

GPS 软件接收机全系统仿真

胡 锐, 薛晓中, 孙瑞胜, 段笑菊

(南京理工大学动力工程学院, 南京 210094)

摘 要: 在模块化设计架构下, 利用 Simulink 模块产生等效 GPS 中频信号, 引入真实 GPS 信号导航电文、伪距等信息模拟接收机钟差和钟漂, 使中频信号更接近实际情况。通过仿真分析几种常用载波跟踪环路优缺点, 找到一种最合适的频率跟踪环路, 由环路得到的伪距等信息用最小二乘技术完成定位, 从而实现整个 GPS 接收机系统纯软件仿真。仿真结果表明, 该仿真有效、可行。

关键词: GPS 系统仿真; GPS 信号产生; 捕获; 跟踪; 伪码定位

Whole System Simulation of GPS Software Receiver

HU Rui, XUE Xiao-zhong, SUN Rui-sheng, DUAN Xiao-ju

(Power Engineering College, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

【Abstract】 This paper uses Simulink module to generate equivalent GPS IF signal instead of real signal, adding messages of real pseudo range and rate for simulate receiver's time difference and bias. All baseband signal processing procedures are carefully investigated, the performance of FLL are discussed in details. An optimized method is chosen into the model. An absolute receiver is completed by least squares method. Simulation results show the availability and reliability of the software receiver and a whole receiver system can be finished by software simulation.

【Key words】 GPS system simulation; GPS signal generation; acquisition; tracking; pseudo-code positioning

1 概述

卫星导航定位已成为人类活动中普遍采用的导航定位技术。美国的 GPS 系统最为成熟和完善, 应用越来越广泛, 几乎涉及到国民经济和社会发展的各个领域, 成为信息时代国家基础设施之一。目前 GPS 接收机系统研究开发是研究的热点。利用软件实现信号从信源(卫星)经信道(传输通道)到信宿(接收机)的整个过程, 将能在分析 GPS 系统各个环节的同时, 彻底摆脱硬件限制, 为新软件算法开发节省时间。文献[1]中利用 Simulink 搭建了 GPS 信号从卫星发射到接收部分系统, 介绍了 GPS 信源、信道部分仿真过程。文献[2-3]利用接收到的真实 GPS 中频信号, 对接收机信号处理算法进行了研究。本文采用将真实卫星导航电文和伪距、伪距率信息, 提供给 GPS 信号产生模块生成等效中频模拟信号的方式, 利用 Matlab 程序进行基带处理, 产生定位解算结果, 只使用软件完成整个接收机系统仿真。该方法将与其他新型接收机的研制提供兼容的仿真平台。

2 GPS 中频模拟等效信号的产生

2.1 传统 GPS 的产生及 Simulink 仿真

文献[4]介绍了卫星发送的 GPS 传统信号产生及发射过程。由于无法在 MatLab 平台下直接进行 GPS 信号高频带仿真, 本文采用基带等效模型将频带通信系统转化为等效中频信号基带通信进行系统仿真, 在借鉴文献[1]中各种模型误差基础上设计了中频等效信号源, 图 1 为产生 1 颗卫星信号的仿真框图。

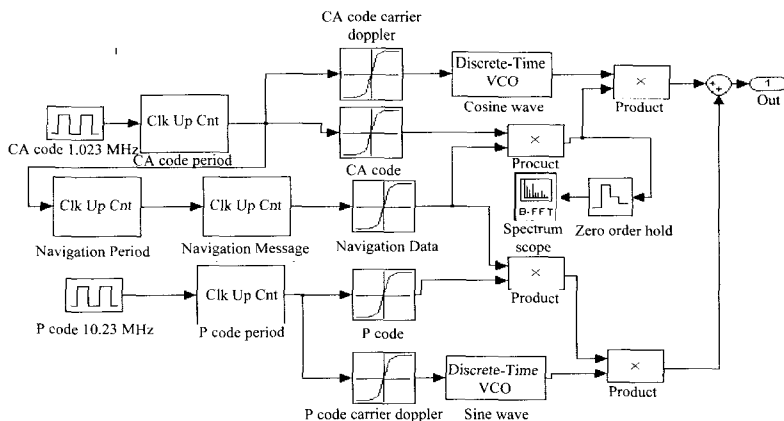


图 1 卫星信号产生仿真框图

2.2 接收机钟偏及钟漂误差的引入

本文使用了真实导航电文、伪距和伪距率信息。接收机输出伪距和伪距率是通过伪码相位和载波多普勒偏移得到, 因此, 后者也能通过前者反算得出。将这些量加入仿真平台, 将使仿真更加接近实际, 同时也能为后续导航解算提供必需的卫星位置等参数。本文将对应的码相位和多普勒偏移量同导航电文一起编入查表序列, 利用 Matlab 脚本程序生成后存入工作区, 再以模块形式调用 Simulink 运行, 由码、频率产

