基于 GPS 射频信号模拟的定时方法

单庆晓，陈建云，钟小鹏，杨俊

（国防科技大学 机电工程与自动化学院，长沙 410073）

摘要：针对采用 GPS 定时的设备提出了基于 GPS 射频信号模拟的定时方法，在不更改原有设备的情况下，可利用外部时间基准进行同步。首先建立卫星的轨道模型，模拟出卫星的导航电文；然后根据设备的位置模拟产生观测数据；再将导航电文调制到卫星的伪随机码上，根据观测数据计算出伪距，对调制的信号进行延迟；最后，通过正交射频调制得到 GPS 模拟信号。已建立的实验模型能实现以上模拟过程。测试表明，该方法可达到 10 ns 级的定时精度。

关　键　词：GPS 定时；射频信号模拟；时间传递

中图分类号：P127.1

文献标识码：A　　**文章编号**：1674-0637(2009)02-0108-07

目前大多数网络同步均采用 GPS 同步。GPS 是美国军方掌控的卫星导航系统，与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。所以对于使用 GPS 同步的网络而言，存在重大安全隐患。

出于对以上安全隐患的考虑，为了提高网络同步的可靠性，需要为 GPS 同步的网络提供作为备份的同步基准。然而许多设备是按照 GPS 同步方式设计制造的，除了 GPS 天线接口外没有其他的时钟接口。若要将这类设备改为外部定时，需要对设备内部进行改动，这会给实施带来极大的困难。

目前 GPS 信号模拟技术获得一定范围内的应用，GPS 信号模拟源采用数字信号处理的方法来模拟真实的 GPS 信号，使得 GPS 接收机正常工作并实现定位[1-3]。如果以外部时间源为基准产生 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。本文以采用“北斗”单向定时接收机获得时间信息的情况为例，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 “北斗”单向定时

目前我国的“北斗一号”导航定位系统具有定时服务功能，其中单向定时具有成本低、精度高等特点，其定时精度可达 100 ns，可满足大部分网络时间同步的需求。在单向定时应用中，用户只需接收 1 颗导航卫星的信号，获得卫星钟差、轨道参数、电离层传播时延参数和测站位置，从而计算出本地钟与卫星钟的钟差[4-5]。单向定时通常应用于本地坐标已知情况下的定时，其原理如图 1 所示。卫星接收地面

收稿日期：2008-07-10

作者简介：单庆晓，男，博士后，副教授，主要从事仪器与测试技术、卫星定时和时间传递、本地高精度频率基准等方向的研究。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

站的上行信号并转发给用户。用户在捕获信号且获得相关峰值后，扣除当前帧的传输时间和信号的传输时间，获得整秒时间。

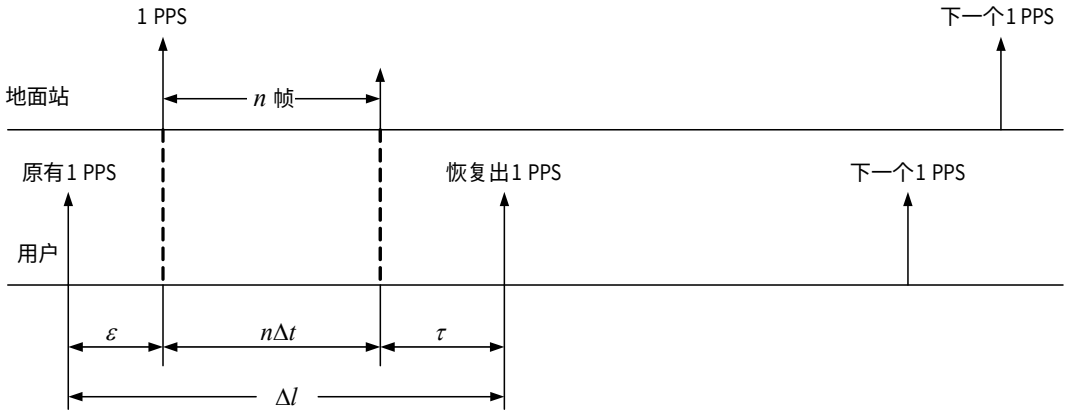

图 1　双星系统单向定时的原理

由图 1 可见，用户机恢复出的秒信号（1 PPS，1 pulse per second）与原有 1 PPS 之间的延时为

$$\Delta l = \varepsilon + n\Delta t + \tau \tag{1}$$

式（1）中，ε 为用户钟与地面控制系统的钟差，n 为当前帧号，Δt 为一帧传输所需时间，τ 为信号传输时延，$\tau = t_{\mathrm{s}} + t_{\mathrm{rs}} + t_{\mathrm{ru}}$，$t_{\mathrm{s}}$ 是接收机设备单向零值，由接收机厂家提供，t_{rs} 是信号自地面站至卫星的传输时间，可由卫星下行导航电文中获取，t_{ru} 是信号自卫星至用户机的传输时间，包括传输距离导致的延时和电离层延时。

