

高动态下三阶信号源的设计与实现

刘芊岑, 裴正定, 沈 超

(北京交通大学 信息科学研究所, 北京 100044)

摘 要: 高动态环境下, 由于发射信号的卫星与接收机之间存在着高速的径向相对运动, 必然导致载波信号存在多普勒频移、多普勒一次变化率及多普勒频移的二次变化率。目前现有的三阶信号源硬件实现较为复杂, 且所需先验参数较多。文中基于高动态信号源的基本原理, 提出了一种新的三阶信号源的实现方法, 并基于现场可编程门阵列(FPGA)的硬件平台, 应用 VHDL 语言予以设计实现。利用 Matlab 和 DSP builder 对信号源输出结果进行验证, 验证了该方法的可行性。实践证明, 该方法可大大降低工程实现的难度, 占用硬件资源较少, 满足高动态下对信号实时捕获的要求, 为模拟卫星运动时的高动态环境提供了重要的参考价值。

关键词: 高动态; 卫星多普勒; 多普勒一次变化率; 多普勒二次变化率; FPGA

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2008)05-0197-03

Simulation and Design of Third - Order High Dynamics Signal Source

LIU Qian-cen, QIU Zheng-ding, SHEN Chao

(Institute of Information and Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Since the existence of high speed relative motion between the receiver and the satellite which transmit signal during the high dynamics, the carrier signal is caused to be composed of the Doppler shift, the acceleration of Doppler and the jerk of Doppler. Generally, the hardware design of third - order signal source is complex, and much pre - preference is needed. On the basis of the principle of the high dynamics signal source, a method of the third - order high dynamics signal source is introduced. A new hardware design of FPGA - based employing a hardware description language (VHDL) is proposed. And the simulation result from Matlab and DSP builder approves that the project is feasible. The difficulty in hardware design will be reduced obviously and the hardware resource consumed will be less. At the same time, the method can satisfy the demand of real - time signal acquisition in high dynamics. The important reference value for simulating the performance of satellites in high dynamics is also analyzed in this paper.

Key words: high dynamics; satellite Doppler - shift; acceleration of Doppler - shift; jerk of Doppler - shift; FPGA

0 引 言

高动态环境主要是指飞机导航、导弹制导、飞行体轨迹监测和航天器测控等领域所涉及的工作环境。由于发射信号的卫星与接收机之间存在着高速的径向相对运动, 必然导致载波信号存在多普勒频移、多普勒频移变化率及多普勒频移的二次变化率^[1,2]。当前的航天系统必须解决的问题之一就是高动态下信号的捕获和跟踪。

在高动态环境下, 对二相相移键控调制(BPSK)相位敏感的扩频信号, 其载波多普勒频率变化范围为±

40kHz, 多普勒一次变化率为 4kHz/s, 多普勒二次变化率可达 200Hz/s²^[3]。目前现有的三阶信号源硬件实现较为复杂, 且所需先验参数较多, 不便于满足高动态下对信号实时捕获的要求。文中提出的三阶信号源的设计方法, 可大大降低工程实现的难度, 同时占用硬件资源较少。因此, 该信号源的实现对于更好地模拟卫星运动的实际过程, 检测相关设备在高动态下的性能指标, 具有十分重要的现实意义。

随着现场可编程门阵列(FPGA)技术的发展, FPGA用硬件电路完成算法的过程, 一方面解决了系统的开销问题, 提供了提高系统整体性能的条件, 另一方面, 由于静态 RAM 型的 FPGA 具备可重构特性, 这使得资源利用率得到显著提高。因此, FPGA 在通信信号处理中得到了广泛的应用。文中即在基于 FPGA 的硬件平台上, 对三阶高动态信号源予以硬件实现。

收稿日期: 2007-08-16

作者简介: 刘芊岑(1984-), 女, 福建福安人, 硕士研究生, 研究方向为扩频通信信号处理; 裴正定, 教授, 博导, 研究方向为多媒体通信、信息安全等。

1 卫星多普勒特性分析

多普勒与卫星的运动速度密切相关,而卫星的运动速度又受到其运动轨道的影响。通常认为^[4],仅考虑地球质心引力作用的卫星运动称为无摄运动,卫星轨道称为无摄轨道。同时考虑各种摄动力作用下的卫星运动称为受摄运动,这时的卫星轨道称为受摄轨道。虽然,受摄轨道更接近实际轨道,然而忽略摄动力所建立的卫星动力学方程,可得到十分严密的解析解,它基本上可以相当近似地表述卫星轨道。在此基础上,再研究各种摄动力对卫星运动的影响,可推求得到更加精确的受摄轨道。在无摄运动下,如果把地球作为理想球体,卫星的空间位置可由以下 6 个轨道参数确定。如图 1 所示。