基金项目: 国家“863”计划基金资助项目(2009AA12Z321)

作者简介: 胡 锐(1983—), 男, 博士研究生, 主研方向: GPS/INS 组合导航; 薛晓中, 教授、博士生导师; 孙瑞胜, 讲师、博士研究生; 段笑菊, 博士研究生

收稿日期: 2010-01-20

E-mail: hurui34@gmail.com

生器驱动查表序列获取对应状态,如图 1 所示。真实伪距和伪距率中包含有本地接收机时钟的偏移和漂移,仿真时就直接将这些真实误差量引入模型中。至此构建了 GPS 信号模拟数据生成实验平台。后续是进行信号解调与导航解算。

3 GPS 基带信号处理及定位解算

接收机信号处理是由各通道实现。每颗卫星被分配一独立通道,各通道基带处理主要包括信号捕获、跟踪、导航电文解调和伪距计算 4 块。

3.1 信号捕获

捕获目的是确定 GPS 信号存在,并根据信号特性获取粗略频率和码相位。有时也被称作搜索。文献[3]介绍了 3 种软件搜索方法:串行搜索法,并行频率搜索法和并行码搜索法。

(1)串行搜索以一定码、频率步进二维滑动相关搜索,每次搜索 1 023 个码片和±10 KHz 带宽的频率,占用硬件资源少,却非常耗时。

(2)并行频率搜索利用傅立叶变换,将数据处理从时域变换到频域并行频率搜索,减少了频率搜索时间,但精度受到采样频率和傅立叶变换时用的处理点数限制,处理点数增多,FFT 计算量急剧变大。

(3)循环相关利用傅里叶变换实现的循环相关,进行码相位的并行搜索,减少搜索时间,能得到较高的码相位精度,且运算规模不大。

本文根据各方法优缺点,结合捕获精度要求,为实现短时间搜索到高精度码相位和频率,借助 PC 机强大运行能力,采用先进行循环相关搜索码相位和粗略的载波多普勒频率方式,将精度提高到码相位 0.1 个码片,载波 1 KHz,再利用二次串行精捕,将频率捕获精度提高到 100 Hz。GPS 信号捕获框图如图 2 所示。

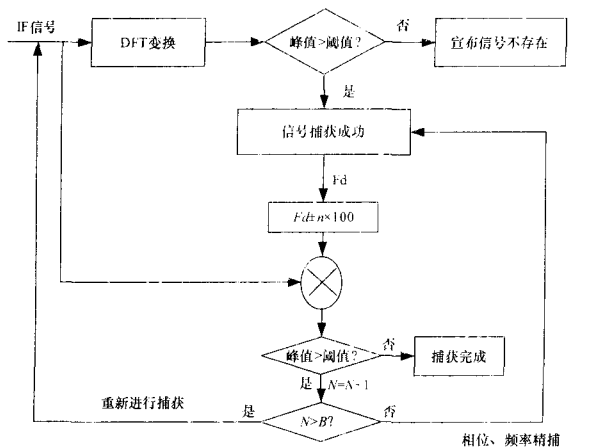


图 2 GPS 信号捕获框图

3.2 信号跟踪

完成信号捕获后,需要进行精确跟踪以保证后续解调的正确和观测量精度。信号跟踪需要同时对载波和码相位进行跟踪,由载波跟踪环路实现信号载波多普勒频偏跟踪,码跟踪环路实现对信号码相位跟踪。

3.2.1 载波跟踪环设计

载波跟踪环由预检测积分器、环路鉴别器和滤波器组成^[4]。在设计载波跟踪环时,为容忍动态应力,预检测积分时间要短,环路滤波器带宽要宽,需要是 FLL(Frequency Lock Loop);为精确测量载波多普勒相位,降低噪声,预检测积分时间又要长,环路滤波器带宽要窄,应为 PLL(Phase Lock

Loop)^[1]。因此,本文采用在接收机工作初期或动态应力大时,用 FLL 把载波跟踪环闭合起来,将多普勒牵引到载波跟踪的线性范围内,然后有规则过渡到 Costas-PLL,在预计的动态允许的条件下使预检测时间尽量长,同时载波跟踪环带宽尽可能窄。

锁频环的设计关系到频率是否可以很好的被牵引到需要范围内。文献[4]列出了几种常用 FLL 鉴频器,交叉、交叉点积和四象限反正切型。前文信号捕获时已提及,本仿真中信号完成捕获精度为 100 Hz,故鉴相器的频率线性输出只要在该范围内即可。又 GPS 信号中含有 50 Hz 的导航电文,会造成相位的 180°翻转,在 FLL 跟踪时,相位翻转未被检测出,因此必须考虑其对环路的影响。文献[4]中介绍的方法都对相位翻转敏感,在鉴频时需要前后两点都在同一个 20 ms 的比特数据内,在具体实现时这是很难满足的。

