

矢量网络分析仪中的系统锁相技术

The System Phase - locked Technology in VNA

胡小兰*

HU Xiao - lan

摘要 本文介绍了 HP8753ES 射频一体化矢量网络分析仪的系统锁相技术。对锁相原理和锁相过程进行了详细的分析,并对实现过程中易出现的问题提出了改进措施。

关键词 矢量网络分析仪 锁相 预调 捕获 跟踪

Abstract This paper introduces the Phase - Locked loop technology based on the HP8753ES RF Integrative Vector Network Analyzer. And we give a detailed analysis about Phase - Locked principle and process and some improving methods for overcoming the problems emerging from the system implementation.

Keywords Vector network analyzer(VNA) Phase - locked Pre - tune Acquire Track

1 引言

矢量网络分析仪的理论基础是所谓的“黑箱”理论,即对被测网络施加已知特性的外部激励信号,此激励信号为正弦信号,接收和处理被测网络的响应信号,通过比较激励信号和响应信号来确定被测网络的外部特性。矢量网络分析仪按信号走向依次为激励信号源、S 参数测试装置、多通道幅相接收机。幅相接收机不可能直接提取射频信号的幅度和相位信息,因此必须采用频率变换技术将射频信号变换成固定的中频信号,在中频较低的频率上提取矢量信号的实部和虚部,为保证频率变换中被测网络的幅度信息和相位信息

不丢失,采用系统锁相技术,合成扫频信号源和锁相接收机同在一个锁相环路中,共用同一时钟。

下面将详细地介绍一下 HP8753ES 射频一体化矢量网络分析仪的系统锁相技术。

2 系统锁相原理

锁相环路(Phase Locked Loop - PLL)是一种自动相位控制电路,它能使系统输出信号的相位随输入给定信号的相位变化。锁相环路可以实现被控振荡器相位对输入相位的跟踪,其结构决定了它优良的应用性能—锁定时无频差;良好的窄带跟踪特性;良好的调制跟踪特性等。

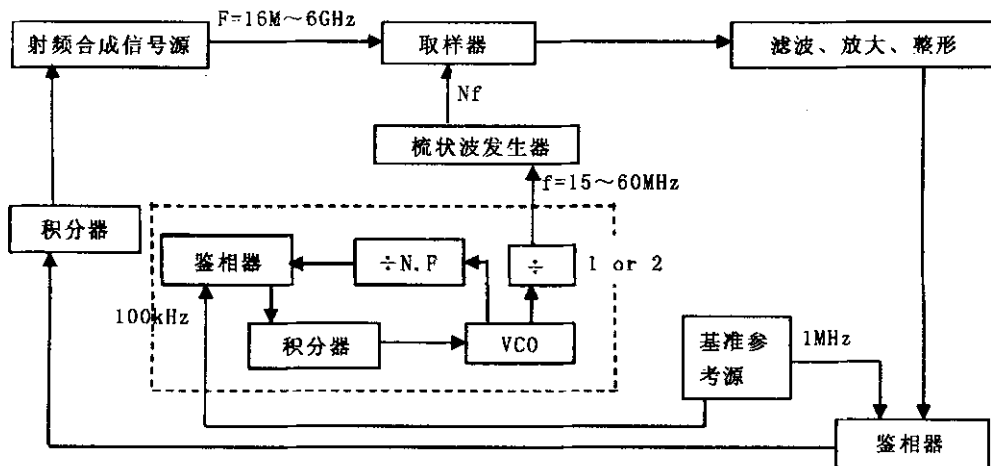


图1 系统锁相原理框图

图1是HP8753ES射频一体化矢量网络分析仪在16MHz以上工作频段锁相电路的原理框图。整个锁相环路包括两个环路:本振小数分频环路和主锁相环路。小数分频环路将基准参考源输出频率通过锁相倍频方式输出,倍频数大小由

主CPU和置数逻辑电路控制。本振小数分频环路分频比N、F的小数位愈多,合成信号源输出频率的分辨率就愈高。主锁相环路控制射频合成信号源输出频率F,使其与VCO输出频率f的某次谐波频率相差某一定值。

