

doi: 10.7690/bgzdh.2016.12.004

基于 FPGA 的 K 波段 VCO 宽带线性校正

侯卫国¹, 翟霄汉², 杨作祥²

(1. 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094; 2. 中国人民解放军 73908 部队, 南京 210084)

摘要: 为解决 K 波段宽带线性校正器件复杂、成本高、调试难等问题, 提出了一种基于 FPGA 的 VCO 开环线性校正方法。利用 VCO 电调特性的开环线性校正原理, 采用 FPGA 控制 D/A 芯片对 VCO 的电调特性进行开环宽带线性校正, 同时通过控制 FPGA 产生的时钟, 产生任意时宽的线性调频连续波, 并进行试验测试。测试结果表明: 在带宽为 400 MHz 时的非线性度小于 0.1%, 开环线性校正实现方案简单、成本低, 满足系统指标要求。

关键词: 开环线性校正; VCO; FPGA**中图分类号:** TP206 **文献标志码:** A

Linearity Correction of K-band VCO Broadband Based on FPGA

Hou Weiguo¹, Zhai Xiaohan², Yang Zuoxiang²

(1. School of Electronic & Optical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;

2. No. 73908 Unit of PLA, Nanjing 210084, China)

Abstract: In order to solve the problems of complex, high cost, and difficult debugging of K band wideband linear correction device, a VCO open loop linear correction method based on FPGA is proposed. With VCO tuning characteristics of the open loop linear correction principle, we can make open loop broadband linear correction for the VCO tuning characteristics on the basis of the D/A chip controlled by FPGA. At the same time, the clock generated by controlling FPGA can generate arbitrary wide linear frequency modulation continuous wave and carry out experiments. Experiment results show that, when bandwidth is 400 MHz, the nonlinear is less than 0.1%, the open loop linear correction method is simple, low cost and satisfies the system index requirements.

Keywords: open loop linear correction; VCO; FPGA

0 引言

线性调频连续波雷达 (linear frequency modulated continuous wave, LFM CW) 具有分辨力高、结构简单、体积小和质量轻等特点。线性调频连续波体制是目前广泛用于雷达成像、目标特性研究等领域的体制^[1]。压控振荡器 (voltage controlled oscillator, VCO) 是一种根据电压变化来控制振荡频率的信号源, 广泛应用于线性调频连续波雷达^[2]。VCO 的性能决定着整个 LFM CW 系统的性能。由于 VCO 在扫频过程中其自身的线性度一般只有 2%~5%^[3], 为了提高 LFM CW 系统的测距、测速精度, 必须对 VCO 进行线性校正^[4]。

目前 VCO 线性校正技术主要分为 3 类^[5]: 一是电抗补偿线性校正法, 二是闭环线性校正法, 三是开环线性校正法。电抗补偿线性校正的主要缺点是调试工作较繁琐, 经线性校正后的 VCO 电调特性的波纹起伏较大, 线性校正精度不易得到可靠的保证; 闭环线性校正法的缺点是实现方案复杂、成本较大; 开环线性校正的优点是其实现方案简单, 成

本小, 在对 VCO 电调线性度有一定要求但又不是很高的场合特别适用^[6-10]。

笔者提出了基于 FPGA 的 VCO 开环线性校正方法, 实现了 VCO 的线性校正。

1 开环线性校正原理

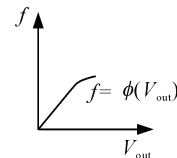
设 VCO 电压调控函数为

$$f = \phi(V_{\text{out}}) \quad (1)$$

式中: f 为开环校正后 VCO 的输出频率; V_{out} 为校正 VCO 电调端输入电压; ϕ 为开环校正 VCO 电调电压函数, 如图 1 所示。



(a) 校正前 VCO 框图



(b) 校正前的 VCO 曲线图

图 1 校正前的 VCO 示意图

收稿日期: 2016-08-10; 修回日期: 2016-09-25

作者简介: 侯卫国(1990—), 男, 江苏人, 在读硕士, 从事信号与信息处理研究。

开环线性校正主要是找到和产生非线性转移特性函数

$$V_{out} = \phi(V_L) \quad (2)$$

式中： V_{out} 为线性校正器输入 VCO 电调端的校正电压； V_L 为输入线性校正器的电压； ϕ 为线性校正器的非线性转移特性函数。如图 2 所示，通过 V_{out} 线性校正电压校正后的 VCO 电调特性函数：

