

文章编号: 1673-1522 (2008) 05-0581-03

# 频率捷变雷达信号源实时动态频率校准方法

石 军<sup>1</sup>, 高伟亮<sup>2</sup>, 姜志森<sup>2</sup>, 王 伟<sup>3</sup>

( 1 . 海军装备部兵器部, 北京 100841 ; 2 . 海军航空工程学院 电子信息工程系, 山东 烟台 264001 ;  
3 . 92823 部队, 海南 三亚 572000 )

摘 要: 分析了频率捷变雷达信号源边跟踪边校准方法存在的缺陷, 提出了一种新型实时动态频率校准方法, 在信号源边跟踪边校准工作模式上, 进一步提高了信号源的频率跟踪精度和稳定工作时间, 并大大减小了漏跟概率。

关键词: 频率捷变; 雷达信号源; 频率校准

中图分类号: TN957.51

文献标志码: A

## 0 引言

频率捷变雷达信号源能够模拟频率捷变雷达的射频信号和干扰信号, 它在捷变频末制导雷达的测试中具有重要作用<sup>[1]</sup>。新型频率捷变雷达信号源目前普遍采用边跟踪边校准的工作模式<sup>[2]</sup>, 采用工作和校准分时复用技术, 即信号源的工作和校准在每个雷达重复周期内同时进行, 具体时序关系如图 1 所示。

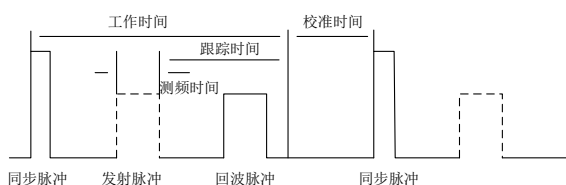


图 1 边跟踪边校准时序图

一个雷达重复周期对信号源而言可分为工作时

间和校准时间, 在工作时间内, 信号源将完成对雷达信号的测频和频率跟踪; 在校准时间内, 进行频率校准。之所以要进行频率校准, 主要是因为信号源工作较长时间后, 输出频率会随着工作时间的增加而不断漂移, 这是因为 VCO 的频率控制特性会随着时间发生变化, 导致 VCO 在相同的控制电压作用下, 在不同的时刻输出频率不同, 而且随着工作时间的增加, 这种频率偏移越大<sup>[2]</sup>。虽然信号源中的瞬时测频机较准确地测得了雷达的发射频率, 但如果频率跟踪电路 RAM 表中的数据固定不变, 就不能反映 VCO 频率控制特性的变化。因此, 送

收稿日期: 2008-03-20; 修回日期: 2008-07-02

作者简介: 石 军 ( 1957- ), 男, 高工, 硕士。

到VCO上的控制电压码与雷达频率实际上是不对应的，总是有个偏差。这样一来信号源对雷达发射频率的跟踪能力就变差了，信号源的频率跟踪精度也降低了。因此，目前新型的捷变频雷达信号源都采用这种工作方式，大大提高了信号源的频率跟踪精度和稳定性<sup>[3]</sup>。

但边跟踪边校准方法也有其技术的局限性，本文首先分析这种校准方法的缺陷，然后提出了实时动态频率校准方法并进行了硬件电路设计和实验。

### 1 边跟踪边校准方法及其缺陷

边跟踪边校准方法的硬件电路如图 2 所示，校准的过程实质上就是对 RAM 存储单元的内容进行更新的过程。

其方法是：在时钟的驱动下，由电压码产生电路在工作带宽内顺序产生 12 位递增电压码，经 D/A 后形成一模拟的扫描电压，改变 VCO 的振荡频率，然后由瞬时测频电路测量 VCO 的工作频率并输出频率码，将频率码作为 RAM 的地址，再将电压码存入以频率码为地址的 RAM 存储单元内，直至将所有的频率点校准一遍。跟踪时，外部输入信号经瞬时测频测得频率码，然后对 RAM 进行查