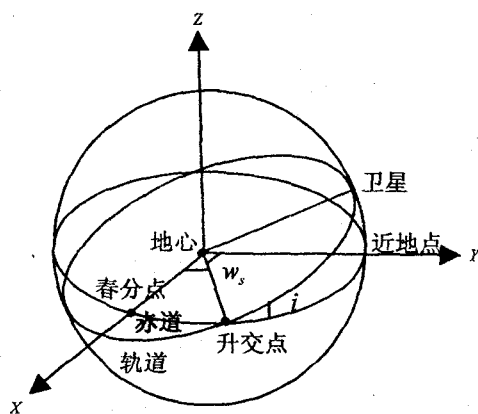


图 1 地心直角坐标系下卫星轨道及参数

由图 1 可见, i 角为卫星轨道面和赤道面之间的夹角,称为卫星轨道面倾角,它也是地球自转方向与卫星运动方向的交角。当 $i = 90^\circ$ 时,卫星轨道平面通过地球南北极上空,这种轨道称为极地轨道。当 $i = 0^\circ$,卫星轨道平面与地球赤道平面重合,这种轨道称为赤道轨道。图中其余轨道参数由于文中并未涉及,所以暂不作讨论。另外,文中只讨论 $i = 90^\circ$ 的情况,则卫星与地面站之间几何关系图可简化如图 2 所示。

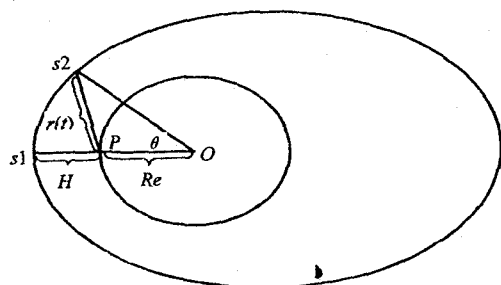


图 2 卫星与地面站几何关系

其中 P 为地面站位置, Re 表示地球半径, H 表示卫星高度, O 为地心, s_1 、 s_2 表示卫星所在位置,图中根据三角关系可得

$$r(t) = \sqrt{Re^2 + (Re + H)^2 - 2Re(Re + H)\cos(\theta)} \quad (1)$$

则多普勒频偏

$$f_d = \frac{f_c}{c_0} \cdot v_r = \frac{f_c}{c_0} \cdot \frac{dr(t)}{dt} = \frac{f_c \cdot Re(Re + H)\sin(\theta) \cdot \theta'(t)}{c_0 \sqrt{Re^2 + (Re + H)^2 - 2Re(Re + H)\cos(\theta)}} \quad (2)$$

其中 $\theta = \frac{\pi}{2} - \arcsin(Re + H) - \omega_F t$ 。当卫星经过处于 s_1 位置(地面站正上方)时,忽略卫星自转所产生的影响,则有: $\omega_F = \omega_S$, 其中 ω_S 为卫星运动角速度。则卫星多普勒一次变化率为

$$f_{dd} = \frac{f_c}{c_0} \cdot \frac{d^2 r(t)}{dt^2} = \frac{f_c \cdot a \cdot [\theta'(t)]^2 [b \cos\theta - a \cos^2\theta - a]}{c_0 (b - 2a \cos\theta)^{3/2}} \quad (3)$$

其中 $a = Re(Re + H)$, $b = Re^2 + (Re + H)^2$ 。

卫星多普勒二次变化率为:

$$f_{ddd} = \frac{f_c}{c_0} \cdot \frac{d^3 r(t)}{dt^3} = \frac{f_c \sin\theta \cdot \theta''(t)}{c_0} \left[\frac{2a \cos\theta - b}{(b - 2a \cos\theta)^{3/2}} - \frac{3(b \cos\theta - a \cos^2\theta - a)}{(b - 2a \cos\theta)^{5/2}} \right] \quad (4)$$