2　基于 GPS 信号模拟的定时方法

基于 GPS 射频信号模拟的定时原理如图 2 所示（以采用“北斗”单向定时接收机获得时间信息的情况为例）。“北斗”定时模块接受“北斗”导航卫星信号，得到基准时间，该时间作为 GPS 信号模拟的基准时间。采用高稳晶振作为 GPS 信号模拟的频率基准。采用“北斗”定时模块提供的时间信息对本地高稳晶振进行校准。为实现 GPS 信号模拟，首先要仿真 GPS 的导航电文，其次需要根据设定的位置计算可见 GPS 卫星与设定点之间的伪距和伪距变化率，这些数据称为观测数据。导航电文和观测数据采用数据仿真软件计算获得。

地面接收到的 GPS 信号是 GPS 卫星发射的信号经过空间传输到达的。GPS 信号模拟器采用数字信号处理的方法来实现信号的传输延迟。基带信号生成部分产生卫星的基带信号。产生的基带信号通过射频调制成为 1575 MHz 的载频信号，该信号通过 GPS 天线接口输入至设备，设备内嵌的 GPS 接收机收到该信号后，恢复出“北斗”定时模块的时间，从而达到定时的目的。信号模拟过程比较复杂，有一段延迟时间，因此在信号模拟过程中需要将该段延迟时间予以扣除。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

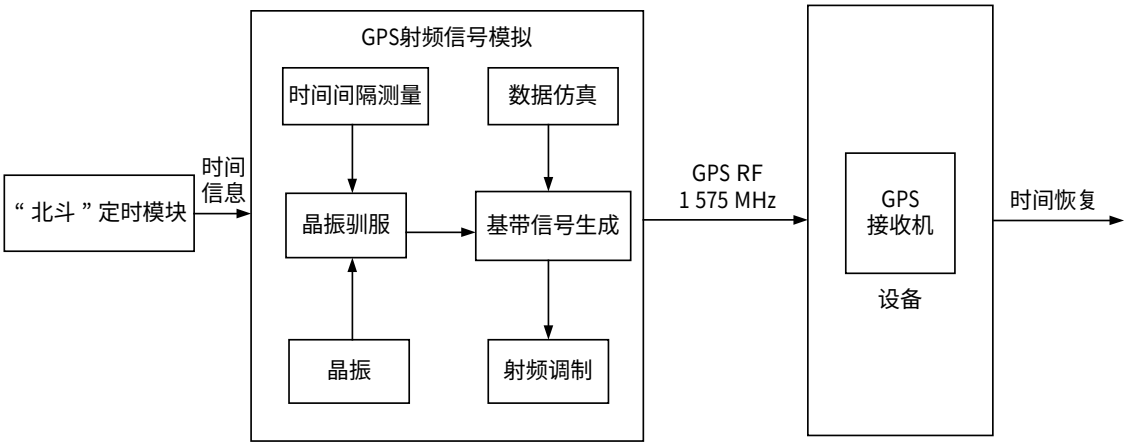

图 2 基于 GPS 射频信号模拟的定时原理

3 数据仿真

模拟的 GPS 信号应能使 GPS 接收机产生与外部时间一致的时间信息。首先，模拟的信号应能使 GPS 接收机收到 4 颗以上的卫星信号，实现定位。由于模拟信号的目的是恢复时间，而真实模拟 GPS 卫星信号比较困难，不仅需要建立 GPS 卫星轨道模型，还需要根据卫星运行状况实时产生数据，耗费大量资源，因此采用离线仿真 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，信号模拟时读取该数据，让 GPS 接收机实现定位。

