

文章编号: 1671-7449(2009)02-0139-06

一种新型 GPS 冗余授时方法^{*}

单庆晓, 钟小鹏, 陈建云, 杨俊

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 大量采用 GPS 授时的网络存在安全隐患, 而采用其它授时方法则难以在现有设备增加外部时钟接口. 介绍了基于 GPS 射频信号模拟的外部授时方法, 对原有设备无需作任何改动, 从外部授时模块中获得外部同步的 1 pps(pulses per second) 和时间信息, 仿真产生固定点接收到 GPS 信号的导航电文和观测数据, 并将 GPS 导航电文的时间信息实时修改; GPS 射频信号基于仿真数据产生, 使设备内嵌的 GPS 接收机正常定位授时, 恢复出外部同步的 1 pps, 从而实现外部授时. 论文介绍了采用大规模 FPGA 的实现方法, 实验结果验证了对于固定位置该授时方法的有效性.

关键词: GPS 授时; 射频信号模拟; 时间传递

中图分类号: P127.1 文献标识码: A

A Novel Redundancy Method of GPS Timing

SHAN Qingxiao, ZHONG Xiaopeng, CHEN Jianyun, YANG Jun

(Mechatronic and Automation School, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: It 's unsafe for so many networks timed by GPS, but it 's hard to add redundancy clock interface by adopting other timing methods. This paper proposes time transfer approach based on the simulated GPS RF signal, and no change is done to original network. GPS RF signal is simulated based on outer time standard. GPS navigation and observation data such as pseudo-range of fixed point are simulated. Time information of GPS navigation data is modified to outer time standard. The GPS RF signal is generated based on the simulated data. The GPS receiver embedded in the device gets the RF signal and recovers the outer time standard and realizes the time distribution. A FPGA-based prototype can realize the above simulation procedure and the experiment shows the effectivity of this method.

Key words: GPS timing; GPS RF signal simulating; time transfer

0 引 言

对于大型分散型网络而言, 各网络节点的时间同步是保证网络正常工作的必要条件. 卫星授时由于成本低、授时精度高, 目前成为网络时间同步的主要手段. 由于 GPS 信号的稳定可靠以及 GPS 接收机物美价廉, 目前大多数网络同步均采用 GPS 授时. 众所周知, GPS 是美国军方掌控的卫星导航系统, 与

* 收稿日期: 2008-08-24

作者简介: 单庆晓(1973-), 男, 副教授, 博士, 主要从事仪器与测试技术、卫星时和时间传本地高精度经基准研究. <http://www.cnki.net>

我国无任何协议担保其可用,因此存在特定条件下不能使用的可能,因此对于使用GPS授时的网络,存在重大安全隐患.

除GPS外还有多种无线授时的方法,如我国的北斗双星系统、俄罗斯的GLONASS系统等.在GPS不能使用的情况下,采用其它的时频基准,使分散型网络实现时间同步,可确保在GPS不能使用的情况下,继续保持各网络节点时间同步.文献[1]提出采用北斗系统作为备份,在GPS系统不可用的情况下,切换到北斗系统,从而保持TD-SCDMA系统的同步.

然而由于GPS市场应用时间较长,许多设备是按照GPS授时的方法设计制造的,除了GPS天线接口外没有其它的时钟接口.将其改为外部授时需要对其设备内部进行改动,这给外部授时的推广应用带来了极大的困难.目前GPS信号模拟技术获得一定范围内的应用,GPS信号模拟源采用延迟的方法来模拟GPS信号的传输延时,使得GPS接收机正常工作并实现定位.见诸文献最早的GPS信号模拟源是1977年报道的Texas Instruments公司开发的GPS模拟器^[2].此后,GPS模拟源从单通道发展到多通道,模拟合成发展到数字合成,从中频数字合成发展到基带数字合成,由单一系统仿真发展到多系统混合仿真,由专用向通用方向发展,由系统仿真向片上(Onchip)仿真发展^[3].