该矢量网络分析仪的锁相过程主要是通过小数分频环来控制主锁相环的,图中虚线框为小数分频环,系统锁相的

* 中国电子科技集团公司第四十一研究所 266555

具体步骤如下：

(1) CPU 控制小数分频环使 VCO 精确的输出所需本振信号频率 f；

(2) f 经梳状波发生器产生多次谐波作为取样器的本振信号,只有某次谐波比前面板输入的起始频率小 1MHz；

(3) 源被预调,输出某一频率信号 F 至取样器；

(4) f 的 N 次谐波与源输出信号 F 在取样器中进行混频,产生一个 1~10MHz 的中频信号。

(5) 由取样器反馈回来的中频信号与 1MHz 参考信号进行鉴相得到一个鉴相误差电压,此误差电压经电压/电流转换电路被转换成鉴相误差电流；

(6) 通过鉴相误差电流改变信号源的输出频率,使信号源输出频率越来越接近所需频率；

(7) 环路锁定,当在起始频率处环路锁定后,小数分频环开始以一定步距进行扫描,从而改变取样器的本振信号,拖动主锁相环路跟踪小数分频环进行扫频测量,实现合成扫频信号源与小数环路的同步扫频,主锁相环路锁定后,VCO 输出频率 f 与射频合成信号源输出频率 F 满足下列关系式：

$$Nf - F = 1\text{MHz} \quad (1)$$

其中 N 是 VCO 谐波次数

3 锁相过程

下面详细介绍一下矢量网络分析仪的锁相过程。主要分为两个过程:预调校准过程和锁相过程。

3.1 预调校准过程：

HP8753ES 矢量网络分析仪有八个预调调节点:10MHz、1.8GHz、2.3GHz、3GHz、3.00000001GHz、3.9GHz、5.4GHz、6GHz,将整个扫描段分成六段,在每段内对 YIG 振荡器进行线性预调。

经过预调校准后,任一频率点的预调 DAC 值都可以计算出来,利用计算出来的 DAC 值可以实现任一频率点的频率预置。任何段内任何频率点预调 DAC 值计算如下：

$$\text{DAC} = (\text{dac_offset}[i] + \text{dac_slope}[i] * (\text{freq} - \text{seg_freq}[i])) / \lambda[i] \quad (2)$$

其中 dac_offset[i] 表示每段起始点的预调 DAC 值

dac_slope[i] 表示每段增量系数

seg_freq[i] 表示每段的起始频率

在预调校准时 λ[i] 作为系数与 dac_offset[i]、dac_slope[i] 相乘,所以在计算 DAC 时,需要除以这些系数。

3.1.1 预调调节：

首先是将缺省的预调值从主程序中保存到 EEPROM 及 dac_offset[i] 和 dac_slope[i] 中,共有 6 项。其中 dac_offset[i] 和 dac_slope[i] 是保存在 CMOS 中。

3.1.2 预调校准：

此步骤主要是对 EEPROM 中保存的预调值进行校准,并将正确的值反存及保存到 CMOS 中,具体过程如下：

(1) CPU 控制开关处于锁相状态,将 10MHz、1.8GHz 两

预调调节频率点的 DAC 值置给预调 DAC,同时控制小数环输出对应的频率,使系统锁定到 10MHz、1.8GHz 两点,得到如下结果：

$$\text{ofs_calc_dac}[0]; \text{ofs_calc_freq}[0];$$

$$\text{ofs_calc_dac}[1]; \text{ofs_calc_freq}[1];$$

以上变量分别表示 10MHz、1.8GHz 两预调点的 DAC 值及预调频率。

然后利用公式：

$$\begin{aligned} \Delta\text{dac} &= \text{ofs_calc_dac}[1] - \text{ofs_calc_dac}[0]; \\ \Delta\text{freq} &= (\text{ofs_calc_freq}[1] - \text{ofs_calc_freq}[0]); \\ \text{dac_slope}[0] &= \Delta\text{dac} / \Delta\text{freq} * \lambda[0]; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{temp1} = \lambda[0] * \text{ofs_calc_dac}[0] + 0x0019;$$