表，查得的电压码再经 D/A 控制 VCO 输出与雷达射频相同的频率信号。

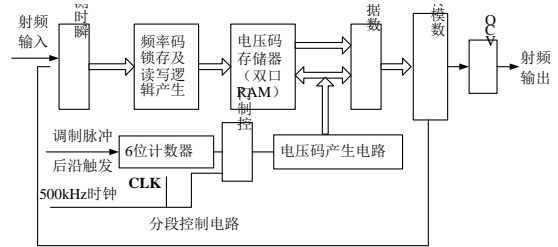


图 2 边跟踪边校准电路框图

边跟踪边校准方法虽然大大提高了信号源的频率跟踪精度和稳定性，RAM 表中的数据也可以反映 VCO 频率控制特性的变化，VCO 的频率漂移可由 RAM 表数据的实时动态更新来修正，但 RAM 表中的数据却并不完整和全面。我们知道，瞬时测频机的测频精度有限，测得的 12 位频率码最低 1~3 位有其随机性，而且校准时易受环境、温度等各种干扰因素的影响，比如同一个电压码驱动 VCO 经瞬时测频机两次随机测得的频率码很可能不同，它们很可能会相差几个码字，而边跟踪边校准方法只在一个频率码地址处写入电压码，跟踪时若恰巧寻址到另一个没有写入电压码的频率码地址时，就可能因 RAM 表中无电压码数据而造成漏跟。

## 2 实时动态频率校准方法

为了解决这一问题，我们提出了实时动态频率校准方法，它的基本思想是，充分利用频率码的随机性，在写 RAM 表的过程中，将随机频率码地址处全部写入电压码。

首先，在电压码存储器上采用了双口 RAM 代替了原有的单口 RAM，用于实时存储电压码，它的容量大小由系统工作带宽决定，它具有两个读写端口，RAM 中的数据是实时更新的，是一种动态存储表。我们将工作时间和校准时间对 RAM 表的操作分别安排在不同的端口，这样一方面可防止两个操作过程相互干扰，影响数据的可靠性；另一方面也给电路设计也带来了方便。当系统处于工作时间内，由瞬时测频机测得的频率码只对该双口 RAM 的 A 端口进行读操作，用于读取电压码。而当系统处于校准时间时，由瞬时测频机得到的频率码只对 B 端口进行写操作，将电压码存入对应的频率码地址单元内。

在工程实现时，充分考虑到校准速度的要求，对每一个电压码驱动 VCO 后产生的频率测频 10 次，并将该电压码存入这 10 次测得频率码地址的

单元内。当然，这其中可能会出现某一个频率码地址单元处反复写入该电压码的过程，但却可以保证整个 RAM 表数据流的可靠性和全面性。例如：当 12 位电压码为 cdeH 时，10 次测得的频率码可能为 6 个，其中有 4 个为相同的频率码，则将这 6 个频率码地址单元处全部写入电压码 cdeH。在相同的 4 个单元内重复写 4 遍。写表数据流示意图如图 3 所示。开机后，信号源就周而复始地进行实时动态频率校准。

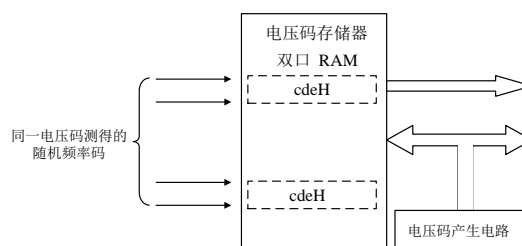


图 3 写 RAM 表数据流示意图

在电路实现上与边跟踪边校准电路相似，如图 4 所示。但本系统利用了大规模可编程逻辑器件 FPGA<sup>[4]</sup>，代替了原有的分离元器件内部集成双口 RAM。FPGA 选用的是 Xilinx 公司的 Spartan- II E 系列的 XC2S200E-6FT256C，它是本系统电路设计的核心，也是最主要的硬件资源，其内部集成了 20 万门逻辑门，可将频率码锁存器、动态电压码存储器（双口 RAM）、电压码产生器及计数器都集成

在芯片内，用VHDL语言编程实现<sup>[5, 6]</sup>，如图 4 中虚线框内的部分。这样做既缩小了体积，减少了装调工作量，也极大地提高了系统的可靠性。