2 三阶信号源模拟

卫星发射的载波信号经过信道传输后(不考虑多径等效效应)可以表示为:

$$x(t) = \cos(\theta(t)) = \cos(2\pi f_c t + 2\pi f_d t + \pi f_{dd} t^2 + \frac{\pi}{3} f_{ddd} t^3 + \varphi_0) \quad (5)$$

其中 f_c 表示载波频率, φ_0 表示初始相位。由于 $\theta(t)$ 中包含常数因子 2π , 为简化讨论, 可设

$$c(t) = \frac{\theta(t)}{2\pi} = f_c t + f_d t + \frac{f_{dd}}{2} t^2 + \frac{f_{ddd}}{6} t^3 + \frac{\varphi_0}{2\pi} \quad (6)$$

从而 $x(t) = \cos(2\pi \cdot c(t))$ 。令 $t = nT_S$, 这里 $T_S = 1/f_s$, 其中 f_s 为采样频率, 则

$$c(n) = f_c nT_S + f_d nT_S + \frac{f_{dd}}{2} n^2 T_S^2 + \frac{f_{ddd}}{6} n^3 T_S^3 + \frac{\varphi_0}{2\pi} \quad (7)$$

$$\text{令 } c_1(n) = \nabla c(n) = f_c T_S + f_d T_S + \frac{f_{dd}}{2} T_S^2 (2n - 1) + \frac{f_{ddd}}{6} n^3 T_S^3 [3n^2 - 3n + 1] \quad (8)$$

$$c_2(n) = \nabla^2 c(n) = f_{dd} T_S^2 + f_{ddd} T_S^3 (n - 1) \quad (9)$$

$$c_3(n) = \nabla^3 c(n) = f_{ddd} T_S^3 \quad (10)$$

$\nabla c(n)$ 表示后向差分。

由式(8)~(10)可知, $c_1(n)$ 与 f_c 、 f_d 、 f_{dd} 、 f_{ddd} 有

关,其中 f_c 、 f_d 为静止频率, $c_2(n)$ 是关于 f_{dd} 、 f_{ddd} 的函数, $c_3(n)$ 只与 f_{ddd} 有关,因此可以采用数字积分的方式逐级得到 $c(n)$ 。

3 硬件实现及结果验证

采用 20MHz 中频采样,以每 80 分钟运动一周计,则 $\omega_s = 2\pi/(60 \cdot 80)$,取地球半径 $Re = 6400\text{km}$,卫星高度 $H = 900\text{km}$,图 3 即为三阶高动态信号源实现框图。

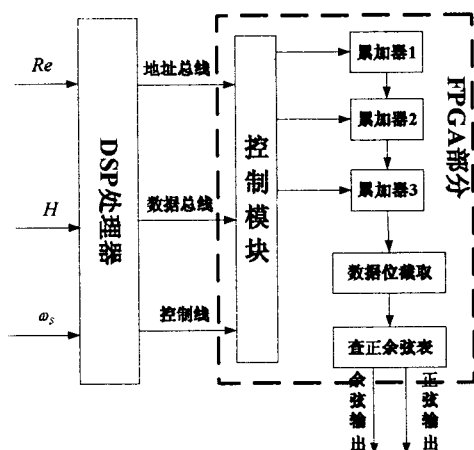


图 3 三阶高动态信号源实现框图

其中, DSP 采用美国德州仪器公司生产的 TMS320C6713。FPGA 芯片采用 Xilinx 公司的 Virtex-II 系列产品 xc2v3000-4fg676。整个设计采用 Verilog 语言^[5]自顶向下描述。DSP 与 FPGA 之间建立握手信号,按照协议 DSP 每隔 20ms 通过地址总线和数据总线往 FPGA 置一次参数,每个时钟上升沿触发时,各个累加器及加法器均同时工作。累加结果经数据位截取后,通过正余弦查找表单元,即得到正弦信号和余弦信号的输出。

