

doi: 10.7690/bgzd.2015.09.002

基准频率产生组合的国产化研究

赵 丰¹, 姜广顺¹, 于海涛², 冯 云¹, 曹佩武¹, 欧先俊¹

(1. 空军二十三厂研究所, 北京 102200; 2. 中国人民解放军 93655 部队, 北京 101500)

摘要: 为实现某引进武器装备基准频率产生组合的国产化功能替代, 提出一种采用逆向工程方法和基于数字锁相环技术的新思路。通过剖析原基准频率产生组合的工作原理、组成结构及性能指标, 对其进行反设计, 并将国产化基准频率产生组合与原基准频率产生组合进行了性能对比测试。测试结果表明: 国产化基准频率产生组合使用维护简单、方便, 能满足武器系统的正常使用要求, 已在部队和工厂装备修理中得到推广应用。

关键词: 基准频率; 锁相环; 环路滤波器; 国产化

中图分类号: TJ760.3 **文献标志码:** A

Research on Localization of Reference Frequency Assembly

Zhao Feng¹, Jiang Guangshun¹, Yu Haitao², Feng Yun¹, Cao Peiwu¹, Ou Xianjun¹

(1. Institute, No. 23 Factory of PLA Air Force, Beijing 102200, China;

2. No. 93655 Unit of PLA, Beijing 101500, China)

Abstract: In order to realize the localization function replacement of reference frequency assembly used in certain imported weapon equipment, a new method is proposed based on reverse engineering method and technology of digital phase-locked loop (PLL). The inverse design is carried out through analyzing the work principal, formation and structure and technical performance of the original reference frequency assembly. The technical indexes of the localized assembly are compared with that of the original one. The result shows that the localized product can meet the imported weapon system's normal use requirement, and its use and maintenance are simple and convenient. The localized assembly has been widely applied in the army and equipment maintenance and support factory.

Keywords: reference frequency; phase-locked loop; loop filter; localization

0 引言

某引进型号武器系统在导弹发射前的“准备”周期中, 需要使用自动频率调整设备, 将弹上超高频振荡器频率微调(重调)到制导雷达设定的工作频率上, 以保证导弹截获、制导以及导弹和制导雷达之间的信息传输。随着武器装备使用年限的增长, 作为自动频率调整设备核心部件的基准频率产生组合, 由于其内部的真空电子器件老化, 导致其性能下降和效率降低, 超高频振荡器故障率高, 备件消耗量大, 对外采购困难; 在该组合内影响输出频率稳定性的电子随动系统, 由于电路复杂, 出现故障后难以进行故障隔离和定位。为了保证引进装备能够正常发挥其作战效能, 必须开展基准频率产生组合的国产化研制^[1]。

鉴于引进装备基准频率产生组合内的超高频器件没有相关的技术条件和测试要求, 国内也无同类型的 X 波段微波组件可供借鉴, 显然, 不能采用直接替换方法, 必须对基准频率产生组合在不同工作状态下的输入、输出信息进行系统测试、分析和处理, 尽可能得到其完整、准确的控制时序和工作流

程后, 才能对其进行功能替代。

锁相环(phase-locked loop, PLL)是一个相位负反馈系统, 通过对输出信号和输入信号的相位进行比较, 使 2 个信号实现同步的电路。被广泛应用于通信、雷达、制导、导航、仪器仪表和电机控制等领域^[2]; 因此, 笔者采用逆向工程方法和基于数字锁相环技术, 实现基准频率产生组合的国产化。

1 原基准频率产生组合的组成及工作原理

武器系统引进时, 随机资料 and 人员培训主要集中在装备的使用和维护方面, 外方没有提供任何设计方面的技术资料。如何通过系统反设计和不同工作状态下的激励响应信息, 反推解算出基准频率产生组合的设计需求, 是一项系统性的复杂工作。项目组在剖析自动频率调整设备工作原理, 各组成部分功用及其互相之间关系的基础上, 通过大量测试、分析和验证, 破解了原基准频率产生组合的内部电路组成及其核心技术。

