

电网卫星驯服时钟的网络时间同步服务器设计^①

杨锦涛¹, 单庆晓², 肖昌炎¹, 邢薇¹

¹(湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082)

²(国防科技大学, 长沙 410073)

摘要: 在分析网络时间同步协议的基础上, 设计了一种 ARM+FPGA 的网络时间同步服务器。研究了用卫星驯服时钟的方法解决了网络时间服务器中时钟源精度不高, 易受干扰的特点, 采用了 PI 调节器的时钟驯服模型。通过实验测试, 该服务器可满足对电力系统二次设备的同步授时。

关键词: 电力系统; 卫星驯服时钟; 网络时间同步

Design of Network Time Synchronization System Based on Network Satellite Disciplined Clock

YANG Jin-Tao¹, SHAN Qing-Xiao², XIAO Chang-Yan¹, XING Wei¹

¹(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

²(National Defense University, Changsha 410073, China)

Abstract: In this paper, the design of an ARM + FPGA for network time synchronization server analysed the network time synchronization protocol. Researching use satellite clock solution to tame a network time server, tackled clock accuracy is not high and susceptible to interference characteristics, using PI regulator clock model Experimental results of the server can satisfy the power system synchronous timing of secondary equipment.

Keywords: power system; satellite disciplined clock system; network time synchronization

1 引言

电力系统的安全稳定运行对电力自动化设备提出了新的要求, 特别是对时间同步, 要求继电保护装置、自动化装置、安全稳定控制系统、能量管理系统(EMS)和生产信息管理系统等基于统一的时间基准运行, 以满足事件顺序记录(SOE)、故障录波、实时数据采集时间一致性要求, 确保线路故障测距、相量和功角动态监测、机组和电网参数校验的准确性, 以及电网事故分析和稳定控制水平, 提高运行效率及其可靠性^[1,2]。网络时间同步服务器中的时钟源采用卫星授时接收机提供标准时间信号, 因为卫星授时接收机输出的秒脉冲信号存在较大的随机误差, 而且当卫星系统被干扰不能正常使用时, 需要继续提供高精度频率和时间信号输出, 以维持系统的正常工作, 所以需要利用本地振荡器对卫星时钟进行驯服^[3-5]。

本文在研究时间同步协议的基础上, 针对网络时间同步服务的要求, 研究了一种基于 ARM+FPGA 嵌入式系统的网络时间同步服务器, 并采用 PI 算法对卫星授时接收机进行了时钟驯服, 实验研究表明基于 ARM+FPGA 嵌入式系统的网络时间同步服务器抗干扰能力强, 授时精度高, 可移植性强等显著优点。

2 电网卫星时钟驯服

2.1 电网卫星时钟驯服原理

电网卫星时钟驯服的基本原理是利用卫星授时接收机提供的固定频率信号, 与本地振荡器产生的振荡信号进行比对, 获得频率差; 再通过对本地振荡器的调节, 使振荡频率与卫星的振荡频率基本一致。在频率调制过程中, 还需要对本地振荡的相位进行补偿, 使本地振荡器输出的分频秒信号与接收机输出的秒信

^① 收稿日期:2010-07-08;收到修改稿时间:2010-08-11

号差值在一定范围内。

1.2 时钟驯服模型的建立与实现

卫星授时接收机输出的 1PPS 与本地分频输出的 1PPS 进行数字鉴相；鉴相的结果送入调节器，调节器根据鉴相得结果可以得到频率差，或者采用反馈控制的方法，得到调节量；该调节量对本地频率源的频率进行调整，这是一个反馈控制系统，采用 PI 控制可获得较好的调节效果。本设计采用 PI 调节器实现相位补偿和频率校正，从而完成时钟的驯服。PI 调节器是一种反馈调节器，可自动的实现频率的锁定，具有很好的跟踪性能。因为采用了积分控制，所以可以有效消除累计的相位误差。为了提高跟踪性能，本文提出了自适应调节比例系数和积分系数的方法。在频率校准阶段，采用较大的比例系数，增强系统的快速跟踪能力，当系统稳定跟踪后，调节比例和积分系数，降低脉冲抖动对系统的影响。通过这种方法可以使本地时钟的频率能快速而又可靠地捕捉和跟踪外部时间基准频率，并且可以有效滤除外部基准的瞬态抖动。

