

文章编号:1001—893X(2010)03—0042—03

FM 解调及 AFC 算法的 VHDL 设计实现^{*}

孙秀睿

(中国工程物理研究院 电子工程研究所,四川 绵阳 621900)

摘 要:根据遥测中频 PCM/FM 信号的解调原理,介绍了 FM 解调及自动频率控制(AFC)设计的理论架构和实现方法,通过理论分析、公式推导和 Matlab 仿真等手段证明了方法的正确性,在此基础上完成 VHDL 程序设计,最后进行了仿真测试和实验验证。仿真结果和实验结果证明了该实现方法的可行性。
关键词:遥测;PCM/FM;解调算法;自动频率控制;低通滤波器;VHDL
中图分类号:TN763 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.1001—893x.2010.03.009

VHDL Design of FM Demodulation and AFC Algorithm

SUN Xiu—rui

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics,Mianyang 621900,China)

Abstract: The method of FM demodulation of telemetry PCM/FM signal is given. By theoretical analysis, formula deduction and Matlab simulation, the correctness of this FM demodulation and AFC method is confirmed. The VHDL code is designed according to the mathematical model. Finally,computer simulation and experimentation are provided and the result proves the feasibility of this implementation approach.
Key words: telemetry;PCM/ FM;demodulation algorithm;AFC;low pass filter;VHDL

1 引 言

PCM/FM 是常用的调制体制之一,传统的调制解调处理以模拟技术为主。由于数字技术的发展,信号和数据处理能力大大提高,促进了遥测通信系统从模拟终端设备到数字设备的发展。数字方法的采用可以满足在通用平台上实现多种通信体制下的信号处理工作,避免重复设计,节约成本,提高设计的灵活性。本文根据全软化解调原理,采用数字方法实现了中频 PCM/FM 遥测信号的解调,并通过仿真与实验证明了设计的正确性和可行性,获得了较好的解调性能。

2 基本原理

FM 解调方案设计框图如图 1 所示。前端的基

带 I、Q 信号进行数字鉴相,计算出各点相位,经数字鉴频得到频率输出,由于此时的频率值中还包含有载波频偏成分,经过 AFC 后消除了载波频偏的影响,最后用低通滤波器进行滤波得到 FM 解调的输出。

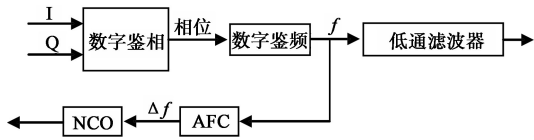


图 1 FM 解调方案设计框图
Fig. 1 Block diagram of FM demodulation

3 软件解调算法的数学模型

3.1 数字鉴相

数字鉴相采用的是 CORDIC 算法。收到前端送来的基带 I、Q 信号后,首先要完成的就是从每对

^{*} 收稿日期:2009—11—27;修回日期:2010—01—28

I、Q 样点中获取相位信息。采用 CORDIC 算法可以计算出每对 I、Q 样点对应的幅度和相位。FPGA 中提供了 CORDIC 算法的 I PCORE,通过调用 I PCORE,可以较为容易地在 FPGA 中实现样点相位提取的功能。

CORDIC 算法是基于一组迭代方程,这组方程很容易用硬件实现,而它包括的基本运算只有加法、减法、移位。另外,还用上了一些 ROM 表和寄存器。所以,它可以达到很高的运算速度。

假设接收到的 PCM/FM 信号为

$$f(t)=\cos[2\pi(f_0+f_p)t+2\pi\cdot k_f\int_0^tf(t)dt]\tag{1}$$

式中,载波频率为 f_0 ,调制信号为 $f(t)$, k_f 为调制指数, $f_p=f_v+f_d$, f_v 为发射端载波和接收机本振不稳定性带来的载波频率偏移, f_d 为飞行器高速飞行带来的多普勒频率分量,这两个频率偏移量使信号实际中心频率在载波频率附近缓慢变化。

接收到的中频调制信号经下变频和低通滤波后,I、Q 两路的输出结果为

$$\begin{aligned} I&=\frac{1}{2}\cos[2\pi f_p t+2\pi k_f\int f(t)dt+\varphi] \\ Q&=\frac{1}{2}\sin[2\pi f_p t+2\pi k_f\int f(t)dt+\varphi] \end{aligned}\tag{2}$$