如果以外部GPS时间源为基准产生GPS模拟信号,那么设备内置接收机正常工作后即可恢复出与外部时间信息一致的时钟.这种方法直接将GPS射频信号注入设备,无需增加额外的时钟接口,方便易行.本文介绍了该方法的原理、工作流程,软硬件实现手段,并对该方法进行了实验验证.

1 GPS 冗余授时方法

GPS授时的基本原理是在GPS定位后,通过定位可获取卫星与GPS接收机之间的距离,在接收机恢复出GPS卫星的1 pps(1 pulse per second)后,通过扣除卫星信号的传输时延,即可恢复卫星时间.

为了防止出现GPS不可用而造成整个系统瘫痪,需要给设备增加外部时间基准.利用外部接收机恢复出时间信号后,通过数学仿真和射频仿真,产生模拟的GPS信号,GPS接收机接收该信号后获得时间信息,该信息与外部时间信息一致;该方法较为复杂,需要GPS电文和观测数据仿真、射频信号模拟等过程,其优点是对原有设备无需任何改动,设备只需原有的GPS射频信号接口即可.

GPS冗余授时方法的授时流程如图1所示,外部标准时间形式为1 pps和串口TOD(Time of Day)信息.由于GPS射频信号模拟有一段延时,因此对输入的1 pps需要进行超前校正.

2 GPS 信号模拟

2.1 时间信息获取与时钟驯服

时间信息获取与时钟驯服采用外部授时模块即可获得.外部基准时间来源可以是卫星接收机,如GLONASS授时接收机、北斗授时接收机等;也可以是某时频设备提供的基准时间.时间信息通常包括1 pps和时间数据信息,时间数据信息指示该1 pps对应的绝对时刻,1 pps和时间数据信息均为1 s更新一次.当外部授时模块为卫星接收机时,其提供的1 pps具有较大的抖动,不利于射频信号发生;利用其提供的1 pps对本地高稳晶振进行频率校准,并确保利用高稳晶振分频产生的1 pps与接收机的1 pps之间的时间间隔在允许的范围内.

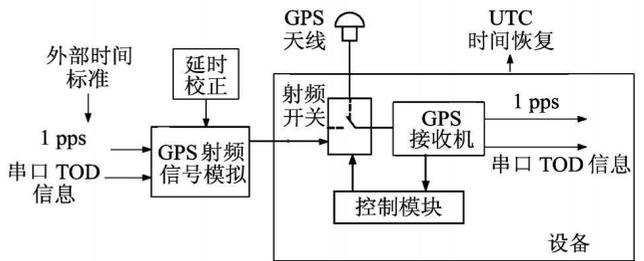


图1 时间传递流程

Fig. 1 Procedure of time transfer

2.2 GPS 电文和观测数据仿真

信号模拟的目的是使 GPS 接收机产生与外部时刻一致的时间信息, 首先信号模拟要让 GPS 接收机产生本地的定位, 而真实模拟 GPS 卫星信号是比较困难的, 需要建立 GPS 卫星轨道模型进行大量的实时数据计算, 难以实现. 因此采用伪造 GPS 电文和观测数据的方法. 首先根据设备实际位置产生一组 GPS 电文和观测数据, 根据该数据产生的射频信号能让 GPS 接收机实现预置定位.

然而, 光实现定位还无法达到授时的目的, 必须要让 GPS 接收机恢复出外部世界的真实时间. 因此必须对伪造的电文中与时间有关的参数进行实时调整. 导航电文中与时间有关的参数主要是整周数和周内秒计数, 分别位于第一子帧的 31 ~ 52 bit 和 61 ~ 70 bit^[4]. 在获取外部真实时间后, 实时调整电文中的参数, 考虑到信号产生的延时, 需要进行超前处理. 采用超前 1 s 的方法, 在外部真实时间的基础上增加 1 s, 调整电文中的参数, 从而实现接收机恢复的时间与外部同步.

为了让接收机实现定位, 必须要提供 4 颗以上的 GPS 卫星信号; 仿真了 12 颗 GPS 卫星的数据, 仿真数据主要包括导航电文和观测数据. 导航电文格式为 300 bit, 占 40 个字节, 剩余 20 bit 空; 观测数据则根据设定的位置和卫星星历产生, 模拟固定位置接收机产生的伪距变换, 20 ms 更新一次, 为了实现伪距的连续变化, 观测数据中还包含伪距速度和加速度, 便于信号产生过程中的插值.