当采用 PI 控制时，PI 调节器根据数字鉴相器输出的鉴相值产生调节电压，在该调节电压下，根据 PI 调节器的特性，本地输出的 1PPS 会逐步跟踪卫星的 1PPS，如卫星的 1PPS 稳定，则最终的相位误差为零。当本地的 1PPS 锁定卫星的 1PPS 后，其频率也得到了校准。控制系统框图如图 1

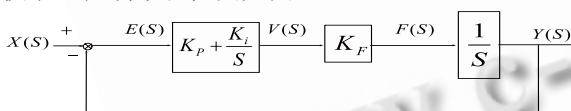


图 1 卫星驯服高稳晶振系统模型

图 1 中， $E(S)$ 为得到的相位差； K_P 为比例系数； K_I 为积分系数； $V(S)$ 为比例积分器的输出量。对于压控的 OCXO 而言，输入的电压与输出的频率有一个比例关系，则可认为分频则相当于一个积分环节，输出的 $Y(S)$ 表示相位。根据框图求此 2 阶系统的传递函数，可得

$$[X(S) - Y(S)] \cdot \left(K_P + \frac{K_I}{S} \right) \cdot K_F \cdot \frac{1}{S} = Y(S)$$

$$G(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{K_P \cdot K_F \cdot S + K_F \cdot K_I}{S^2 + K_P \cdot K_F \cdot S + K_F \cdot K_I}$$

可见该传递函数是一个典型的 2 阶系统，具有两个极点和一个零点，分母可以表示为

$$S^2 + K_P \cdot K_F \cdot S + K_F \cdot K_I = S^2 + 2\zeta S \omega_n + \omega_n^2$$

当系统构建好后， K_F 基本确定； K_P 主要控制跟踪的快速响应， K_P 越大，则阻尼系数越大，其跟踪越快，超调量越小； K_I 主要控制跟踪的稳态误差， K_I 越大，则谐振频率越高，达到稳态值的振荡次数越多。

1.3 时钟驯服的硬件设计

设计时钟驯服硬件电路时，整形芯片选用 Linear Technology 公司的 LT1719，该芯片是采用最优化的生产工艺技术制造的 4.5ns 高速双电源比较器，采用轨对轨的输出方式，可在低电压条件下正常工作，特别适用于输入信号缓慢变化的应用场合，轨对轨输出可保证其与 TTL 和 CMOS 信号直接接口，而平衡输出则可使其方便地应用于模拟或单电源逻辑电平的转换方面。而 D/A 转换芯片选用 TI 公司的 DAC7512，该芯片是一款低功耗单片 12 位数模转换器，用来将 FPGA 输出的频率控制信号转化为对 OCXO 压控端的电压模拟信号。在本系统设计中，我们选用 ICS 公司的 ICS501 倍频芯片将整形后的晶振输出频率倍频到 30MHz，为系统提供高质量高频率的时钟。该芯片不仅可以满足多种时钟的要求，而且在调试中可以灵活地改变时钟频率，满足调试时对不同频率的要求，方便系统调试。

2 网络时间同步协议分析

计算机、网络中传递时间的协议主要的有 3 种：时间协议 (Time Protocol)、日时协议 (Daytime Protocol) 和网络时间协议 NTP (Network Protocol)。目前，NTP 是各行业中应用最普遍的网络时间协议。通过 NTP 协议建立的网络时间同步系统在电力系统的二次设备授时中应用很广泛^[6]。

NTP 是基于 TCP/IP 的一种时间传递协议，其精确度可达到 500ms。NTP 主要有 2 中工作方式：NTP 广播方式和 NTP 客户/服务器方式，后者的时间精确度高一些。同步过程如下：客户端首先向时

间服务器发送一个 NTP 数据包，这个数据包被打上发送时的客户端本机时间标签 A，服务器接收到这个数据包后也向客户端发送一个 NTP 数据包，这个数据包中含有 3 个时间标签：服务器接收到客户端 NTP 数据包时的时间标签 B、服务器发出 NTP 数据包时的时间标签 C、客户端 NTP 数据包中原有的时间标签 A，客户端接收到这个数据包后也打上一个本地时间标签 D，根据这 4 个时间标签就可以算出服务器与客户端的传输时延和时钟偏差，传输时延 $d=(B+D-A-C)/2$ ，时钟偏差 $t=(B+C-A-D)/2$ 。如图 2 所示