基准频率产生组合, 用于形成自动频率调整设备所需的基准频率, 要求频率稳定度不低于 5×10^{-5} , 带检查装置的基准频率产生组合功能原理见图 1。

收稿日期: 2015-05-22; 修回日期: 2015-06-25

作者简介: 赵 丰(1965—), 男, 河南人, 硕士, 工程师, 从事装备维修保障技术研究。

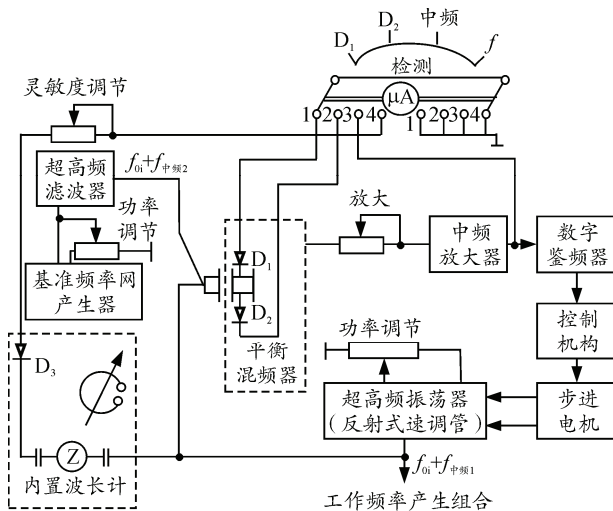


图 1 基准频率产生组合功能原理

反射式速调管产生并输出超高频振荡信号 ($f_{0i}+f_{中频1}$)，其中耦合出一小部分能量到平衡混频器；基准频率网产生器，以高稳定度的晶振为振荡源，经倍频产生超高频信号 ($f_{0i}+f_{中频2}$) 作为参考频率信号，并经超高频滤波器输出到平衡混频器的第二输入端。在平衡混频器中产生差频信号为 $4\text{ MHz}\pm$

Δf ，经中频放大后送到鉴频器，鉴频器和控制机构将差频信号转换成控制电压，驱动步进电机调节速调管谐振腔，改变速调管振荡器的输出频率，从而减小与参考频率的误差，达到稳定频率的目的。在频率自动微调系统中，鉴频器检测速调管振荡器与参考频率的差值，当差值在 $4\text{ MHz}\pm 16\text{ kHz}$ 范围内时，步进电机停止工作。这时，组合产生的基准频率 ($f_{0i}+f_{中频1}$) 发送至自动频率调整设备的工作频率产生组合。

2 国产化基准频率产生组合硬件设计

2.1 国产化基准频率产生组合硬件组成

国产化基准频率产生组合主要包括超高频模块 (模块 A)、混频模块 (模块 B)、中频模块 (模块 C)、超高频输出模块 (模块 D)、频综控制模块和电源模块。国产化基准频率产生组合硬件组成框图见图 2。

国产化组合采用 120 MHz 恒温晶体振荡器作为频率源的频率相位基准，是频率源中的关键件，其频率稳定度达到 1×10^{-7} ，相噪优于 -155 dBc/Hz 。

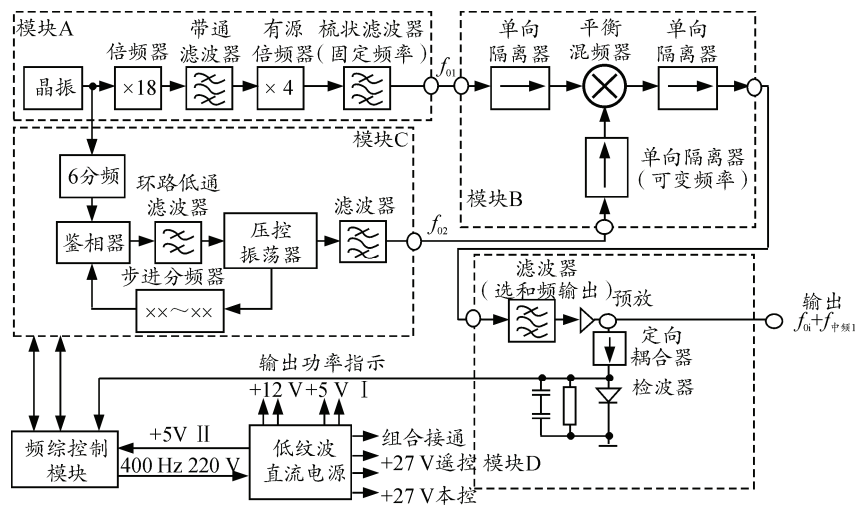


图 2 国产化基准频率产生组合硬件组成框图

模块 C 中的数字锁相环由可变分频器 ($1/N$)、鉴相器 (PD) 及环路滤波器 (LF)、压控振荡器 (VCO) 等电路组成。 120 MHz 晶振信号经过 6 分频器产生的 20 MHz 参考信号与压控振荡器经可编程分频器 (分频比 $N=\times\times\sim\times\times$) 输出的信号，同时加到鉴相器，产生鉴相控制电压，经环路滤波器送到压控振荡器，控制输出超高频信号 f_{02} 以 20 MHz 的频率间隔变化。

120 MHz 晶体振荡器输出的另一路信号，经阶跃二极管谐波发生器实现 18 次倍频，并经窄带介质带通滤波器提取有用信号，抑制不需要的合成杂散

分量，再经 4 倍频后，由介质带通滤波器提取固定频率的超高频信号 f_{01} 。 f_{01} 和 f_{02} 分别通过单向隔离器后，同时加到平衡混频器，实现频率的加减。滤波器提取和频信号，并抑制镜像信号和载波信号。通过改变可编程分频器的分频比，实现基准频率以 20 MHz 步进，在制导雷达工作的各个频点上产生基准频率信号。和频信号再经过一单向隔离器后送到高频功率放大器放大作为基准频率信号输出，使之满足系统要求；同时，经定向耦合器输出一定功率的超高频信号，检波后作为输出功率指示送到控制面板。