2.3 射频信号模拟

真实的 GPS 卫星射频信号产生流程如下: 伪码发生器产生 1.023 MHz 的 C/A 伪随机码, GPS 的导航电文速率为 50 bps, 导航电文首先与该 C/A 码叠加, 这样产生了基带信号; 在 GPS 卫星上, 基带信号被调制到 L1 载频, 然后通过天线释放. 接收机接收到的射频信号与卫星发送的射频信号对比, 其接收到的信号是经过传输延迟的信号; 此外, 由于卫星的运动, 卫星与接收机之间具有相对运动, 由于多普勒效应, 接收机接收到的射频信号频率产生了变化.

单颗 GPS 卫星信号仿真流程如图 2 所示, 数学仿真产生的观测数据包括伪距和一阶、二阶量. 数学仿真产生的导航电文以 50 bps 的速率被 I 路伪码调制. 调制后的信号则为数字基带信号, 该信号经过多阶延迟滤波器进行延迟处理, 模拟 GPS 信号在空间的传递时间; 经过基带处理的信号通过正交调制变为 L1 载频的信号.

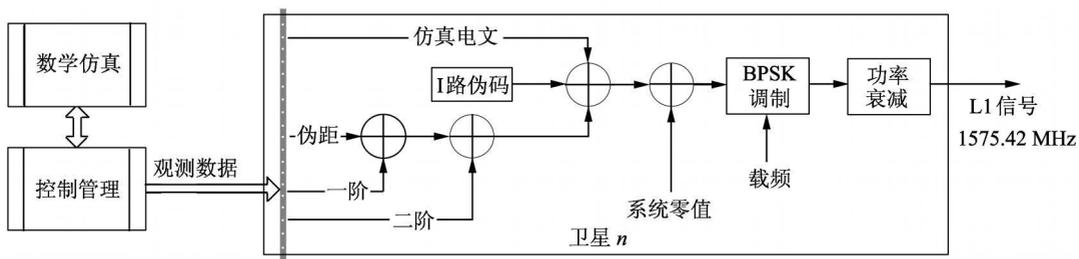


图 2 单颗 GPS 卫星的信号模拟流程

Fig. 2 Simulation procedure of single GPS SV signal

真实的多颗 GPS 卫星信号在空间合成, 而模拟的 GPS 卫星信号在数字域实现叠加合成. 采用地址发生器产生 12 颗卫星的特征码, 分别与对应的导航电文进行叠加, 合成的基带信号通过正交射频调制, 调制为 L1 频点 1.575 GHz 的射频信号.

3 系统设计

GPS 信号模拟源的设计采用基于并行 DSP/FPGA 的高速基带数字合成技术和正交中频、射频调制技术. 多颗卫星信号以数字形式在高性能软件无线电处理平台上计算并合成, 有效提高系统通道间的一致性, 消除了卫星通道间的误差, 也消除了内部时间误差, 确保了高精度. 该方案与射频合成方案相比

增加了软件无线电数字部分设计的难度,使得伪距控制精度、多普勒变化和幅度等均在数字部分计算,简化了射频设计,避免了由射频群时延不一致产生的通道间误差和卫星间的钟差,且数值计算、钟差可控,有效保证了系统的设计指标。

信号模拟源方案原理如图 3 所示。GPS 信号模拟源采用基带加射频的单元模块化结构设计。

基带单元设计采用 1 片 Xilinx 高性能 FPGA XC2V 6000 和 4 片 ADI 高性能并行处理器 TS201 来完成, FPGA 主要完成数据的分配、交换和数字信号的合成, DSP 主要完成多星信号的精密延迟和动态