然而，仅实现定位还无法达到定时的目的，必须要让 GPS 接收机恢复出“北斗”定时模块输出的时间。而仿真的电文中时间参数是预设置的，因此必须对导航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，整周数是指当前的 GPS 时间的星期数，周内秒则指在当前星期内的 GPS 时间的整秒数。整周数和周内秒分别位于第一子帧的 31~52 bit 和 61~70 bit[6]。为了能实时传递连续的时间，在获取“北斗”接收机提供的时间信息后，计算出整周数和周内秒计数。实时调整电文中的参数，使之与输入时间保持一致。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，在输入时间的基础上增加 1 s，调整电文中的参数，从而实现接收机恢复的时间与北斗定时模块提供的时间保持一致。

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。1 帧 GPS 导航电文长度为 300 bit，其中有效位为 280 bit；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接收到卫星信号的变化的伪距，每 20 ms 更新 1 次，为了实现伪距的连续变化，观测数据中还包含伪距变化率和 2 次变化率，便于信号产生过程中的插值。表 1 为单颗星观测数据包格式，该数据包的更新周期为 20 ms，在 20 ms 之内的伪距

表 1 单帧星观测数据包格式

内容	字节数	格式	备注
伪距 ρ_0	8	双精度无符号整数	以 ps 为单位
伪距变化率 ρ_1	4	无符号整数	以 ps/s 为单位
伪距 2 次变化率 ρ_2	4	无符号整数	以 ps/s^2 为单位
信号功率 P	4	有符号整数	以 0.1 dBm 为单位

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

则为

$$\rho = \rho_0 + \rho_1 \cdot \Delta t + \rho_2 \cdot \Delta t^2 / 2 \tag{2}$$

为了实现数据仿真，建立了 GPS 卫星轨道计算模型，用于计算卫星位置、速度。卫星轨道计算均在惯性坐标系中进行。

由卫星轨道计算模型得到的卫星轨道数据称为理想卫星轨道数据，直接用于伪距观测值计算和导航电文参数的计算。在确定卫星轨道模型后，即可得到卫星轨道数据；根据用户的位置坐标，即可生成观测数据；根据获得的卫星轨道数据，结合模拟卫星钟差，电离层延迟和其他信息，拟合导航电文中的星历参数，即可生成导航电文。其计算模型如图 3 所示。

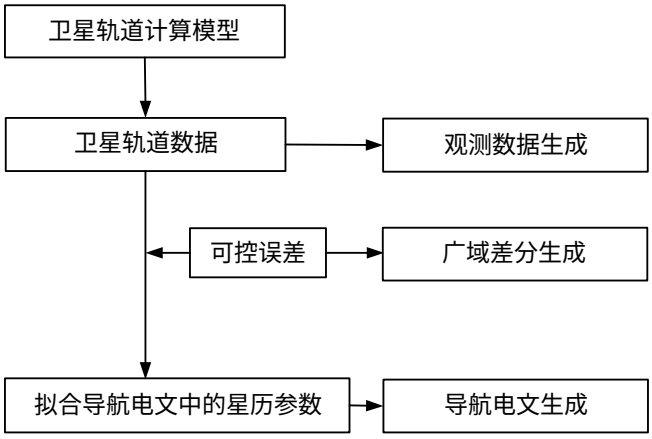

图 3　数据仿真计算模型

4　射频信号模拟

射频信号模拟过程中的关键环节就是模拟信号的传输延迟和多普勒效应。其传输延迟用伪距来表示。当前时刻的伪距利用式（1）可获得。采用数字延迟滤波器的方法实现高精度的伪距延迟。1 个信号 $x(t)$ 通过 1 个滤波器 $h(t)$ 时，其必将产生一定的群时延，对模拟滤波器，这种时延受到包括温度等外界因素的影响，但对数字滤波器来说，其群时延却是一个恒定值，当改变滤波器的群时延 τ，信号的时延就可随之改变。在理论上，这种时延的改变可以做到非常精细，然而受到计算代价和内存容量的限制，事实上，根据系统技术要求选择符合精度要求的步长可以实现码相位精确控制。

卫星信号的模拟流程如图 4 所示。首先描述单颗 GPS 卫星信号的模拟过程：由 Gold 码发生器产生卫星特定的伪随机码；将该卫星的导航电文调制到该伪随机码上，得到基带信号；从观测数据中获得该卫星的伪距，根据伪距设定延迟滤波器的参数，基带信号经过延迟滤波器的处理后获得延迟，这样就得到了单颗卫星最终的基带信号。该信号通过 D/A 转换为模拟信号，再通过正交射频调制变为 L2 频点信号。由于需要模拟 12 颗卫星信号，在获得了 12 颗卫星的最终基带信号后，将它们送入加法器中进行叠加，对叠加后的数字信号再进行 D/A 转换。数字域的叠加有效地提高了系统通道间的一致性，消除了卫星通道间的误差，提高了射频信号模拟的精度。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