$$\text{temp2} = \text{dac_slope} * (\text{ofs_calc_freq}[0] - 0);$$

$$\text{dac_offset}[0] = \text{temp1} - \text{temp2}; \quad (4)$$

得到第一段的增量系数和 10MHz、0Hz 处的预调 DAC 值。

(2) 锁相到 2.3GHz、3.0GHz 两点,得到如下结果：

$$\text{ofs_calc_dac}[2]; \text{ofs_calc_freq}[2];$$

$$\text{ofs_calc_dac}[3]; \text{ofs_calc_freq}[3];$$

以上变量分别表示 2.3GHz、3.0GHz 两预调点的 DAC 值及预调频率。

然后利用公式：

$$\text{for}(i=2; i <= 3; i++)$$

{

$$\Delta\text{dac} = \text{ofs_calc_dac}[i] - \text{ofs_calc_dac}[i-1];$$

$$\Delta\text{freq} = (\text{ofs_calc_freq}[i] - \text{ofs_calc_freq}[i-1]);$$

$$\text{dac_slope}[i-1] = \Delta\text{dac} / \Delta\text{freq} * \lambda[i-1]; \quad (5)$$

$$\text{temp1} = \lambda[i-1] * \text{ofs_calc_dac}[i-1] + 0x0019;$$

$$\text{temp2} = \text{dac_slope} * (\text{ofs_calc_freq}[i-1] - \text{seg_freq}[i-1]);$$

$$\text{dac_offset}[i-1] = \text{temp1} - \text{temp2}; \quad (6)$$

}

得到第二第三段的增益系数和 1.8GHz、2.3GHz 两点的预调 DAC 值。

(3) 由于 DC~3GHz 频段是利用 YTO 与 3.8GHz 固定振荡器混频而产生,3GHz~6GHz 频段是 YTO 直接振荡产生,所以 0Hz 时的 DAC 值 dac_offset[0] 也就是 YTO 在 3.8GHz 时的 DAC 值。利用如下公式计算 3GHz 频段时 3GHz 处的 DAC 值：

$$\text{DAC} = \text{dac_offset}[0] - 0.78 * \text{dac_slope}[0]$$

利用此 DAC 值锁相到 3.0GHz 得到 ofs_calc_freq[4]; ofs_calc_dac[4];

(4) 锁相到 3.9~6.0GHz 得到 ofs_calc_freq[i]; ofs_calc_dac[i];

然后利用公式：

$$\text{for}(i=5; i <= 8; i++)$$

{

$$\Delta dac = ofs_calc_dac[i] - ofs_calc_dac[i-1];$$

$$\Delta freq = ofs_calc_freq[i] - ofs_calc_freq[i-1];$$

$$dac_slope[i-2] = \Delta dac / \Delta freq * \lambda[i-2]; \quad (7)$$

$$temp1 = \lambda[i-2] * ofs_calc_dac[i-1] + 0.0019;$$

$$temp2 = dac_slope * (ofs_calc_freq[i-1] - seg_freq[i-1]);$$

$$dac_offse[i-2] = temp1 - temp2; \quad (8)$$

得到第四、五、六段的增益系数和 3.0GHz、3.9GHz、5.4GHz 三点的预调 DAC 值。

这样就得到所有 6 段内的增益系数和每段起始点的预调 DAC 值, 预调校准也即完成, 认为 YTO 在段内是线性的, 所以就可以通过计算的方式得到段内任何一点的 DAC 值, 从而实现快速地锁相。

3.2 锁相过程:

(1) 扫描前准备: 利用预调校准的 DAC 值计算起始频率的预调 DAC 值, 并保存入内存数组中,

(2) 预调: 首先进行高低波段开关切换等其它一些必要的设置, 然后进行预调。将 DAC 值写入预调寄存器后, 选择预调、锁相开关, 使矢量网络分析仪工作在预调状态, 接着等待预调完成, 在此过程中, 锁相环断开,

(3) 捕获: 捕获是指锁相环路从失锁进入锁定状态的过程。

CPU 设置预调、锁相开关, 使矢量网络分析仪进入捕获状态, 捕获过程中锁相环开始工作, 合成信号源在锁相环的控制下逐渐向起始频率逼近, 最终合成信号源输出起始频率, 系统锁定。