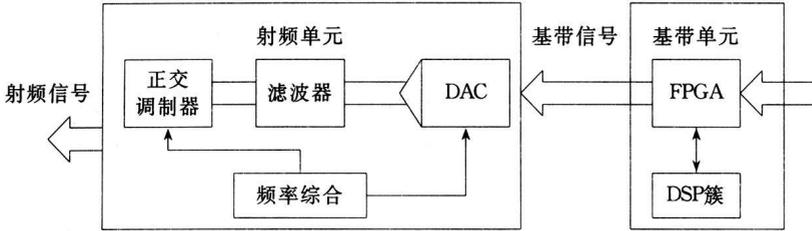


图 3 GPS信号仿真模块电路原理框图

Fig. 3 Scheme of GPS signal simulator module

特性控制,设计上每个 DSP 完成 4 颗星 I 路的导航信号产生,因此 12 颗星的信号产生实际只需 3 个 DSP 即可完成,为了满足系统未来设计的扩展需要,设计上保留了 1 片的余量,而 FPGA 主要完成观测数据到 DSP 的接入分配和输出

模拟信号的合成。对观测数据进行预处理,包括格式转换和任务分配,把收到的观测数据、导航单位等对应卫星进行 DSP 分配,并通过 DSP 的高速 LINK 口传送到 DSP;并对模拟的数字信号进行数字合成后送到 DAC 进行数模转换。

TS201 是采用静态超标量技术的 32 位处理器,处理器工作主频 600 MHz,处理器内部采用双核结构,能提供业界最快的定点和浮点信号处理性能,在 600 MHz 的时钟速率时可以达到每秒 48 亿次乘加运算和每秒 36 亿次浮点操作的运算速度。Xilinx FPGA XC2V 6000 作为信号合成与输出控制单元。XC2V 6000 为 Virtex 系列 600 万门 FPGA 芯片,由于 FPGA 具有并行处理的特点,在模块中起到数据分配、信号合成与输出控制的功能。由 VXI 0 槽送来的观测数据由接口控制 FPGA 进行预处理和任务分配,把对应的观测数据送到对应的 DSP 进行处理。

GPS 信号仿真模块内 DSP 簇结构关系如图 4 所示,图中是一个典型的 DSP 结构图,在每个簇中 0 号 DSP 完成观测数据的预处理,其处理后的数据通过 L2 口高速传递给其它三个 DSP。1, 2, 3 号 DSP 则产生模拟卫星信号,包括导航电文处理、伪码生成、扩频调制、脉冲成形、高精度延迟处理和动态处理,考虑信号的高动态要求,每个 DSP 可完成 3 颗星的信号生成,一个 DSP 簇可完成 12 颗星的信号生成。

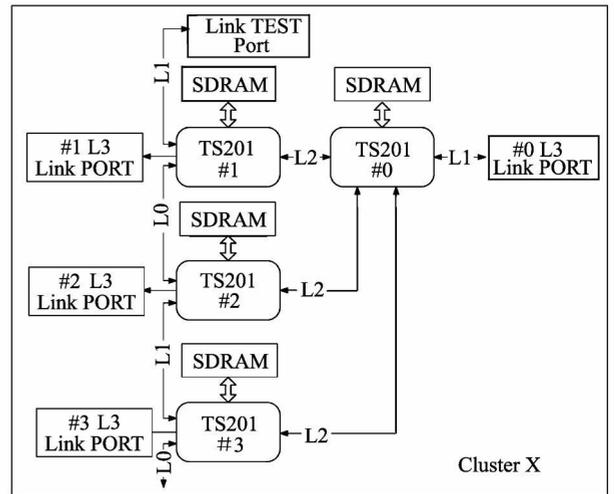


图 4 典型的 DSP 簇

Fig. 4 Structure of DSP cluster

4 实验与分析

4.1 射频通道零值测量

利用模拟的射频信号进行授时,射频信号的产生有一段时间,该段时间称为零值。需要将零值测量出来在基带信号延迟中进行补偿。测量的方法与连接关系如图 5 所示。利用 Agilent 2.5 GHz 带宽 20 G 采样的高性能端对端 Infiniium 54853 数字示波器直接在时域对射频信号进行测量,把示波器的通道 1 连接到系统内与 DAC 时钟同源的 1 pps 信号输出端,通道 3 连接到射频信号输出端,把示波器设置为通道 1 触发,其连接关系如图 5 所示。设置信号输出为单频点单星静态 BPSK 调制,即关闭 Q 支路信号。从示波器上读出伪码翻转点到 1 pps 上升沿的时间差,并长时间跟踪该翻转点的位置,记录示波