2.2 硬件设计中解决的主要问题

1) 输入干扰滤波电路。

为了减小电源输出的纹波脉动和谐波干扰，满足频综的相位噪声和幅度噪声指标要求，必须使用低噪声、低纹波系数的专用电源。为此，国产化组合供电采用了线性电源设计方案，由降压模块、整流滤波模块、线性稳压模块和低通滤波等模块组成。但在组合部件与装备对接试验过程中，由于电磁环境较复杂，还是出现了输出频率相噪指标变差的问题。经频谱测量和分析发现，导致输出频率稳定性变差的原因是有 400 Hz 的干扰成份及其他杂散频谱存在。通过在交流输入端增加抗电磁干扰滤波电路，显著提高了输出频率的相噪指标，满足系统指标要求。干扰滤波电路原理图见图 3。

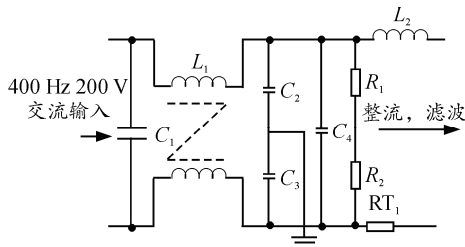


图 3 干扰滤波电路原理

2) 环路滤波器。

鉴相器的输出由直流分量和高频分量组成，而压控振荡器的控制电压在稳态时须保持恒定^[3]。锁相环路滤波器采用三阶无源比例积分器，实际上是一个低通滤波器，环路滤波器原理见图 4。环路滤波器一方面滤除鉴相器产生的高频分量、纹波和限制带外噪声，取出平均分量去控制压控振荡器的频率；另一方面它也是锁相环的重要参数调节器件，通过改变环路滤波器的参数可改变锁相环的重要特性指标，对环路捕捉带的大小，环路的捕捉时间、跟踪时间，环路的稳定性和噪声指标等均有影响^[4]。实际中，环路滤波器易受多种因素干扰，导致压控振荡器输出频率漂移或锁相环工作不稳定，甚至失锁，通常要对组成环路滤波器的元器件参数进行调整以达到最佳效果。

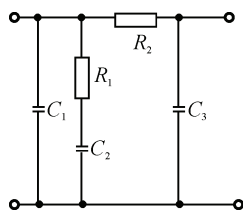


图 4 环路滤波器原理

设计指标规定国产化组合要在 1 ms 内改变频点，对环路的锁定时间提出了较高要求。需要在环路滤波器设计时，选择合适的相位裕度和环路带宽来满足系统指标要求。相位裕度与系统的稳定性密切相关，典型参数范围介于 40°~55°之间，较大的相位裕度虽然能减小环路滤波器的峰值响应，但却增加了锁定时间。环路带宽小可以降低参考杂散和相位误差，同时也会增大锁定时间；加大环路带宽能改善锁定时间，但参考杂散和相位误差也会随之增大。设计过程中，在计算和系统仿真的基础上，通过搭建测试环境观测锁相环路的动态调整过程，折中确定了合适的时间常数，在满足锁定时间的前提下，减小了超调量，增加了系统的稳定性。

3 对比测试

在专用测试台上，对国产化基准频率产生组合与原基准频率产生组合进行了性能对比测试，频率稳定度、相位噪声和跟踪频率误差等参数均优于原基准频率产生组合，主要性能指标对比见表 1。

表 1 国产化基准频率产生组合与原基准频率产生组合性能对比测试

主要参数	测试结果	
	原基准频率产生组合	国产化基准频率产生组合
频率稳定度	5×10^{-5}	1×10^{-7}
相位噪声	-83 dBc/Hz/1 kHz	-93 dBc/Hz/1 kHz
跟踪频率误差	± 16 kHz	± 1 kHz
频点数	$\times \times$ 个频点	全覆盖

4 结束语

目前，国产化基准频率产生组合已通过飞行靶试验验证，并在部队和工厂装备修理中得到推广应用。应用结果表明：该产品能够满足引进装备的正常使用要求，使用维护简单、方便^[5]。

参考文献：

[1] 姜广顺, 冯云, 曹佩武, 等. 某武器系统燃涡控制组合的国产化研究[J]. 兵工自动化, 2012, 31(4): 1-4.
 [2] 任青莲, 高文华, 郭萍. 三阶 PLL 无源环路滤波器的设计与仿真[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(2): 101-104.
 [3] 刘丽平, 杨维明, 李倩, 等. 锁相环中无源环路滤波器的设计与仿真[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2011, 33(4): 494-497.
 [4] 高佩艳, 丁恩杰. 锁相环路滤波器部分设计分析[C]//第十六届全国煤矿自动化学术学会暨中国煤炭学会自动化专业委员会学术会议论文集. 徐州: 中国煤炭学会, 2006: 254-256.
 [5] 蔡绍伟, 吴千秋, 赵丰, 等. 某型武器装备磁带存储系统国产化[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(1): 125-128.