$$f = \phi(V_{out}) = \phi(\phi(V_L)) = \phi\phi(V_L) \quad (3)$$

是线性的^[5,11-13]，如图 3 所示。

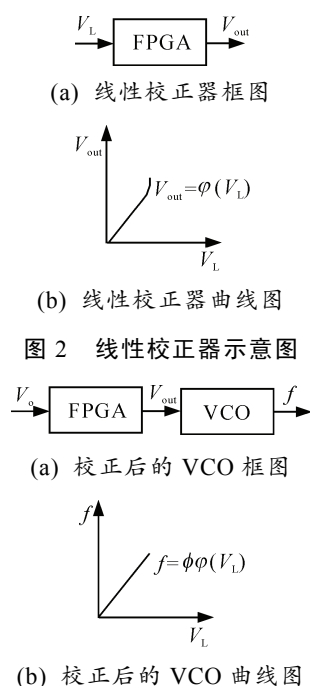


图 2 线性校正器示意图

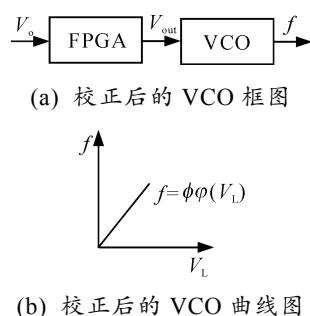


图 3 校正后的 VCO 示意图

可见，开环线性校正 VCO 的关键^[14-15]是：

- 1) 由 VCO 电特性函数寻求线性校正函数，即上述线性校正器的非线性转移特性函数；
- 2) 设计合适的线性校正器电路实现线性校正函数。

VCO 电调特性一般很难通过某一固定函数表达式来描述，只能通过测量大量的数据，采用作图法描述 VCO 电调端特性，求出 VCO 线性校正函数曲线^[2]。

2 基于 FPGA 的开环 VCO 宽带线性度校正

基于 FPGA 的开环 VCO 宽带线性度校正方法，以 FPGA 为控制器件，FPGA 产生时钟，控制 D/A 芯片，使 D/A 芯片产生 VCO 线性校正函数曲线，实现对 VCO 的高效、高精度校正，此方法可靠性高，通用性好，成本小，环境适应性好。

基于 FPGA 的开环 VCO 宽带线性度校正方法分为 3 个步骤：

- 1) 测试 VCO 的电压与频率的线性关系；
- 2) 用 Matlab 拟合函数曲线，并求出 VCO 线性校正函数曲线；
- 3) FPGA 控制 D/A 芯片产生线性校正函数校正曲线。

2.1 测试 VCO 的电压与频率的线性关系

实验以 TGV2240 型号 VCO 为例，测试 VCO 电压与频率的关系。VCO 的电调端每增加 0.2 V 记录一次 VCO 的输出频率，从 0.75 V 开始，4.95 V 结束，数据如表 1 所示。

表 1 VCO 电压频率测试

电压/V	频率/GHz	电压/V	频率/GHz
0.75	18.640	2.95	19.169
0.95	18.687	3.15	19.206
1.15	18.732	3.35	19.238
1.35	18.780	3.55	19.270
1.55	18.825	3.75	19.297
1.75	18.875	3.95	19.320
1.95	18.924	4.15	19.341
2.15	18.974	4.35	19.359
2.35	19.027	4.55	19.375
2.55	19.077	4.75	19.390
2.75	19.125	4.95	19.403

2.2 拟合 VCO 线性校正电压曲线

用 Matlab 读取测试数据，画出曲线如图 4 所示。

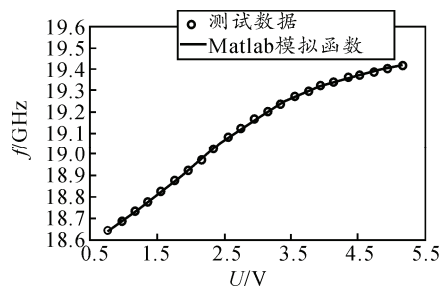


图 4 VCO 电压与频率曲线

根据输入的数据，用 polyval 指令模拟出与图 4 曲线最接近的函数。

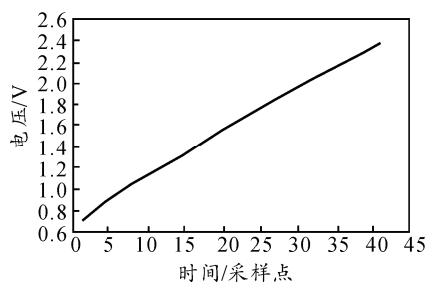


图 5 VCO 线性校正电压曲线

根据拟合函数，可以知道 18.640~19.040 G 之

间线性度最高。Matlab 求出 VCO 线性校正电压曲线，如图 5 所示。

2.3 FPGA 控制 DA 产生校正电压

实验选用的 D/A 芯片是 ADI 公司的 AD5310，AD5310 是一款低功耗、配置简单、单电源供电的 DAC。工作的时钟可以达到 30 MHz。

AD5310 的输出电压控制函数为

$$V_{OUT} = V_D \times \left(\frac{D}{1024} \right) \quad (4)$$

式中： V_{OUT} 为输出电压； V_D 为 AD5310 芯片供电电压，实验中采样的是 5 V 供电； D 为一个二进制串行输入的数，可以是 0 到 1 023 之间的任意整数。也正是控制 D 的输入产生满足系统需要的电压。把 VCO 线性校正曲线的数据转化成二进制数，把这些二进制数存入 FPGA 的 ROM，通过 FPGA 输入芯片 AD5310，产生满足系统要求的线性校正电压曲线去校正 VCO。

