the 21st European frequency and time forum. [s. l.]:IEEE,2007:291-296.
- [14] 杨剑青,杨晓琴,谢亮,等. 基于 ARM 与 CPLD 的可驯频率基准的设计与实现[J]. 电子测量技术,2014,37(2):75-77.
- [15] 杨前利. 基于数字 PID 的闭环温度控制系统的设计[J]. 计算机与数字工程,2013,41(12):2004-2008.