

文章编号:1004-9037(2012)06-0677-07

多通道GPS模拟信号源

林静然 高 鹏 周渭民 莫明威 谢林伶 吴海超

(电子科技大学通信与信息工程学院,成都,611731)

摘要:研发了GPS模拟信号源。该信号源能够模拟真实环境中GPS卫星在空中的运转情况,并据此提供相应的GPS卫星信号;同时,该信号源与现有设备中的GPS模块的接口兼容,其输出可直接作为现有GPS模块的输入,在GPS模块中产生相应的时间和方位信息。

关键词:全球定位系统;模拟信号源;现场可编程门阵列

中图分类号:TN914.1

文献标识码:A

Multichannel GPS Signal Simulator

Lin Jingran, Gao Peng, Zhou Weimin, Mo Mingwei, Xie Linling, Wu Haichao

(School of Communication and Information Engineering, University of
Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 611731, China)

Abstract: Global positioning system (GPS) signal simulator is developed. To simulate the running situation of GPS satellites in space, and then provide multi-channel GPS signals. The simulator is compatible with the interface of general GPS Receivers. Its output can be transmitted into the receiver, and the information of time and position can therefore be produced.

Key words: global positioning system (GPS); signal simulator; field-programmable gate array (FPGA)

引 言

全球定位系统(Global positioning system, GPS)是为满足军用、民用领域对连续、实时、精确导航的需求,由美国国防部于1973年研究、创建的基于人造卫星,面向全球的全天候无线电定位、定时系统,主要由GPS卫星、地面监控系统、GPS用户设备三部分组成。

GPS的发展之初主要是为军方提供精确的定位导航服务,现如今,已经广泛运用到民用领域。GPS可为位于海、陆、空各个层面的物体进行定位、导航,可为电力、邮电和通信等网络系统授时与校频,可应用于大地测量、地壳运动监测、工程测量、工程变形监测和资源勘查等各种高精度测量任务中。不管在发达国家或者在发展中国家,GPS产业目前都呈现出高速增长的趋势^[1]。

本文所设计的GPS模拟信号源可用于检验接

收机的捕获跟踪能力,为GPS接收机的研制开发、测试阶段提供仿真环境,也可用于系统级GPS仿真实验,为最终确定GPS测量方案提供依据;同时,在不便于架设天线的环境中,如偏远山区和气候恶劣的地区,GPS模拟信号源也可以保证导航终端的正常工作,大大降低了架设天线的建设成本和维护费用。因此,GPS模拟信号源在军事和民用GPS领域都有着重要的研制价值。

1 系统方案

本文研发的GPS模拟信号源总体框图如图1所示。系统仅包含一个输出接口,直接通过馈线和现有设备上的GPS模块相连。接口用SMA母头。基本工作原理:整个GPS模拟信号源由两部分组成:基带部分和射频部分。基带部分由DSP,FPGA和DAC模块构成。DSP的主要功能是完成系统的控制、可见星选择、星历数据产生、 N 颗可见卫星

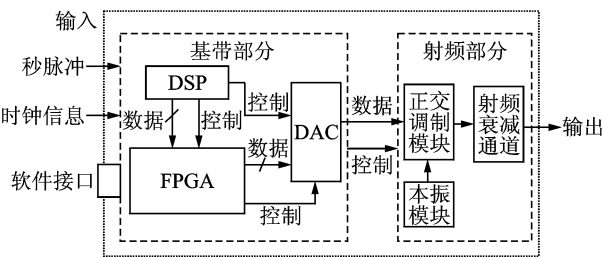


图1 GPS 模拟信号源的总体框图

的导航数据,延时、功率、多普勒参数等的产生,并根据各个参数对信号影响程度的不同,由不同的时间间隔向FPGA 发送更新的信息。FPGA 基于DSP 提供的数据,产生 N 颗可见卫星的导航信号基带波形,并进行 I,Q 变换与叠加。叠加后的数

据经过 DAC 模块变为模拟信号。
射频部分交由本振模块、调制模块和衰减通道组成。本振模块配合调制模块工作,将 DAC 模块提供的基带模拟信号调制到 GPS 的 L_1 载频上,调制模式为二进制相移键控(Binary phase shift keying,BPSK)。最后,调制好的数据送入射频衰减通道,经过多级衰减,达到事先约定的功率水平后输出给 GPS 模块处理。