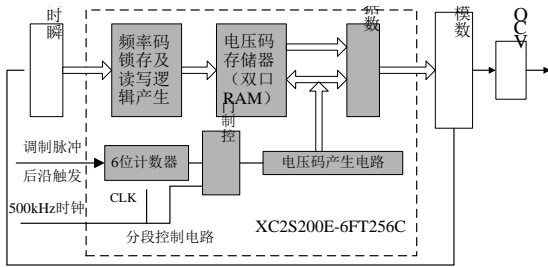


图 4 实时动态校准电路框图

### 3 实测数据分析

我们用频率捷变信号源检定仪对两种校准方法下的信号源分别进行了实验<sup>[7]</sup>，在两台信号源同时工作 1 小时后，测试了两种校准方法的跟踪精度和漏跟概率，如表 1 所示。

表 1 两种校准方法下跟踪精度、漏跟概率对比表

跟踪频率值 /MHz	边工作边校准方法		实时动态频率校准方法	
	跟踪精度	漏跟概率	跟踪精度	漏跟概率
8970	0.3624	0.0422	0.2308	0.0000
9050	0.3745	0.0230	0.1526	0.0003
9130	0.4560	0.0339	0.3198	0.0000
9210	0.3135	0.0458	0.1774	0.0000
9290	0.2350	0.0510	0.2790	0.0005
9370	0.3852	0.0498	0.1809	0.0000
9450	0.4209	0.0350	0.2467	0.0000
9530	0.4349	0.0227	0.1826	0.0007
9610	0.2535	0.0600	0.3439	0.0000
9650	0.3167	0.0443	0.2124	0.0000
9690	0.5028	0.0381	0.2802	0.0000
9730	0.4409	0.0378	0.3620	0.0000
9770	0.5071	0.0426	0.1931	0.0000

注：频率跟踪精度（单位 MHz）。

由表可见，边跟踪边校准方法的频率跟踪精度在 0.5 MHz 左右，漏跟概率接近 5%，而实时动态

频率校准方法的频率跟踪精度则在 0.3 MHz 以下，且基本上没有漏跟的情况出现。

### 4 结束语

目前，对捷变频雷达信号模拟的方案很多，但归根结底是要保证输出信号有较高频率跟踪精度和稳定性<sup>[8]</sup>，本文正是采用了实时动态频率校准的新方法，在信号源边跟踪边校准工作模式的基础上，进一步提高了信号源的频率跟踪精度和稳定性，并大大减小了漏跟概率，这对捷变频末制导雷达的测试具有重要意义。

### 参考文献：

- [1] 冯帅. 捷变频末制导雷达综合测试仪[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 1999.
- [2] 李尚生, 姜永华. 捷变频雷达导引头目标/干扰背景射频系统模拟器[J]. 电子对抗技术, 1999,14(1):21-25.
- [3] 姜永华, 高伟亮, 凌祥. 捷变频雷达信号源边工作边校准技术研究[J]. 宇航计测技术, 2005,25(5):18-21.
- [4] 杨恒, 卢飞成. FPGA/CPLD 快速工程实践入门与提高[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [5] 侯伯亨, 顾新. VHDL 硬件描述语言与数字逻辑电路设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.
- [6] 林明权. VHDL 数字控制系统设计范例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [7] 曲洪东. 捷变频末制导雷达多目标生成系统研究[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2004.
- [8] Burton T A. Stability and Periodic Solutions of Ordinary and Functional Differential Equations[M]. Academic Press, New York, 1985.

## The Real-time Dynamic Frequency Calibration Method in Frequency Agility Radar Signal Generator

SHI Jun<sup>1</sup>, GAO Wei-liang<sup>2</sup>, JIANG Zhi-sen<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>3</sup>

(1. Ordnance Branch of NED, Beijing 100841, China;

2. Department of Electronic and Information Engineering, NAAU, Yantai Shandong 264001, China;

3. The 92823<sup>rd</sup> Unit of PLA, Hainan Sanya 200436, China)

**Abstract:** This paper analyses the defect of the frequency calibration in traditional frequency agility radar signal generator, puts forward a new real-time dynamic frequency calibration method which improves the frequency track precision and the stable working time and reduces the leaking track probability greatly on the basis of the work and calibration simultaneously.

**Key words:** frequency agility; radar signal generator; frequency calibration