使用逻辑分析仪观测结果如图 4 所示。

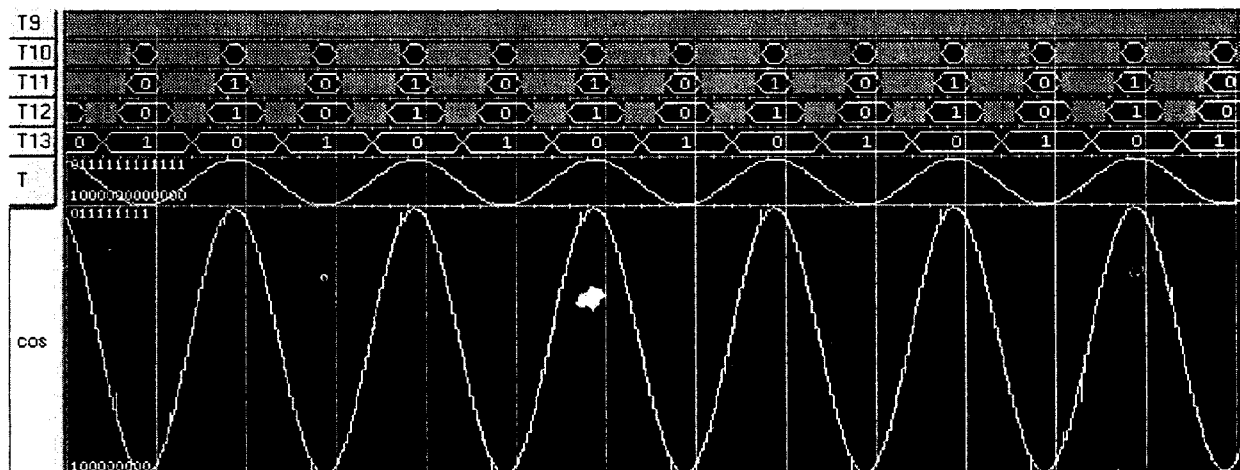


图 4 逻辑分析仪观测到的正余弦信号

图 4 中“T”部分为采用 13bit 量化后的正余弦波形,“cos”部分为采用 9bit 量化后的正余弦波形。到此完成了对信号源的实现。

采用 Altera 公司提供的 DSPbuilder,结合 Matlab 对信号源输出进行仿真,观测频率变化。其结果如图 5 所示。图 5 横轴表示频率,纵轴表示时间,可以清楚地看到,随着时间的推移,频率从 20MHz 起,由于多普勒频率及多普勒一次变化率的存在,逐渐递增变大,同时受多普勒二次变化率的影响,其递增速度越来越快。从而进一步验证了该信号源实现方法的准确性。

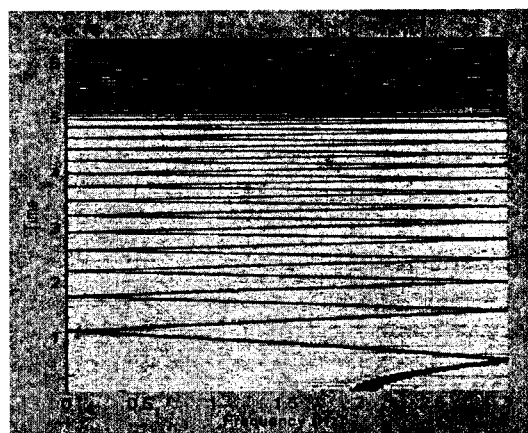


图 5 STFT(短时傅里叶变换)后频率变化图

4 结 语

提出了一种基于 FPGA 硬件平台,应用 VHDL 语言设计实现三阶高动态信号源的方法。整个信号源的实现结合软件无线电的思想,综合采用了 DSP 和 FPGA 这两大当今主流产品,具有占用硬件资源少、功耗低、精度高等优点,大大降低了信号源实现的难度,对精确模拟卫星运动的高动态过程提供了重要的参考价值。

2.2 均方根误差与训练步数关系

PIDNN 网络在神经网络工具箱找不到现成的训练和测试方法,因此,只有在 Matlab 平台上编程,进行仿真。均方根误差与训练步数的关系曲线见图 2。

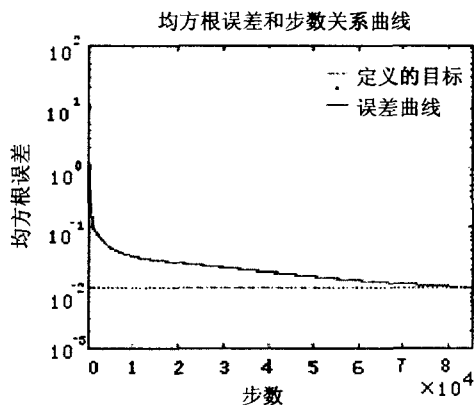


图 2 均方根误差和训练步数的关系曲线

2.3 网络验证

当训练到 85216 步时,达到预先设定的性能指标,为了说明网络能按一定的精度逼近污水处理系统。用另一个月的数据作为测试集进行测试,测试的结果是:PIDNN 网络输出和系统实际输出相差不大。图 3 是 PIDNN 网络输出和系统实际输出比较图。