(4) 跟踪: 对于已经锁定的环路, 当输入信号的频率或相位发生不太大的变化时, 由于闭环作用, VCO 输出信号频率和相位会随着输入信号变化, 这样的变化过程称为跟踪。

CPU 设置预调、锁相开关, 使矢量网络分析仪进入跟踪状态, 同时缓慢的改变小数分频环, 利用系统锁相环使合成扫描信号源扫描到下一个换带点。

HP8753ES 矢量网络分析仪将整个扫描范围分为多个频段, 各个频段单独控制, 在换带点处直接进行预调、捕获、跟踪。

4 设计实现中遇到的几点问题及解决办法

在设计调试过程中, 常出现以下几种失锁现象:

4.1 不能正确地完成锁相校准

经分析, 由于预调校准时是调用主程序中的固定值, 这就非常依赖于 YTO 调谐一致性, 当 YTO 调谐一致性不好时还调用固定的预调 DAC 值, 那么 YTO 的输出频率就相差较大而出现锁相校准失败。解决办法就是通过手动调节的方式得到 DAC 值, 具体为编写源调谐程序, 利用该程序使矢网进入源调谐状态, 通过前面板置数改变 DAC 值, 同时利用频谱分析仪检测输出频率, 当输出频率符合要求时停止改变, 这样就大大降低了对 YTO 一致性的要求。

4.2 当环境温度变化较大时易出现失锁现象

当环境温度改变时, 环路的参数也随着改变, 当温度变化较大时, 环路参数的变化可能超出系统的锁相能力, 采用实时校准的办法很好地解决了温差较大带来的锁相问题。

4.3 当扫描频率在 16~18MHz, 功率较小时, 易出现失锁现象, 分析发现, 当频率为 16~18MHz, 源功率较小时, 取样器之后的一中频信号 1MHz 约 -28dBm, 而取样器的本振 15~17MHz 泄露大于中频信号幅度, 约为 -27dBm, 致使锁相环检测不到中频信号而失锁, 解决办法是在取样器输出之后进入锁相电路之前加一级低通滤波器, 滤波器的原理如图 2 所示, 其仿真特性曲线如图 3 所示:

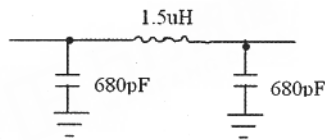


图 2 低通滤波器原理

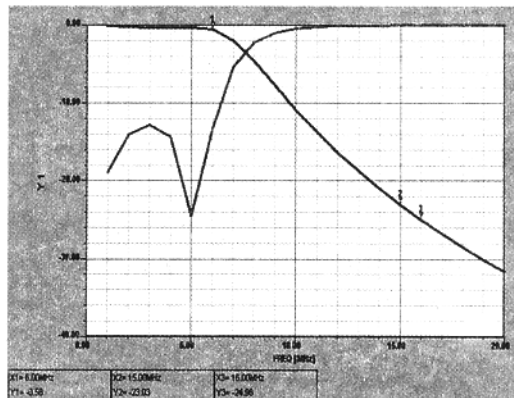


图 3 仿真曲线

从仿真曲线上可以看出, 带内插损小于 0.6dB, 对于中频信号损耗很小, 但带外 (≥ 15 MHz) 抑制大于 23dB, 使得本振泄露信号降到 -50dBm 以下, 这样的本振泄露对正确锁相已毫无影响, 实践证明, 这个电路非常成功地解决了因本振泄露过大而导致的失锁现象。

5 结束语

本文对 HP8753ES 高性能射频一体化矢量网络分析仪系统锁相环工作原理、所涉及的一些技术问题进行了比较详细地分析。由于锁相校准过程中假设 YTO 在段内是线性的, 而实际上完全线性的 YTO 是不存在的, YTO 的线性度越好, 系统锁相越容易实现。

参考文献:

- [1] 梅劲松主编. 军用电子测量仪器应用指南. 第一版, 北京: 电子工业出版社 2001 年

(下转第 126 页)