通过控制 FPGA 时钟，可以产生任意小于 30 M 的时钟，以满足设计需求。文中选取的是 20 kHz 时钟，线性调频连续波的时宽是 50 μ s，产生的校正电压如图 6 所示。

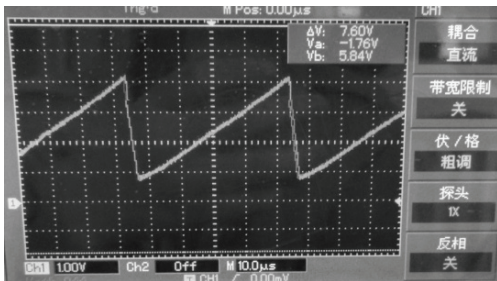


图 6 D/A 产生校正电压曲线

3 实验结果

通过笔者提出的 VCO 宽带线性度校正后产生的信号测试系统框图如图 7 所示。

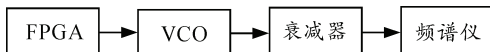


图 7 VCO 性能测试系统框图



图 8 VCO 性能测试系统实物

基于 FPGA 的开环 VCO 宽带线性度校正性能测试系统实物，如图 8 所示。

校正后的 VCO 频谱如图 9 所示。

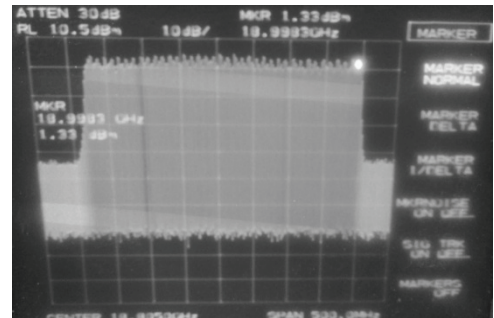


图 9 校正后 VCO 频谱图

实验结果表明，在 400 MHz 电调带宽内输出功率大于 9 dBmW。通过频谱仪可以观察到在整个电调范围内，VCO 输出信号谱线清晰、纯度好、不含寄生谱、没有出现跳模现象。

4 结束语

实验结果表明，经 FPGA 进行开环线性校正后的 VCO 电调线性度可达 0.04%^[16]。开环线性校正的优点是实现方案简单、成本小，适用于对 VCO 电调线性度有一定要求但又不是很高的场合。开环线性校正亦常常用来对闭环线性校正电路中的 VCO 电调特性进行预校正。开环线性校正的缺点是线性校正器电路本身存在的底噪声会增加 VCO 的输出噪声，同时对 VCO 电调信号带宽(即电调速度)有一定限制。

参考文献:

- [1] 沈涛, 孙忠良. 毫米波 VCO 电调特性的线性校正方案研究[J]. 现代雷达, 1997, 19(1): 91-100.
- [2] 沈涛, 孙忠良. 35 GHz 高线性 VCO 的研制[J]. 东南大学学报, 1996, 26(1): 14-18.
- [3] 金鑫, 徐建中. Ka 波段 VCO 设计及闭环线性校正[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [4] 冷建伟, 齐晓辉. VCO 电调特性的线性校正技术综述[J]. 微电子学, 2012, 42(3): 440-444.
- [5] 姜兴, 刘耀山, 孙逢圆. 一种车载雷达压控振荡器线性校正方法[J]. 电波科学学报, 2013, 28(2): 368-371.
- [6] 陈祝明, 丁义元, 向敬成. 宽带 LFM CW 扫频源的相对非线性校正方法[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(2): 16-18.
- [7] Blaser R J. Analog multipliers drive component linearization scheme[J]. Microwave & RF, 1992, 31(10): 74-80.
- [8] Yan G W, Xie G, Qiu Y X, et al. MEA based nonlinearity correction algorithm for the VCO of LFM CW radar level gauge[C]. 10th International Conference, RSFDGrC 2005

Regina, Canada, 2005: 460-470.