反正切运算后相位 $P(n)$ 为

$$P(n)=2\pi f_p n+2\pi k_f\sum_{i=0}^nf(i)+\varphi\tag{3}$$

而所采用的 CORDIC 算法正是完成了反正切的运算任务,得到了数字相位。

3.2 数字鉴频

在本设计中采用数字相位延时相减的方法计算数字频率。

根据式(3),离散相位可表示为

$$P(n)=2\pi f_p nT_s+2\pi\cdot k_f\sum_{i=0}^nf(i)\cdot T_s+\varphi\tag{4}$$

式中, T_s 为采样周期,设 $n+1$ 时刻对应的载波频率偏移为 f'_p ,则有:

$$P(n+1)=2\pi f'_p(n+1)T_s+2\pi\cdot k_f\sum_{i=0}^{n+1}f(i)\cdot T_s+\varphi\tag{5}$$

式(5)与式(4)相减,初相消去,此外,由于 f_p 是缓变量,其影响可忽略不计,于是:

$$f_{out}(n)=2\pi\cdot k_f\cdot f(n+1)\tag{6}$$

上述理论证明,采用延时相减的方法可以计算出瞬时频率的值。

3.3 自动频率控制(AFC)

在 PCM/FM 信号中,多普勒频率表现为已调信号的载波频率漂移,因此收到信号的真正的中心载波频率是未知的。多普勒频移的影响不仅体现在对功率谱幅度的估计,更为严重的是有可能使“0”码对应频率漂移到“1”码对应频率的位置,或者是“1”码对应频率漂移到“0”码对应频率的位置,引起解调误判,增加了解调误码率。需要找到一种有效的方法抑制载波频偏。

文献[1]和[2]中对载波频偏抑制方法都有详细研究。文献[1]是基于二阶数字锁相环的频偏抑制方法,该方法主要存在有用信号的低频分量被滤除、采用 FPGA 实现时会消耗较多的硬件资源等缺点。文献[2]采用了滑窗最大最小值法,该方法较文献[1]有较大改进:易于 FPGA 实现,能够适应更大的频偏变化率而不会造成信号的明显损失,因此适用性更强。但由于文献[2]方法采用的是最大最小值统计方法,抗干扰能力弱,所以本设计中对该方法进行了改进,采用了滑窗平均值法,如图 2 所示。改进后的方法不仅具有文献[2]中计算量小、易于 FPGA 实现等优点,且抗干扰能力强,估计值更逼近真实值。

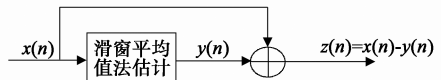


图 2 本文提出的载波频偏抑制方法
Fig. 2 Block diagram of AFC function

在频偏计算上可以采用正负分离判决后累加平均法,如图 3 所示。

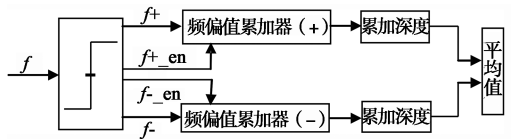


图 3 正负分离判决累加平均法框图
Fig. 3 Baseline restorer block diagram

f 为鉴频后的频率值,包含了峰值频偏和载波频偏等,选择合适的“+”判决门限和“-”判决门限,大于“+”判决门限的值时频偏值在累加器(+)中累加,小于“-”判决门限的值时频偏值在累加器(-)中累加。最后,当达到累加深度时才进行平均值的计算。这种分离判决累加法不论是否出现长连“0”或“1”情况下都可以得到正确的载波频偏的近似值。

3.4 视频FIR低通滤波器

FIR低通滤波器的设计结构除了可以起到滤除带外噪声的作用,还可以获得极好的线性相位响应和固定群延时。具体的VHDL设计可采用Matlab仿真工具和调用I PCORE加载系数文件相结合的办法。图4为本设计中Matlab下仿真得到FIR滤波器的幅频特性及相频特性。通带宽度为1倍码速率,通带内的相位响应为线性响应,符合不同码速率条件下的滤波器设计要求。