3 结 语

从图 3 可见,污水处理系统输出和 PIDNN 输出的三项指标曲线都基本拟合。说明了该方法用于辨识污水处理系统参数是切实可行的。

由于 PIDNN 隐含层单元的特殊功能,在进行系统辨识时,其结构和神经元的个数选取比较规范。从而克服了传统的多层神经网络在结构和隐层神经元个数

选取时的困难。另外,PIDNN 积分元具有独特的定义,用它来逼近大时延的动态系统,具有特殊的作用。该方法还可以根据不同的污水系统参数,灵活设计输入输出神经元个数,辨识其它的污水处理系统。

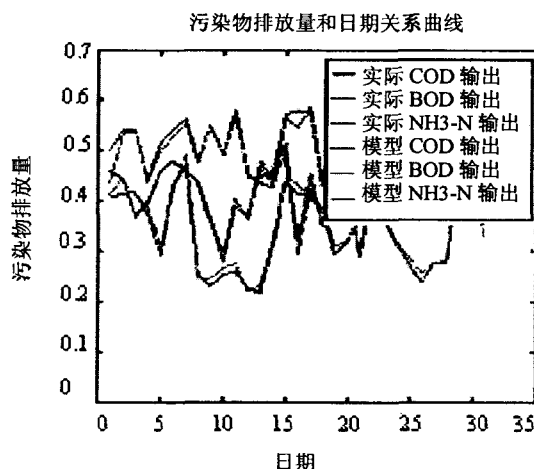


图 3 PIDNN 网络输出和系统实际输出

参考文献:

- [1] 伊学农. 基于改进 BP 网络与 MISO 模型的污水系统建模[J]. 水处理技术, 2005(10): 21-24.
- [2] 刘建勇. 智能控制在污水处理中的应用现状与展望[J]. 中国给水排水, 2002(11): 22-25.
- [3] 舒怀林. PID 神经网络及其控制系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 28-34.
- [4] Belanche L. Prediction of the bulking Phenomenon in wastewater treatment plants[J]. Artificial Intelligence in Engineering, 2000, 14: 307-317.
- [5] 田景文. 人工神经网络算法研究及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 35-38.
- [6] 陆宁, 周伟. 基于 LabVIEW 的智能 PID 控制器的设计[J]. 微机发展, 2005, 15(4): 66-68.

(上接第 196 页)

功能强,界面美观,操作方便。另外,虚拟仪器的很多功能由软件来完成,使得功能维护和升级更加方便。

参考文献:

- [1] 杨乐平,李海涛,杨磊. LabVIEW 高级程序设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- [2] 朱耀东,张焕春,经亚枝. 虚拟逻辑分析仪的设计与实现

[J]. 仪器仪表用户, 2002, 9(4): 20-22.

- [3] 许海清,田书林,戴志坚. 基于 USB 总线的逻辑分析仪设计[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 310-312.
- [4] Future Technology Devices Intl Ltd. FT245BM Data Sheet [EB/OL]. 2002-08. www.ftdichip.com.
- [5] 张红兵,谢运祥. 利用 FT8U232AM 实现的 USB/RS232 转换器[J]. 国外电子元器件, 2002(5): 41-42.

(上接第 199 页)

参考文献:

- [1] Ali I, Al-Ahahir N, Hershey J E. Doppler characterization for LEO satellites[J]. IEEE transactions on communications, 1998, 46(3): 309-313.
- [2] 孙白波. 遥控,安全,监控[M]. 北京:宇航出版社, 1995.
- [3] 任俊涛,邵定蓉,李署坚. 基于软技术的高动态扩频信号载波跟踪技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2002(6): 64-67.
- [4] 王惠南. GPS 导航原理与应用[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [5] 夏宇闻. Verilog 数字系统设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2003.