器上的读数. 图 6(a), 图 6(b) 分别为从示波器上拷屏的伪码初始相位的翻转变化的图, 当电文首尾符号相同时出现图 6(a), 首尾符号不同时出现图 6(b), 由于导航电文的周期变化, 在示波器上会出现图 6(a), 图 6(b) 规律交替出现现象, 在示波器上找到该翻转点即为伪码相位的起点, 即为系统的零值点. 实际系统的零值点由于有缓存深度和通道延迟约为 $27 \mu\text{s}$, 1~6 星的多次测量零值如表 1 所示. 依次控制不同卫星的信号输出, 即可测量不同卫星的通道零值.

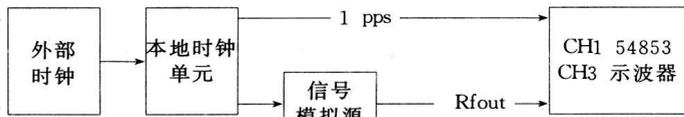
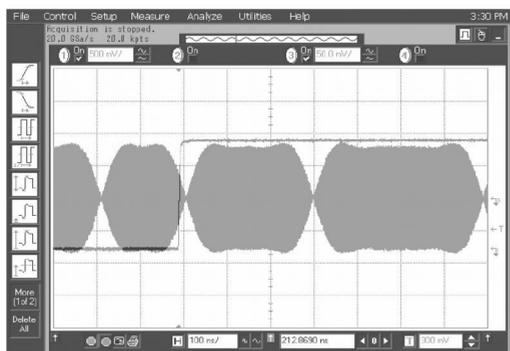
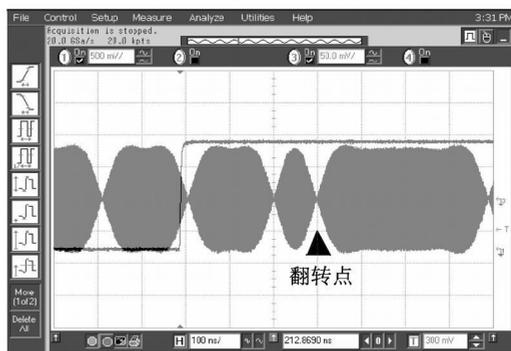


图 5 单向零值测量连接示意
Fig. 5 Test connect in of zero value



(a)



(b)

图 6 单向零值测量波形图

Fig. 6 Test waveform of zero value

在测得各通道单向零值后, 将零值作为一个固定的伪距 $\Delta\rho$ 处理, 假设观测数据中第 i 星的伪距为 ρ_i , 则该星的最终伪距为 $\rho_i = \rho_i - \Delta\rho$.

表 1 1~6 星零值测量数据

Tab. 1 1~6th SV zero value test data

序号	星 1 零值	星 2 零值	星 3 零值	星 4 零值	星 5 零值	星 6 零值
1	27 112. 311	27 112. 311	27 112. 420 4	27 112. 456 8	27 112. 493 2	27 112. 402 2
2	27 112. 475 0	27 112. 202 0	27 112. 274 8	27 112. 420 4	27 112. 384 0	27 112. 311 2
3	27 112. 438 6	27 112. 256 6	27 112. 365 8	27 112. 347 6	27 112. 493 2	27 112. 438 6
4	27 112. 402	27 112. 365 8	27 112. 402 2	27 112. 402 2	27 112. 274 8	27 112. 365 8
5	27 112. 384 0	27 112. 311 2	27 112. 329 4	27 112. 384 0	27 112. 365 8	27 112. 329 4
6	27 112. 402 2	27 112. 438 6	27 112. 456 8	27 112. 311 2	27 112. 384 0	27 112. 420 4
7	27 112. 402 2	27 112. 384 0	27 112. 365 8	27 112. 384 0	27 112. 420 4	27 112. 311 2
8	27 112. 347 6	27 112. 456 8	27 112. 438 6	27 112. 365 8	27 112. 420 4	27 112. 402 2
9	27 112. 347 6	27 112. 438 6	27 112. 293 0	27 112. 365 8	27 112. 402 2	27 112. 402 2
10	27 112. 329 4	27 112. 365 8	27 112. 402 2	27 112. 438 6	27 112. 347 6	27 112. 438 6
均值	27 112. 384 0	27 112. 353 1	27 112. 374 9	27 112. 387 6	27 112. 398 6	27 112. 382 2
方差	0. 050 8	0. 083 2	0. 060 8	0. 043 6	0. 065 2	0. 049 6