2 系统硬件设计

如图1 所示,本系统的硬件部分由数字基带部分和模拟射频部分构成。如图2 所示为数字基带模块硬件原理框图。

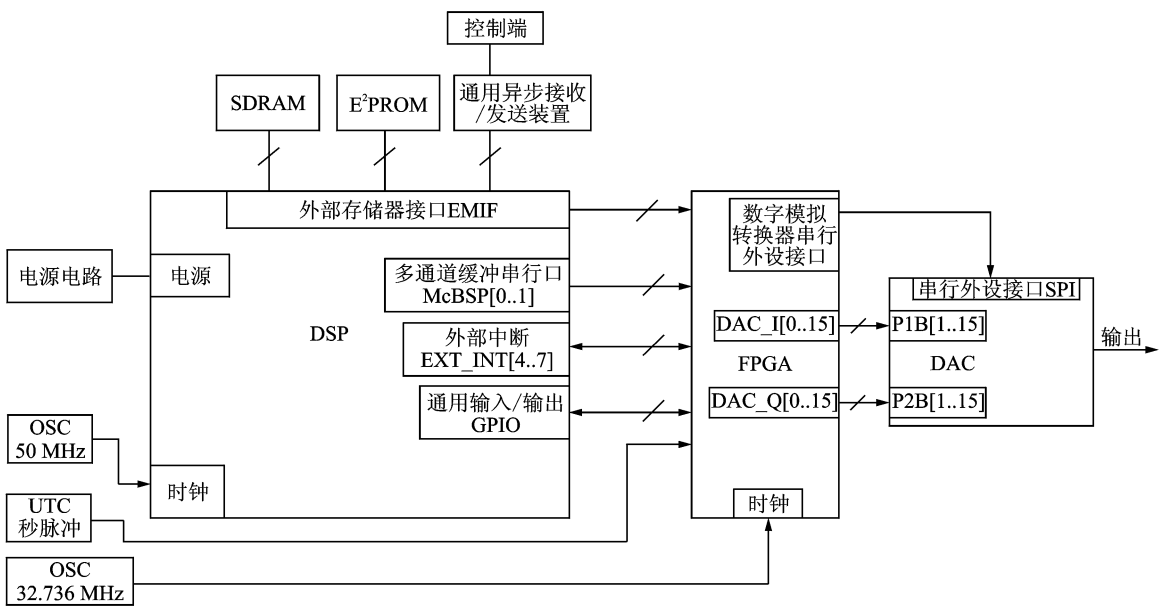


图2 数字基带硬件原理框图

其中DSP 采用的是TI 公司的TMS320C6713, FPGA 采用的是XINLINX 公司生产的VIRTEX-5 系列的XC5VLX110T-1FF1136C, DAC 模块采用的ADI 公司生产的AD9777。

该系统的模拟射频硬件模块包括正交调制模块、本振产生模块和衰减通道,分别选用ADI 公司生产的AD8349,TI 公司的TRF3761-A 系列频率合成器,衰减通道选用的是固定衰减的衰减器^[2]。

3 系统软件设计

3.1 DSP 子系统软件设计

DSP 部分实现的功能包括:系统初始化、接收输入和控制信号、卫星选星、组织导航电文、按更新策略建立所选每颗卫星的功率、延时和多普勒模型

并进行校正和FPGA 通信等。

整个算法处理过程的输入数据为:当前用户位置坐标、时间和当前的卫星历书。

其中,用户位置坐标要求为 ECEF 格式,定义为 $[x_u, y_u, z_u]$,表示当前用户的三维坐标;输入时间 t_{in} 是指模拟信号源开始工作的时间,精确到秒;卫星历书可以从网站上下载最新历书。本项目将网站中未提供的参数做置零的处理,但算法设计按标准流程设计,使整个系统具备升级的能力。

根据以上输入信息,算法经过处理后,最终产生相对于用户位置和时间信息属于可见卫星的控制参数送入FPGA 中。整个过程分为以下几步:

3.1.1 卫星选星

根据输入的用户位置信息和时间信息,计算卫

星星座图,再结合几何精度因子(Geometric dilution of precision, GDOP)等因素,选择4~8颗可见卫星进行信号模拟,步骤如下:

(1) 根据当前时间信息,计算每颗卫星的位置信息;

(2) 根据用户和卫星的位置信息计算所有卫星的俯仰角 E_i 和方位角 A_i ,认为俯仰角 E_i 大于遮蔽角 5° 即为可见卫星。选星仅在当前可见卫星中进行。

(3) 在当前时刻可见卫星中进行选星

为了降低信号源实现的成本,可以在所有可见卫星中选择满足定位精度要求的若干颗卫星,进而仅仅模拟产生这几颗卫星的导航信号。这与卫星导航信号接收机在定位解算时的选星过程类似,因此,信号源在选星方面,可以借鉴现有的导航信号接收机的选星方法。

中国发明专利(专利号为200910086180.9,公开号引用CN101571581)公开了一种导航卫星系统的快速选星方法^[3],在测试阶段发现,该快速选星方法每一次的选星结果相对独立,前一次的选星结果不会影响到后一次的选星结果,这很可能会导致前后两次选星结果中,发生变化的卫星数目过多。对于本项目中的信号源,由于模拟的卫星数目有限,如果单纯采用该专利提供的方法,很可能导致在两次选星之间入选的卫星变化过多,使得利用该信号源的接收机需要重新捕获、跟踪,从而造成在这段时间内接收机无法定位或定位异常,这对一些采用了某种选星策略的接收机而言,在换星时刻会造成定位精度不高、定位时间较长等现象。

基于以上原因,本文提出了一种平滑选星策略,经过测试,这种方法减少了相邻两次选星结果中的变化卫星数目,保持了选星结果的平滑性,在满足定位精度要求的前提下,使得接收该信号源发出的导航信号的接收机在换星时刻的定位精度更好,基本不会出现短时间内无法定位的现象。

在本文中,第一次选星时按照专利号为200910086180.9,公开号为CN101571581的中国发明专利发布^[3]的快速选星方法进行选星,并将GDOP的门限值设置为5,选星间隔设置为12.5 min;第二次及以后的选星过程按照平滑选星的流程进行。平滑选星的步骤如下:

(1) 计算当前时刻所有卫星位置,获取每颗卫星的仰角 E_i 和方位角 A_i ,并去掉仰角小于遮蔽角 5° 的卫星,剩余的为可见星;

(2) 如果步骤(1)得到的可见卫星数目大于所述需要模拟的卫星数目8,转入步骤(3),否则将所有可见卫星作为本次选星结果并转入步骤(8);

(3) 将所有上次入选且本次可见的卫星作为本次选星入选结果的一部分,判断上次入选且本次可见的卫星数目是否等于需要模拟的卫星数目8。如果是,则转入步骤(4),否则转入步骤(5);

(4) 判断上次入选且本次可见的卫星中,仰角最小的一颗卫星的仰角是否小于所述判别角 15° 且小于上次选星时刻的该卫星的仰角,如果是,则将该卫星剔除并转入步骤(7);否则转入步骤(6);

(5) 重复执行第一次选星步骤中的在中仰角或者低仰角区域增选卫星步骤,直至本次总的入选卫星数目等于8,计算入选的8颗卫星的GDOP值,如果该GDOP值未超过所述GDOP门限值,则将该8颗卫星作为本次选星结果,转到步骤(8);如果该GDOP值超过了所述GDOP门限值,则首先以优先剔除较大仰角卫星的原则,在增选卫星中剔除与所有入选卫星两两方位角之差最小的那一颗卫星,然后转到步骤(7);

(6) 计算8颗卫星的GDOP值,如果该GDOP值未超过所述GDOP门限值,则将该8颗卫星作为本次选星结果,转到步骤(8);如果该GDOP值超过了所述GDOP门限值,则首先执行第一次选星步骤中的剔除卫星步骤,然后转到步骤(7);

(7) 将被剔除卫星纳入未入选卫星集合中,按照优先级由高到低对未入选的可见卫星进行排序,上升星的优先级高于下降星,上升星中仰角小的卫星优先级高于仰角大的卫星,下降星中仰角大的卫星优先级高于仰角小的卫星;从优先级最高的未入选卫星开始,将其逐个加入到已入选卫星星座并计算GDOP,找到第一个GDOP值小于门限值的卫星星座作为本次选星结果,若所有组合的GDOP值均超过门限值,则选择GDOP最小的卫星星座作为本次选星结果,然后转到步骤(8);