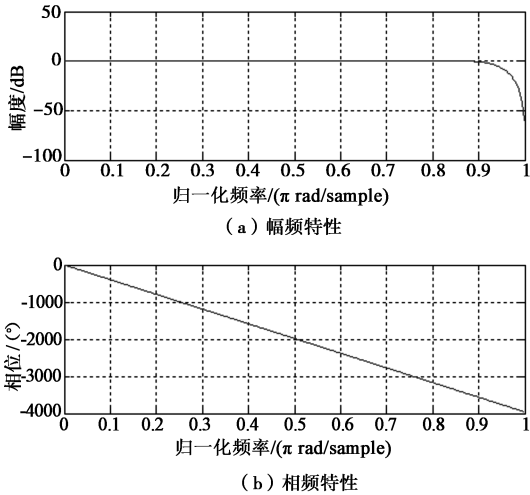


图4 FIR滤波器设计
Fig.4 Video FIR response

4 仿真测试与实验测试

4.1 测试方法

中频解调误码率测试方法如图5所示。将噪声源 Agilent33250A 和中频信号源 TSS2000 通过合路器后送解调器,调整信号源和噪声源的大小,使误码率分析仪测试的误码率小于且接近 1×10^{-4} ,将此时的噪声源和信号源分别接频谱分析仪测量信号功率和噪声功率,将两个值相减即得中频信噪比。在合理范围内随意调整信号中心频率的偏移,通过示波器观察,AFC可以快速对其进行锁定,保证了在多普勒效应下解调的正确性。

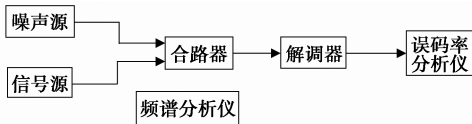


图5 中频解调误码率测试方法
Fig.5 Block diagram of P_e detection

4.2 测试结果分析

从实验测试的结果可以看出,在进行测试时,数据源通过标准信号源产生,基带码为PN序列,保证了码元的随机性。调制信号首先通过AD采样,存在量化误差,且在信号调制时除了相位调制之外还会受到寄生调幅的影响。从误码率测试结果表明,在误码率为 1×10^{-4} 情况下,解调结果的误码率和理论值相差小于1.5 dB,证明了所设计的PCM/FM信号解调算法的正确性。

参考文献:

[1] 郑立岗,吕幼新,向敬成,等. PCM/FM 遥测系统中用于去除多普勒频率和载波频偏的新方法[J]. 信号处理,2004,20(3):236—240.
ZHENG Li—gang, LV You—xin, XIANG Jing—cheng, et al. A New Technique to Remove Doppler Frequency and Carrier Frequency Bias in PCM/FM Telemetry System[J]. Signal Processing, 2004, 20(3): 236—240. (in Chinese)

[2] 陈大海,张健,吕幼新. 遥测接收机的一种载波频偏抑制新方法[J]. 电子科技大学学报,2008,37(5):720—723.
CHEN Da—hai, ZHANG Jian, LV You—xin. A New Scheme to Suppress Carrier Frequency Deviation for Telemetry Receiver[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(5): 720—723. (in Chinese)

[3] 杨小牛. 软件无线电原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社,2000.
YANG Xiao—niu. Software Refined Radio: Principle and Application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000. (in Chinese)

[4] 曹志刚. 现代通信原理[M]. 北京:清华大学出版社,1992.
CAO Zhi—gang. Modern Communication Theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992. (in Chinese)

[5] 楼顺天. 基于MATLAB的系统分析与设计:信号处理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1998.
LOU Shun—tian. System Analyse and Design in MATLAB Signal Processing[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1998. (in Chinese)

[6] 郭福成. 数字下变频实现技术研究[J]. 国防科技大学学报,1999,20(5): 95—97.
GUO Fu—cheng. Research on the Implementing Techniques in the Digital Downconverting[J]. Journal of National University of Defense Technology, 1999, 20(5): 95—97. (in Chinese)

作者简介:

孙秀睿(1977—),女,山东文登人,硕士研究生,主要从事多模式测控信号数字化调制解调技术的研究工作。
SUN Xiu—rui (female) was born in Wendeng, Shandong Province, in 1977. She is now a graduate student. Her research direction is digital modulation & demodulation of multimode signal.
Email: sxr0816@yahoo. com. cn