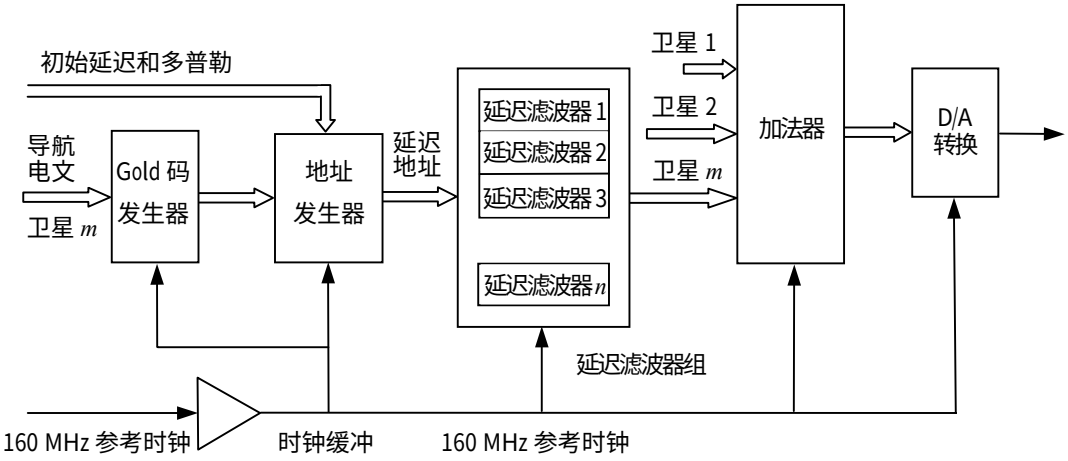

图 4 射频信号模拟流程

5 实验与分析

5.1 数据仿真精度分析

首先编制软件而建立 GPS 轨道模型，然后根据卫星轨道数据拟合星历参数得到导航电文。设定用户坐标，根据卫星的轨道数据得到观测数据。从仿真的数据中读取星历数据，计算出卫星位置，利用读取的伪距信息进行定位。设计的用户坐标在 WGS84 坐标系中的数据为：X = -2 144 821.8 m，Y = 4 397 536.5 m，Z = 4 077 985.5 m。软件定位的数据如表 2 所示。

表 2 软件定位计算结果

序号	X/m	Y/m	Z/m
1	-2 144 821.841 256	4 397 536.460 811	4 077 985.571 592
2	-2 144 821.841 391	4 397 536.461 296	4 077 985.571 772
3	-2 144 821.841 665	4 397 536.461 464	4 077 985.572 132
4	-2 144 821.841 689	4 397 536.461 189	4 077 985.572 071
5	-2 144 821.841 768	4 397 536.461 305	4 077 985.572 089
6	-2 144 821.841 710	4 397 536.461 486	4 077 985.571 933
7	-2 144 821.841 372	4 397 536.460 849	4 077 985.571 981
8	-2 144 821.841 345	4 397 536.461 120	4 077 985.571 875
9	-2 144 821.840 842	4 397 536.460 773	4 077 985.571 624

由表 2 可见定位的结果与设定用户坐标的误差< 0.1 m，导致的延时误差< 0.3 ns。

5.2 GPS 定时接收机测试

本工作模拟产生的射频信号幅度约在-20 dBm~-40 dBm 之间，该信号幅度远大于 GPS 接收机的动态范围。采用 70 dB 的固定衰减器进行衰减。GPS 定时接收机采用 TRIMBLE 公司的 R-T 星卡，该接收机在接收卫星条件良好的情况下可以达到 15 ns 的定时精度（1δ）。

将北斗定时接收机输出的 1 PPS 和 R-T 星卡在稳定收星后产生输出的 1 PPS 进行比对，测量这两个 1 PPS 的时间间隔即可获得总的定时延时。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，测试连接图如图 5 所示。测量结果如图 6 所示，均值为 0.01 ns，方差为 10.27 ns，