(8) 结束本次选星流程,在下一个换星时刻返回步骤①重新执行。

3.1.2 组织导航电文^[4]

按照导航电文的格式,利用下载所得的各颗卫星历书,为可见卫星组织其相应的导航电文。

整个组织过程比较简单,就是按照图3所示的导航电文帧格式,将历书中的各项参数填入即可,历书中没有提供的参数可以置零处理。

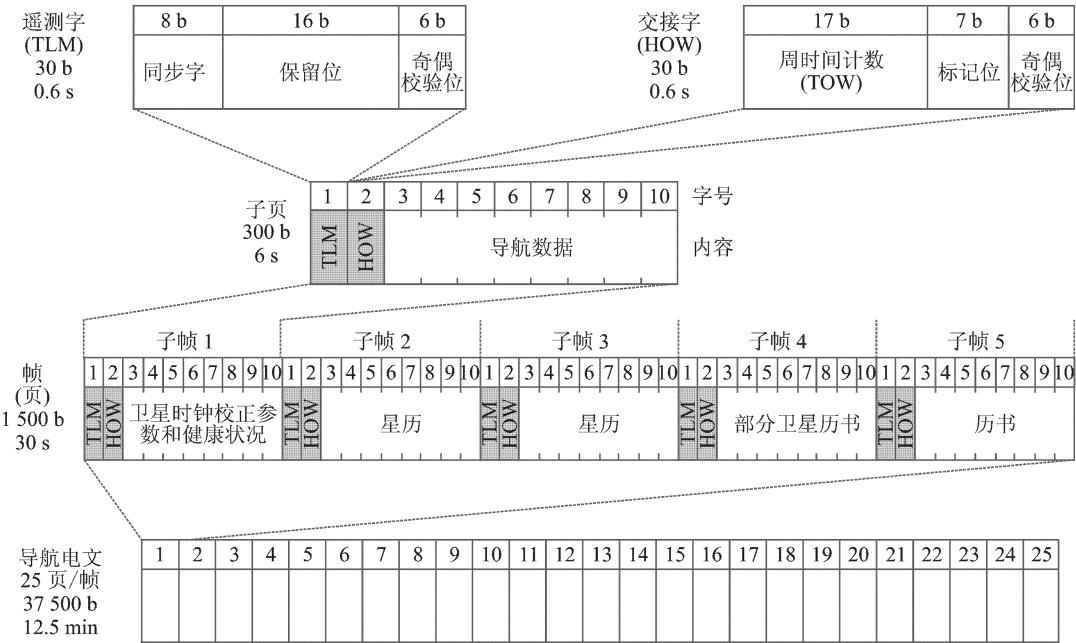


图 3 卫星导航电文格式

3.1.3 建立所选每颗卫星的功率、时延及多普勒模型,计算可见卫星的控制参数

信号源中,卫星的功率与时延模型已经非常成熟,能够很好地与真实情况近似,需要特别说明的是,在建立时延模型时需要考虑卫星时刻与 GPS 时刻的补偿、相对论时延补偿、电离层时延影响、以及电离层传输时地球自转/卫星移动等因素,但是由于很多校正参数在历书中没有提供,本部分所涉及的时延校正在实际测试中对定位的精度影响不大,故作置零处理。

本文采用的估计多普勒频率的方法是利用卫星的星历参数计算该卫星在当前时刻 t_1 和下一时刻 t_2 的位置信息,分别记为 $\mathbf{p}_{s1}=[x_{s1}, y_{s1}, z_{s1}]^T$ 和 $\mathbf{p}_{s2}=[x_{s2}, y_{s2}, z_{s2}]^T$,并利用用户在当前时刻 t_1 的速度信息 $\mathbf{v}_{u1}=[v_{xu1}, v_{yu1}, v_{zu1}]^T$ 和位置信息 $\mathbf{p}_{u1}=[x_{u1}, y_{u1}, z_{u1}]^T$,估计用户在下一时刻 t_2 的位置信息 $\mathbf{p}_{u2}=[x_{u2}, y_{u2}, z_{u2}]^T=[x_{u1}+v_{xu1} \times (t_2-t_1), y_{u1}+v_{yu1} \times (t_2-t_1), z_{u1}+v_{zu1} \times (t_2-t_1)]^T$,其计算步骤如下^[5-6]:

(1) 根据用户卫星的位置信息,分别计算出在当前时刻 t_1 和下一时刻 t_2 时,用户和卫星的相对距离

$$\rho_1 = \|\mathbf{p}_{u1} - \mathbf{p}_{s1}\|_2 = \sqrt{(x_{u1} - x_{s1})^2 + (y_{u1} - y_{s1})^2 + (z_{u1} - z_{s1})^2} \quad (1)$$

$$\rho_2 = \|\mathbf{p}_{u2} - \mathbf{p}_{s2}\|_2 = \sqrt{(x_{u2} - x_{s2})^2 + (y_{u2} - y_{s2})^2 + (z_{u2} - z_{s2})^2} \quad (2)$$

(2) 计算从 t_1 时刻到 t_2 时刻,用户与卫星相对距离的变化量 $\Delta\rho=\rho_2-\rho_1$;

(3) 计算从 t_1 时刻到 t_2 时刻,用户与卫星相对传输时延的变化量 $\Delta\tau=\Delta\rho/c$,其中, c 为光速;

(4) 估计从 t_1 时刻到 t_2 时刻,多普勒频率的平均值 $f_d=f_T * \Delta\tau/T_u$,其中, f_T 为 GPS 信号的载波频率,多普勒频率更新的时间间隔 $T_u=t_2-t_1$ 。

所述步骤(4)完成后,更新当前时刻的值 $t_1=t_2$,更新当前时刻的用户位置信息 $\mathbf{p}_{u1}=\mathbf{p}_{u2}$,更新速度信息 $\mathbf{v}_{u1}=\mathbf{v}_{u2}$,更新用户和卫星的相对距离 $\rho_1=\rho_2$,并计算出下一时刻 t_2 的用户位置信息 \mathbf{p}_{u2} 和卫星位置信息 \mathbf{p}_{s2} ,然后返回步骤(1)。

根据时延和多普勒频移信息,计算每颗可见卫星的载波、C/A 码的频率控制字和初始相位等控制参数,通过 EMIF 总线传输到 FPGA 中,进行后续流程。

3.2 FPGA 子系统软件设计

结合 GPS 模拟信号源的基本框图,FPGA 部分具体实现如下功能:

(1)接收由 DSP 发送的各路卫星的控制参数和导航电文数据;

(2)根据接收的控制参数(频率控制字、相位调整控制字)对 C/A 码的数字控制振荡器(Numerical controlled oscillator,NCO)和载波的NCO 参数进行更新,以实现 GPS 信号中的多普勒频移和传输时延的模拟;

(3)用 C/A 码对导航电文数据进行伪码扩频,生成基带数据;

(4)由生成的基带数据对载波 NCO 输出的数

字中频载波进行 BPSK 调制,并进行相应的幅度控制,最终获得所需的 I、Q 两路数字中频信号^[7];

如图 4 所示为 FPGA 部分的整体设计框图,主要由 3 个模块构成:与 DSP 的接口(EMIF)、1~8 路 GPS 基带信号生成单元及与 DAC 模块的接口。1~8 路 GPS 基带信号生成单元对应 8 颗卫星的信号发生器,每一路单元只是传输的控制参数和导航电文数据不同,硬件电路的原理相同。