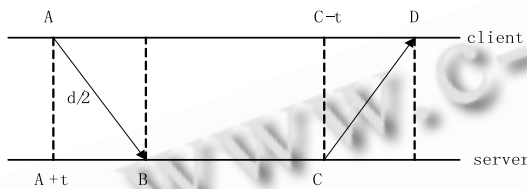


图 2 授时原理图

3 基于ARM+FPGA时间同步服务器的实现

3.1 ARM 与 FPGA 的接口电路

ARM 与 FPGA 的接口电路如图 3 所示，FPGA 芯片 Spartan3 接收卫星授时接收机发送的卫星信号，同时调用时钟驯服模块对本地频率源(OCXO)进行时钟驯服，将高精度的频率和时间信号通过串口送到 ARM 芯片 S3C2410A 中，S3C2410A 中移植了 Linux 操作系统，Linux 操作系统根据接收的标准时间信息改变系统本身时间，同时调用 NTP 同步协议模块，通过网络接口提供网络时间同步服务。

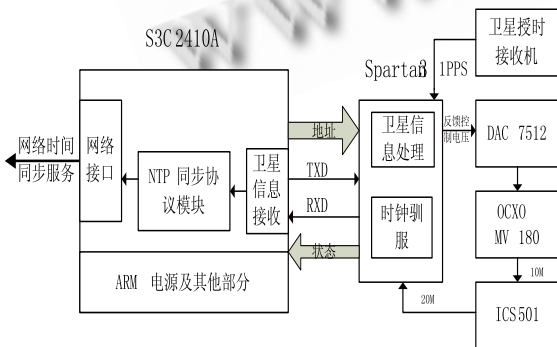


图 3 ARM+FPGA 接口原理图

所用的的 ARM 芯片为 Samsung 公司推出的 16/32 位的 RISC 处理器，它的低功耗、精简和出色的全静态设计特别适用于对成本和功耗敏感的应用。FPGA 芯片使用的是 Xilinx 公司的 Spartan3 系列的 XC3S1000。该器件采用高速 CHMOS 工艺，功耗低，可与 CMOS、TTL 电平兼容，并且采用 FT256 封装，拥有 391 个可用 I/O 口和 17280 个逻辑宏单元及丰富的触发器。

4 实验结果

时钟驯服的参数设置如下：比例环节 $K_{P1}=16$, $K_{P2}=1.6$, $f_p=0.25$; 积分环节 $K_{I1}=0.0625$, $K_{I2}=0.0125$, $f_i=0.25$ 。系统跟踪情况如图 4 所示，图中纵坐标的单位为 100ns，可见系统在启动 600s 左右完成了频率校准，800s 以后进入了频率锁定。当时钟驯服以后就可以进行网络同步精度的测试，测试过程为：在时钟驯服完成以后，NTP 服务程序与卫星时钟进行同步，成功同步以后，服务器的系统时间就是所期望的 UTC 时间，接着服务器发送同步报文给客户端，客户端与服务器时钟同步成功以后，整个网络处于正常运行状态，这时服务器(主时钟)与客户端(从时钟)通过硬件中断的方式在整秒时刻向测试比对设备发送一个脉冲，测试比对设备使用芯片外部的 2 只捕获引脚并行记录脉冲上升沿到来的时间，获得两个上升沿到来时刻的时间并计算两者之差 θ_n ，然后通过串口将 θ_n 发送到上位机(PC 机)。所得波形图如图 5 所示，从波形图可以看出系统的时钟同步精度在 500ms 以内，可满足电力系统二次设备对时间的精度要求。

5 结论

本文提出的 ARM+FPGA 的网络时间同步服务器，可应用于电力系统二次设备的同步授时，采用 PI 算法的卫星时钟驯服模型可以很好地解决当卫星系统被干扰不能正常使用时，需要继续提供高精度频率和时间信号输出，以维持系统的正常工作。经过实验测试，系统能长期可靠，稳定运行。