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

定时误差在±30 ns 以内波动。

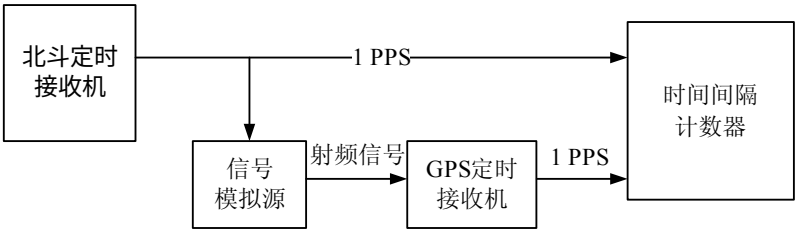

图 5　测试连接图

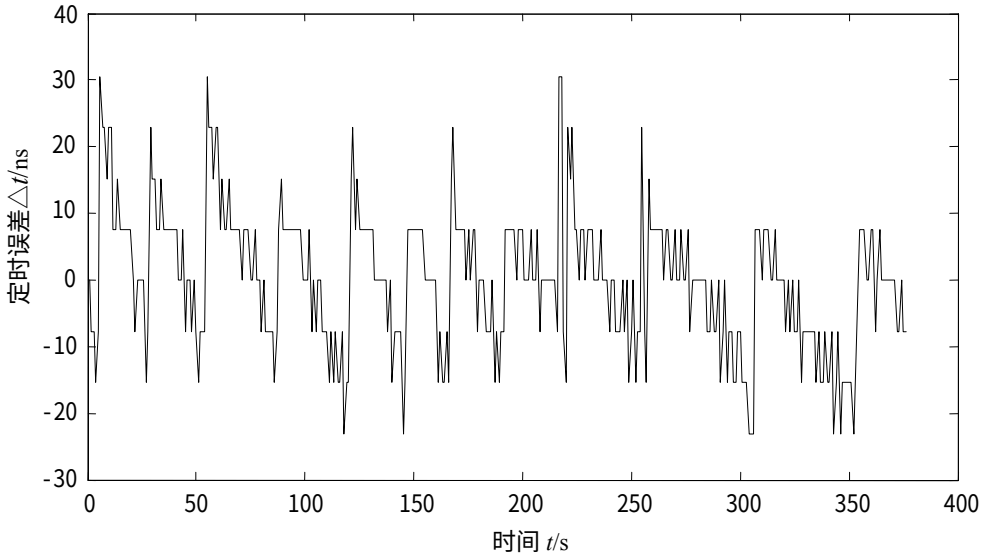

图 6　最终定时误差

6　结论

对原有采用 GPS 接收机获得 UTC 时间的设备，采用本文介绍的方法也可利用“北斗”接收机获得 UTC 时间。射频信号模拟进行定时的方法无需对原有设备进行任何改动，方便易行。本文介绍了数据仿真、射频信号模拟及实验数据分析的过程，最后测试结果表明，该方法可达到 10 ns 的定时精度，定时误差在±30 ns 以内波动。

参考文献：

[1]　张颖慧，常青，张其善，等. 高动态 GPS 信号模拟器的软件实现[J]. 无线电工程, 2003, 33(7): 14-16.

[2]　BROWN A, GEREIN N N C. Advanced GPS Hybrid Simulator Architecture[C] // Proceedings of ION 57th Annual Meeting. [S.l.]: [s.n.], 2001: 564-571.

[3]　孟繁智. 高动态 GPS 卫星信号模拟源的关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.

[4]　谭述森. 卫星导航定位工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.

[5]　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.

[6]　KAPLAN E D, HEGARTY C J. GPS 原理与应用[M]. 寇艳红，译. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2002.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Time Transfer Based on Simulated GPS RF Signal

SHAN Qing-xiao, CHEN Jian-yun, ZHONG Xiao-peng, YANG Jun

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

Abstract: A timing method based on simulated GPS RF signal is proposed for the GPS timing device. By using this method the device can be synchronized with external time without any change making of the original device. At first, the orbit model of GPS satellite is set up and the navigation message is simulated. Then the observation data can be calculated based on the position of device. The navigation data is modulated to the GPS pseudo random code. The pseudo range can be obtained from the observation data and the signal delay is taken into consideration. At last the simulated GPS signal is obtained through orthogonal RF modulation. The established prototype can realize the above simulation procedure and the experiment showed that the timing precision of 10 ns can be obtained by using this method.

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

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net