本文设计了一种二象限反正切鉴频器,能很好地解决该问题,具体算法见表 1。通过 Simulink 模块产生的仿真信号对几种鉴频器进行数字仿真。

表 1 各种鉴频器线性输出范围及比特翻转的影响

名称	鉴频器算法	输出线性范围/Hz	比特翻转影响
交叉	交叉/(t ₂ -t ₁)	±100	有
交叉(符号)	交叉×符号(点)/(t ₂ -t ₁)	±100	有
四象限反正切	Atan2(点,交叉)/(t ₂ -t ₁)	±500	有
二象限反正切	Atan(交叉)/(t ₂ -t ₁)	±100	无

由图 3、图 4 可知,只有四象限反正切鉴频器在整个频带牵引范围内完全正确输出真实的误差频率,其他 4 种鉴频器线性范围都只有±100 Hz;除了二象限反正切外的鉴频器都会在相位的 180°翻转时产生错误鉴频结果。

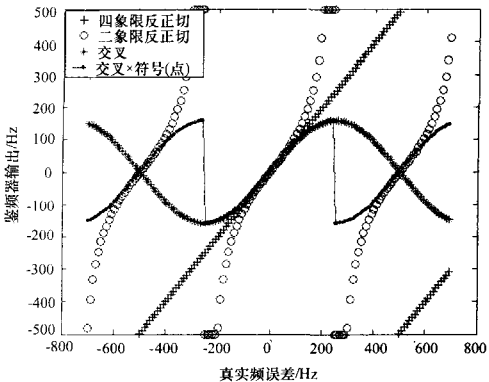


图 3 鉴频器频率输出线性范围比较

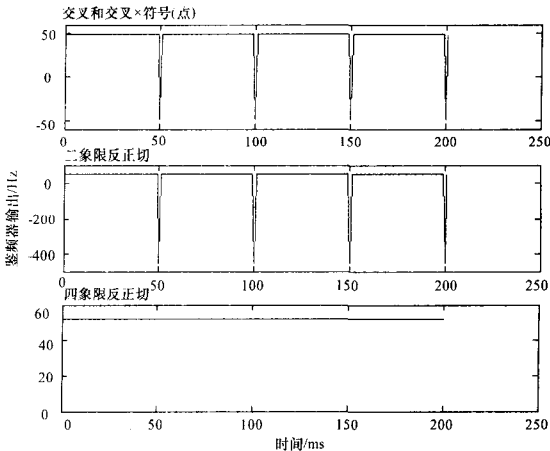


图 4 比特相位翻转对鉴频器的影响

在将频率拉入到合适范围后为实现高精度跟踪,可利用锁相环,为考虑比特翻转影响,一般采用 Costas-PLL,相关内容参考文献[5-6]。

3.2.2 跟踪环路设计

码环同载波环原理上相似,也由预检测积分器、环路鉴别器和滤波器组成^[5],据扩频码的相关特性,采用延迟锁相环(delay lock loop)来完成码的跟踪,利用本地产生超前码(E)、对准码(P)、滞后码(L)与输入信号相关。相关值输给鉴相器,获得相位误差,再经环路滤波后控制本地伪码的数控振荡器(NCO),以实现码片的跟踪。码环路对噪声的误差敏感度比载波环路高 3 个数量级,且两者间具有严格比例关系: $\alpha = f_{\text{code}} / f_{\text{carrier}} = 1.023 / 1\,575.42 = 1 / 1\,540$ 。

因此,将来自载波跟踪环的环路滤波器输出按该比例调整后,作为辅助量加载到伪码环路滤波器的输出端。这样即便在高动态环境下,码环也能一直工作在低阶状态,环路带宽也就可以设置的很窄,提高了码环的跟踪精度。本文采用具有载波辅助的码环,带宽为 0.5 Hz,鉴相器使用文献[1]中归一化的超前减滞后功率型。

3.2.3 导航电文提取与伪距计算

当信号跟踪环路锁定后,就能从信号中剥离掉伪码和载波,从同向支路中提取出所需要的导航电文。

伪距的获取是根据码跟踪环路输出 C/A 码相位,获得 1 ms 以内的时间标度;导航电文速率是 50 Hz/s,因此完成 bit 同步就可以得到 20 ms 内的时间标度;再利用 GPS 卫星信号到达地面接收机的传播时间一般为 67 ms~86 ms,利用式(1)便得到伪距大致值:

$$\rho = c(t_r - t_s) \quad (1)$$

其中, ρ 为伪距; c 为光速; t_r 为接收到信号时刻; t_s 为卫星发射信号时刻。

表 2 是 4 个不同通道描述的传输时间所对应的伪距。

表 2 不同通道描述的传输时间所对应的伪距

通道	传输时间/ms	伪距/m
1	67.732 8	20 305 782.6
2	75.315 6	22 579 048.85
3	82.644 7	24 776 257.75
4	70.541 8	21 147 899.61