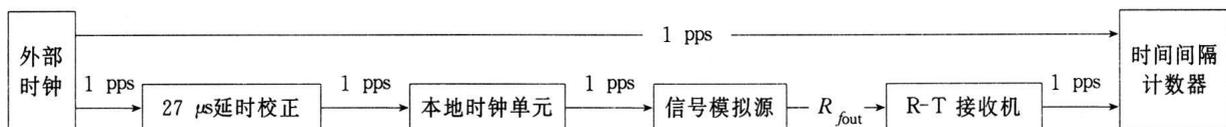


图 7 授时误差测试连接

Fig. 7 Test connection of time transfer

4.2 接收机的测试

产生的射频信号幅度约在 $-20 \sim -40$ dBm 范围之间, 采用 TRIMBLE 公司的 R-T 星卡作为授时接收机, 该接收机在收星条件良好的情况下, 可以达到 15 ns 的精度. 产生的射频信号通过 70 dB 的衰减器后送给 R-T 星卡, R-T 星卡在稳定收星后, 产生输出的 1 pps, 比较输入输出的 1 pps 即可测得总的授时延时. 采用时间间隔计数器(最小分辨率为 7.6 ns) 对两个 1 pps 的时间间隔进行测量, 测试连接如图 7 所示, 测量结果如图 8 所示, 均值为 1.013 333 ns, 方差为 11.064 57 ns.

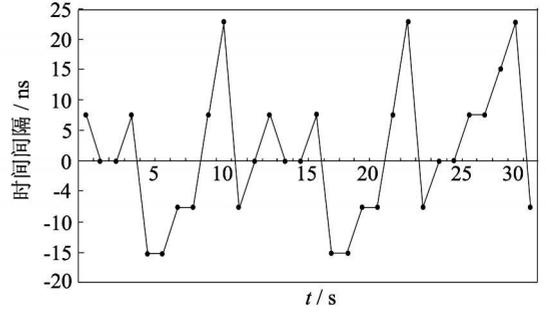


图 8 最终授时误差

Fig. 8 Total timing error

5 结论

本文介绍的冗余 GPS 授时方法在 GPS 不可用时自动切换到外部时间基准, 利用射频信号模拟进行授时. 该方法无需对原有设备进行任何改动, 方便易行. 介绍了数据仿真、射频信号模拟及实验数据分析的过程, 最后测试结果表明, 授时误差均值为 1.013 333 ns, 方差为 11.064 57 ns, 该方法可以应用于 ns 数量级的授时场合.

参考文献:

- [1] 杜雪涛, 李楠, 刘杰. 北斗与 GPS 双授时在 TD-SCDMA 中的应用[J]. 电信工程技术与标准化, 2007(7): 5-7.
Du Xuetao, Li Nan, Liu Jie. Application of BeiDou and GPS dual timing to TD-SCDMA[J]. Telecom Engineer and Standard, 2007(7): 5-7. (in Chinese)
- [2] Candy D W. Navstar/GPS simulator[J]. IEEE Proceedings of the National Aerospace and Electronics Conference, 1977: 323-329.
- [3] 雷建安. GPS 模拟器[J]. 测控信息, 2002(2): 12-13.
Lei Jian an. GPS simulator[J]. Information of Test and Control, 2002(2): 12-13. (in Chinese)
- [4] Kaplan E D. GPS 原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [5] Plumb J, Larson K M, White J, et al. Absolute calibration of a geodetic time transfer system[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2005: 1904-1911.