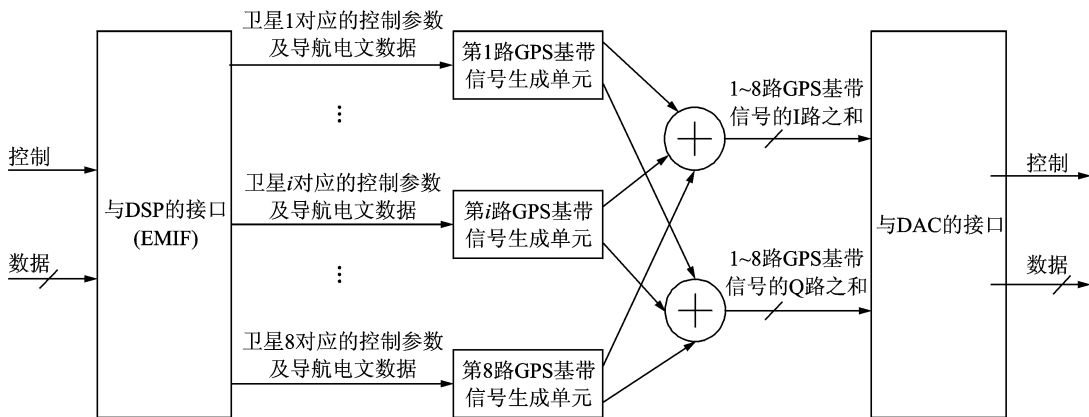


图 4 FPGA 部分整体框图

3.2.1 FPGA 和 DSP 的接口设计

DSP 需要向每个 GPS 基带信号生成单元提供如下的参数:卫星使能标志、卫星 ID 号、参数更新标志字、载波 NCO 的频率控制字、载波 NCO 的初始相位控制字、载波 NCO 的相位调整控制字、码 NCO 的频率控制字、码 NCO 的初始相位控制字、码 NCO 的相位调整控制字、C/A 码发生器相位控制字、初始时刻发射的导航比特对应的 CA 码偏移量、初始时刻发射的导航比特对应的毫秒偏移量、初始时刻发射的导航比特对应的比特偏移量、输出基带信号的幅度控制字、导航电文。

DSP 与 FPGA 通过 EMIF 总线进行参数传输,每个参数在 FPGA 中都采用乒乓存储结构,每个参数都对应一个地址,DSP 通过 EMIF 总线向这些寄存器地址写入数据即可完成参数的更新。

DSP 与 FPGA 之间需要定义一定的通信协议以完成参数的更新。根据前文的定义,将 DSP 与 FPGA 之间的传输参数分为两类:数据参数和控制参数。数据参数指导航电文,是 GPS 模拟信号源发送的实际数据,其更新需要考虑数据的写满和读空。控制参数指除了导航电文之外的其他参数,是

用于控制 GPS 模拟信号源的信号参数,其更新与模拟的 GPS 信号的传输环境有关,需要考虑其更新粒度。因此,数据参数和控制参数的更新过程不同。

(1)数据参数的更新协议

数据参数的更新过程如下:初始时刻,DSP 向 FPGA 写入 12.5 min 内要发送的数据参数;以后每隔 12.5 min 由 DSP 向 FPGA 写入要发送的数据参数;如此循环。

(2)控制参数的更新协议

控制参数的更新过程如下:初始时刻,DSP 向 FPGA 写入所有更新的控制参数后,将更新标志寄存器 UPDATE_FLAG 的相应比特置 1,DSP 保证该写入过程的执行时间小于 2 ms;FPGA 每 2 ms 向 DSP 的外部中断口发送一个中断信号,DSP 检测到该中断信号,则向 FPGA 发送更新的控制参数。此时 FPGA 中的每路 GPS 基带信号生成单元读取对应于该路 GPS 基带信号生成单元的控制参数,FPGA 保证该读取过程的执行时间小于 2 ms;如此循环。