3.3 定位解算

完成伪距计算和导航电文解调后,通过解译导航电文可

以得到卫星发射时刻位置(X^k, Y^k, Z^k)等各种参数。伪距的基本观测方程可表示为

$$\rho^k = p^k + \omega^k \quad (2)$$

其中, ρ^k 为第 k 颗卫星到接收机的伪距测量值; p^k 为几何距离; ω^k 为总误差。

式(2)是一非线性方程,解算之前要进行线性化,文献[5]给出了详细过程,这里只给出最后结果:

$$P^k = \rho^k - \frac{X^k - X_0}{\rho^k} \Delta X - \frac{Y^k - Y_0}{\rho^k} \Delta Y - \frac{Z^k - Z_0}{\rho^k} \Delta Z + \omega^k \quad (3)$$

其中, X_0, Y_0, Z_0 表示大致初始位置; $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 表示近似值与估计值的差。

将式(3)应用于多颗卫星,就可得最小二乘法解决问题的一般表达形式($AX=b$)。利用该方法经过几次迭代,就能求得接收机位置。

到此完成了接收机所有仿真模块,经过整机仿真,从基带解调信号到解算出位置需要 32 s,水平位置误差为 15 m。

4 结束语

本文在模块化设计架构下,基于 Matlab/Simulink 软件平台,完成了整个接收机系统的全系统仿真,仿真结果表明该纯软件方法可行有效,从而为软件接收机实现提供了仿真平台,为后续各种不同软件接收机算法的实现提供方便。

参考文献

- [1] 沈超,裴正定. 基于 Matlab/Simulink 的 GPS 系统仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(7): 1857-1860.
- [2] 孙希延,纪元法,施泮立. GPS 软件基带信号处理与定位实现[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(24): 5832-5836.
- [3] Nicolaj B, Peter R. A Single Frequency GPS Software Receiver[D]. Aalborg, Denmark: Aalborg University, 2004: 26-51.
- [4] Kaplan E. Understanding GPS: Principles and Applications[M]. 2nd ed. Norwood, MA, USA: Artech House, 2006: 112-145.
- [5] Tsui J B Y. Fundamentals of Global Positioning System Receivers[M]. 2nd ed. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005: 129-186.
- [6] 刘娣,薄煜明,赵高鹏. GPS 软件接收机信号的快速捕获与跟踪[J]. 计算机工程, 2010, 36(1): 239-241.

编辑 金胡考

(上接第 228 页)

一个接收中断,微控制器 AT89C51 响应接收,将收到的报文接收并保存在存储器中,再通过置位命令寄存器的相应标志发送一个释放缓冲器命令,释放缓冲区,再接收下一帧。

同样,嵌入式控制节点的发送子程序负责嵌入式控制节点响应帧和错误帧报文的发送,将被发送的数据按协议中的数据格式组合成一帧报文,主控制器 AT89C51 检查状态寄存器的“发送缓冲器状态”标志后,再送到 Modbus 控制器的发送缓冲区,置位命令寄存器的“发送请求”标志,发出相应的中断请求,启动发送命令即可顺利实现数据的发送。

4 结束语

本文针对工业控制领域的发展需求,对面向工业应用的 Modbus 嵌入式控制节点设计进行了研究和应用,提出了相应的节点硬件、软件和通信协议解决方案,基于 Modbus 通信协议的嵌入式控制节点在数据传输速率方面可达 1 Mb/s,系统硬件设计简单,成本低,该方案具有通用性强、扩展灵活

等特点,可广泛应用于分布式控制系统中。

参考文献

- [1] 潘悦,佟为明,赵志衡. 基于 C8051F02x 单片机的 Modbus 实验系统[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(S1): 304-306.
- [2] 陈斌,张波,安尝思,等. 基于 Modbus/TCP 及 Web 的电气设备网络智能监控系统[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(9): 1062-1066.
- [3] 李娟,张波,丘东元. 电能质量监测系统中基于 Modbus RTU 的多机通信[J]. 电力设备自动化, 2007, 27(1): 93-96.
- [4] 李群芳,肖看. 单片机原理接口技术及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2005: 78-89.
- [5] 任会峰,阳春华,程朋胜. 基于 Modbus/TCP 的嵌入式系统网络通信设计实现[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(9): 1220-1222.
- [6] 李河清,侯志祥. 基于串行通信的步进电机小型集散控制系统[J]. 计算机工程, 2007, 33(10): 258-260.

编辑 张正兴