- [9] Kwon H, Kang B. Linear frequency modulation of voltage-controlled oscillator using delay-line feedback[J]. IEEE Microwave Wireless Compon Lett, 2005, 15(6): 120-123.
- [10] 李峰, 郭德淳. 使用 VCO 实现变容二极管直接调频[J]. 今日电子, 2005, 1(3): 63-64.
- [11] Kim C W, Koo K H, Yoon S W. Fully integrated wideband CMOS VCO with improved f-V linearity and low tuning[J]. Elec Lett, 2010, 46(1): 29-30.
- [12] Colodro F, Torralba A. Linearity Enhancement of VCO-Based Quantizers for SD Modulators by Means of a Tracking Loop[J]. Circuits & Systems II Express Briefs IEEE Transactions on, 2014, 61(6): 383-387.
- [13] Bai X, Zhu Z, Su L, et al. A Wide Tuning Range and High

Linearity VCO Circuit Design[C]. Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE), 2012 International Conference on. IEEE, 2012: 208-211.

- [14] El-Halwagy W, Mohamed Dessouky, El-Ghitani H. A programmable 8-bit, 10MHz BW, 6.8mW, 200MSample/sec, 70dB SNDR VCO-based ADC using SC feedback for VCO linearization[C]//IEEE, International Conference on Electronics, Circuits, and Systems. IEEE, 2013: 157-160.
- [15] AadilRafeeqe K P, Sahu A. A cost effective static linearity testing scheme for ADCs[C]. Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), 2015 IEEE International Conference on. IEEE, 2015: 1-4.
- [16] Johnson W. Digitally Tuned PROM-Corrected VCO[J]. Microwave Journal, 1982, 25(11): 131-132.

(上接第 9 页)

3 相关问题及后续改进

笔者通过等高程修正和等高角修正模型进行对比研究, 得出了在简易火控系统中, 半直瞄方式下等高角修正的修正效果更好。但该修正模型同样会带来修正不足或修正过量的问题, 在后续研究中, 笔者将对激光测距机增加纵向刻度分划, 读取炮目和炮炸之间的高低角度偏移量(β_2), 作为等高角修正模型的补充, 如图 6 所示。

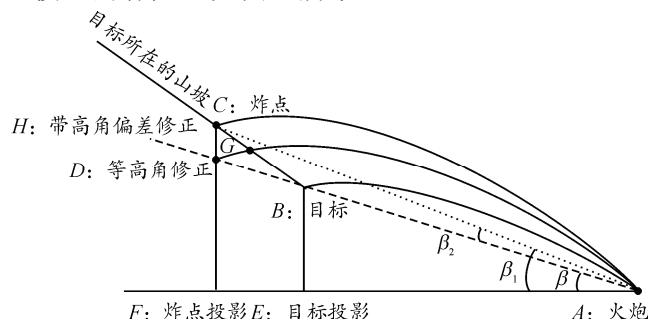


图 6 带高低角度偏差量修正

此时火炮与目标的水平距离 $AC=AB \times \cos(\beta+\beta_2)$; 高程差 $BC=AB \times \sin(\beta+\beta_2)$ 。确定诸元表尺的两要素均能较为准确的获得。

4 结束语

笔者以等高程修正和等高角修正模型在不同应用地形下的对比研究, 得出了在简易火控系统中,

半直瞄射击方式下等高角修正的修正效果更好^[10]; 在增加激光直瞄镜纵向分划后, 能进一步提高逼近目标的速度, 适应不同的地形条件。

参考文献:

- [1] 郑丽娅, 康林, 刘瑶华. 便携式火控计算机综合检测设备设计[J]. 兵工自动化, 2014, 33(8): 8-10.
- [2] 马瑞萍, 许化龙, 肖凡. 基于改进型模糊控制的弹道导弹诸元解算方法[J]. 火箭与制导学报, 2010, 30(3): 125-127.
- [3] 王东军, 王建飞, 康哲. 某型坦克简易火控系统射击方法精度分析与选择[J]. 火炮发射与控制学报, 2006(b05): 18-20.
- [4] 陈涛, 朱松柏, 李博, 等. VxWorks 环境下虚拟光电火控系统的搭建[J]. 兵工自动化, 2014, 33(9): 7-9.
- [5] 卢广山, 邹庆元. 航空火力控制系统发展概述[J]. 光电与控制, 2001(增刊): 6-13.
- [6] 郭锡福. 火控计算机射击诸元解算精度指标的确定[J]. 弹道学报, 2001, 13(1): 86-89.
- [7] 任哲平, 周启煌, 吕强. 战车火控系统射击诸元解算工程模型误差的动态评估[J]. 火炮发射与控制学报, 2004(4): 1-4.
- [8] 闫俊超, 张相炎, 刘宁. 多弹种发射新型火炮自动机技术[J]. 兵工自动化, 2015, 34(4): 9-12.
- [9] 靳青梅, 张相炎, 崔二巍. 火炮新型动力后坐试验方法[J]. 兵工自动化, 2015, 34(5): 7-10.
- [10] 陈扬. 自行火炮身管指向测量技术[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(10): 32-35.