3.2.2 GPS 基带信号生成单元

GPS 基带信号生成单元的设计框图如图 5 所示

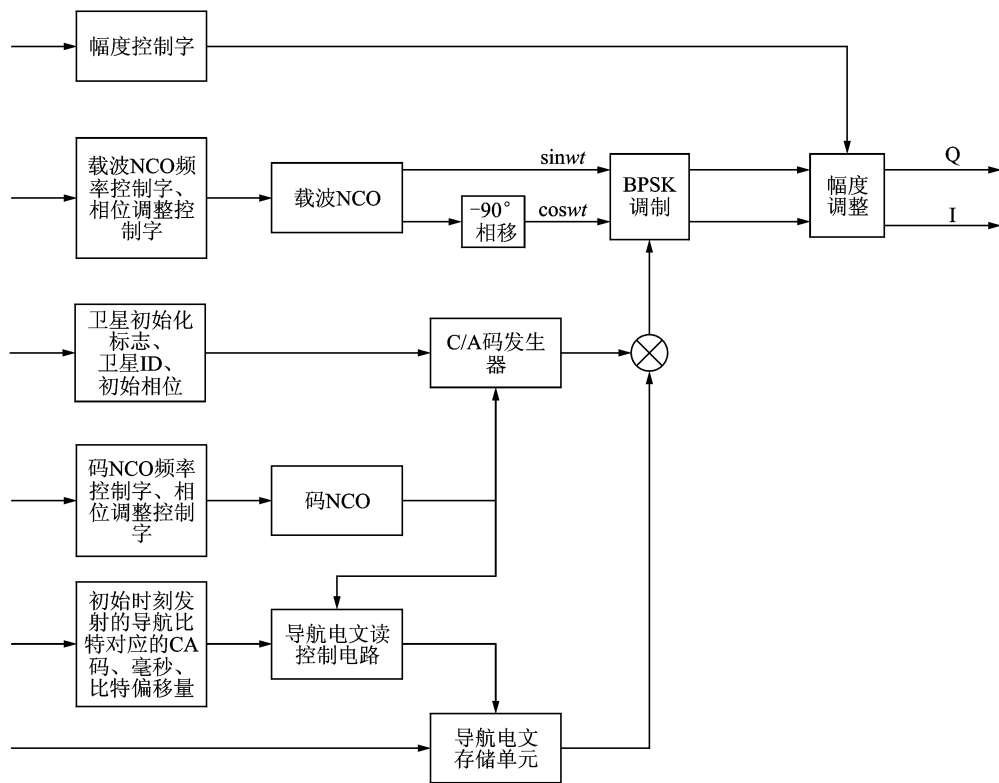


图 5 GPS 基带信号生成单元的设计框图

载波 NCO 的原理框图如图 6 所示。

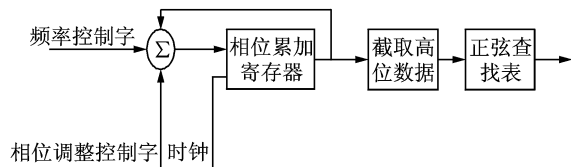


图 6 载波 NCO 的原理框图

载波 NCO 按照系统时钟节拍运作，相位累加器以频率控制字的值进行累加，当相位累加器的值达到 2^N 时，相位累加器作一次模 2^N 运算。截取相位累加寄存器输出的高位Y比特数据作为地址，寻址正弦查找表，读取事先存储在正弦查找表ROM中和该地址相对应的量化正弦幅度值，从而输出本地数字载波信号。

码 NCO 的原理框图如图 7 所示。由于码 NCO

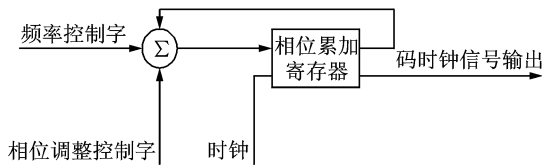


图 7 码 NCO 的原理框图

的输出是作为时钟驱动 C/A 码发生器模块，所以其输出是0、1 电平。相位累加器按照系统时钟频率以频率控制字的值进行累加，当累加值达到 2^M 时，相位累加器作一次模 2^M 运算，码 NCO 的输出取自累加器的进位输出信号。

C/A 码发生器的原理框图如图 8 所示。C/A 码是两个 10 级反馈移位寄存器构成的 G 码产生的。两个移位寄存器于每星期日子夜零时，在置 1

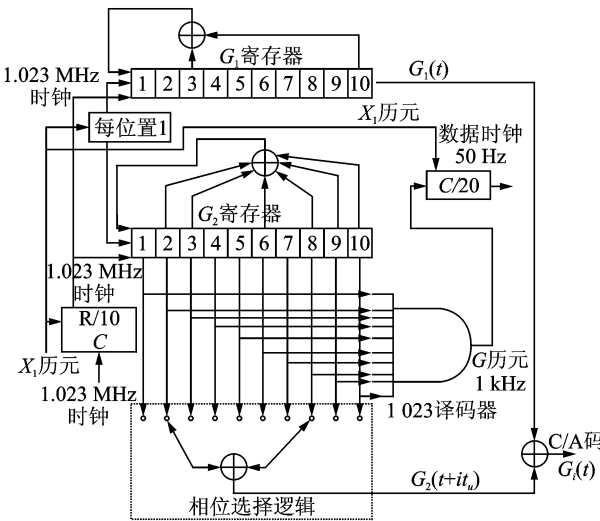


图 8 C/A 码发生器的原理框图

脉冲作用下全处于 1 状态,同时在码率 1.023 MHz 驱动下,两个移位寄存器分别产生码长为 $N=2^{10}-1=1\,023$,周期为 1 ms 的两个 m 序列,分别为 $G_1(t)$ 和 $G_2(t)$ 。其中 $G_2(t)$ 序列经过相位选择器,输出一个与 $G_2(t)$ 平移等价的 m 序列 $G_2(t+it_u)$,然后与 $G_1(t)$ 模 2 相加便得到 C/A 码。即 $C/A(t)=G_1(t)\oplus G_2(t+it_u)$ 。