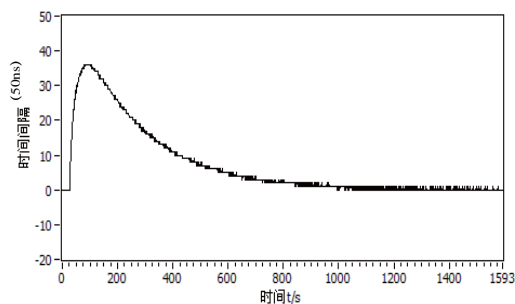


图 4 实验系统跟踪情况

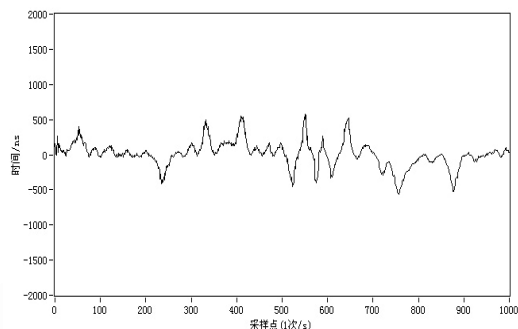


图 5 NTP 服务器与客户端时钟同步测试曲线

参考文献

- 1 于跃海,张道农,胡永辉,等.电力系统时间同步方案.电力系统自动化,2008,32(7):82-86.
- 2 章晋龙.广东电网同步网络优化与应用研究.电力系统通信,2006,27(159):18-21.
- 3 曾祥君,尹项根,林干,等.晶振信号同步 GPS 信号产生高精度时钟的方法及实现.电力系统自动化,2003,27(8):49-53.
- 4 郭向阳,赵振杰.自适应驯服铷钟的实现.飞行器测控学报,2006,25(4):83-86.
- 5 李展,张莹,周渭.基于单片机和 GPS 信号的校频系统.时间频率学报,2005,28(1):68-75.
- 6 杨国庆.网络时间同步在电力系统的应用.华东电力,2007,35(4):229-331.
- 7 毛德操,胡希明.嵌入式系统——采用开源代码和 StrongARM/Xscale 处理器.杭州:浙江大学出版社,2003.35-37.
- 8 田泽.嵌入式系统开发与应用实验教程.北京:北京航空航天大学出版社,2004.26-29.
- 9 孟宪元,钱伟庚,等.FPGA 嵌入式系统设计.北京:电子工业出版社,2007.37-40.
- 10 谢和平,薛秀谦.分形应用中的数学基础与方法.北京:科学出版社,1994:99-106.
- 11 张聿,金耀,孙家武,等.基于 L 系统的织物分形组织设计方法.纺织学报,2007,28(5):51-54.
- 12 Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snakes: Active contour Models. International Journal of Computer Vision, 1987, 1(4):321-331.
- 13 Paragios N, Deriche R. Geodesic active contours and level sets for the detection and tracking of moving objects. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000,22(3):266-280.
- 14 Barbe AM. Artistic Design with Fractal Matrices. The Visual Computer, 1993,(9):233-238.
- 15 Arnold VI, Avez A. Ergodic problems of classical Mechanics. Mathematic physic monograph series. New York: Benjamin W.A. INC, 1968.
- 16 齐东旭,邹建成,韩效宥.一类新的置乱变换及其在图像信息隐藏中的应用.中国科学(E辑),2000,30(5):440-447.

(上接第 89 页)

- 6 Sorkine O. Differential representations for mesh processing. Computer Graphics Forum, 2006,25(4):789-807.
- 7 Wei LY, Evory ML. Texture synthesis over arbitrary manifold surfaces. Computer Graphics (SIGGRAPH 01 Proceedings), 2001,(8):355-360.
- 8 Blinn JF, Newell ME. Texture and reflection in computer generated images. Communications of the ACM, 1976, 19: 542-546.
- 9 薛峰,张佑生,江巨浪,胡敏.一种快速、有效的纹理合成方法.合肥工业大学学报,2005,28(11):1361-1364.
- 10 阎平凡,张长水.人工神经网络与模拟进化计算.北京:清华大学出版社,2002.17-22.
- 11 Barnsley MF, Demoko S. Iterated function systems and the global construction of fractals. Proc. Roy. Soc. Lond, 1985, A 399:243-275.
- 12 Lindenmayer A. Mathematical models for cellular interaction in development, Parts 1 and part 2. Journal of Theoretical Biology, 1968,18:280-315.
- 13 Prusinkiewicz P, Hammel M, Mjolsness E. Animation of plant development. Computer Graphics, 1993,7(3):351-360.