采用不同的 it_u 值,可以产生 1 023 个 $G_2(t)$,再加上 $G_1(t)$ 和 $G_2(t)$ 本身,一共可以产生 1 025 个结构不同的 C/A 码提供选用。这些 C/A 码具有相同的码长 $N_u=2^{10}-1=1\,023$ bit,相同的码元宽 $t_u=1/(1.023\text{ MHz})=0.98\text{ }\mu\text{s}$,以及相同的周期 $T_u=N_u\times t_u=1\text{ ms}$ 。从这些 $G(t)$ 码中选择 32 个码以 PRN1,⋯,PRN32 命名各个 GPS 卫星。

4 结束语

本文 FPGA 部分采用了乒乓存储结构,同时结合 DSP 外部中断口作为 DSP 与 FPGA 的握手信号,有效地保证了 DSP 与 FPGA 数据传输过程的稳定性和高效性。对选星算法做出改进,使选星结果具有平滑性,在满足定位精度要求的前提下,使得接收该信号源发出的导航信号的接收机在换星时刻的定位精度更好,基本不会出现短时间内无法定位的现象。优化多普勒频率的计算方法,不仅减少了运算量,而且便于流水实现。FPGA 部分对各颗卫星分别采用一路信号产生单元进行模拟,可以非常方便地升级到需要模拟更多颗卫星的设计中。本文实现的 GPS 模拟信号源成本低、体积小,能实现准确定时与授时功能,满足 GPS 接收机的测试需求。

参考文献:

[1] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
Xie Gang. Principles of GPS and receiver design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2009.

[2] 唐斌,董绪荣,杨保平. GPS 软件接收机基带信号处理研究[J]. 电光与控制,2007,14(1):115-119.
Tang Bin, Dong Xurong, Yang Baoping. Research on baseband signal processing for software GPS receiver[J]. Electronics Optics and Control, 2007,14(1):115-119.

[3] 张晓林,陈灿辉,霍航宇. 全球导航卫星系统快速选星方法[P]. 200910086180.9, 2009-11-04.

[4] Elliott D. K. Understanding GPS principles and applications [M]. Second Edition. Boston: Artech House, 2006.

[5] 黄丁发,熊永良,袁林果. 全球定位系统(GPS)——理论与实践[M]. 成都:西南交通大学出版社,2006:10.
Huang Dingfa, Xiong Yongliang, Yuan Linguo. GPS theory and practice[M]. Chengdu: Southwest Jiao Tong University Press,2006:10.

[6] 罗晓莉. 单通道 GPS 模拟信号源设计技术研究[D]. 中国工程物理研究院,2005.
Luo Xiaoli. Research on single channel GPS signal generator [D]. China Academy of Engineering Physics,2005.

[7] 陆娟,常青,张其善,等. 十二通道 GPS 信号发生器的硬件设计[J]. 北京航空航天大学学报,2003,29(4):331-334.
Lu Juan, Chang Qing, Zhang Qishan, et al. Hardware design of twelve channels GPS signal generator [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2003,29(4):331-334.

作者简介:林静然(1978-),男,副教授,研究方向:卫星定位与组合导航,无线与移动通信,卫星与空间通信技术,现代通信中的信号处理,E-mail: jingranlin@uestc.edu.cn; 高鹏(1987-),男,硕士研究生,研究方向:卫星定位与组合导航;周渭民(1986-),男,硕士研究生,研究方向:卫星定位与组合导航;莫明威(1986-),男,硕士研究生,研究方向:卫星定位与组合导航;谢林伶(1989-),女,硕士研究生,研究方向:卫星定位与组合导航;吴海超(1988-),男,硕士研究生,研究方向:卫星定位与组合导航。