实际的硬件实验,但可以作为实际实验的补充,使学生更加深刻地理解和掌握所学知识,做到理论联系实际。

本文只给出了直流电路和动态电路的两个例子,使用 Matlab 基本上可以仿真《电路》课程的所有电路。同样,使用 Matlab 也可以仿真《模拟电子技术》和《数字电子技术》课程中的电路,所以,对于补充和改善这两门课的实验,也有同样重要的意义。

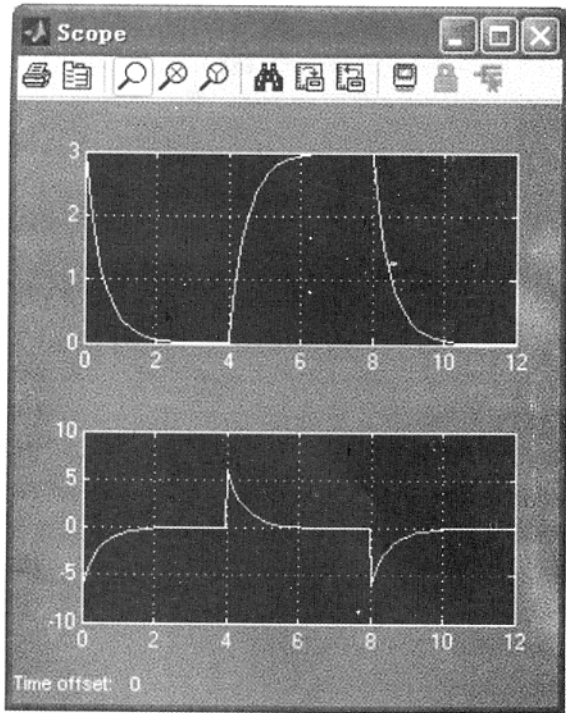


图5 图4电路的仿真结果

随着计算机技术的发展,使用计算机进行辅助分析和辅助设计的方法和手段越来越多,功能也越来越全面,越来越强,研

究和使用新的实验方法和手段,才能不断提高教学水平和教学质量,培养出高素质的适合社会当前需求的人才。

参考文献:

[1] 潘育山,谢敏. MATLAB 在数字电路虚拟实验教学中的应用[J]. 台声·新视角, 2005.6

[2] 黄祖洪. Matlab/PSB 在电路仿真分析中的应用[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 28(2), 2005.6

[3] 谢捷如. MATLAB 仿真技术的研究及应用[J]. 机械制造与自动化, 2002(5)

[4] 刘同娟,马向国. MATLAB 在电路分析中的应用[J]. 电气电子教学学报, 24(6), 2002.12

[5] 周宏,谭敏,胡敏. 电工电子实验教学改革模式的探讨[J]. 合肥学院学报(自然科学版), 15(1), 2005.3

[6] 易洪刚,陈罡. RC 电路瞬态过程电子仿真实验设计[J]. 江西教育学院学报, 2003(6)

[7] 杨友昌,董水金. 电路分析的 MATLAB 实现[J]. 遵义师范学院学报, 7(1), 2005.2

[8] 徐钦民,王丽娟等. 基于 Matlab 的电工学课程 CAI[J]. 教师论坛, 2002.3

[9] 徐树山,谢煜. 计算机辅助分析与设计在电子技术实验中的应用[J]. 现代电子技术, 2005(14)

[10] 张双德,石伟用. MATLAB 语言进行电路设计实验[J]. 武汉工业学院学报, 2003(1)

[作者简介]杨明(1962~),男,山东财政学院计算机信息工程学院副教授/博士,主要研究方向:智能机器人控制、人工智能、机器学习与模式识别。

(收稿日期 2006-11-14)

(上接第 68 页)

[2] 年夫顺等. 现代通信测量仪器. 第一版,北京:军事科学出版社,1999:100~103

[3] Agilent. HP8753ES/ET Network Analyzers Service Guide. USA 2001:12-15~12-18

[4] 张厥盛,郑继禹,万心平. 锁相技术. 第一版,西安:西安

电子科技大学出版社,2001:1~17

[作者简介]胡小兰,女,1974年生,工程师,1997年毕业于合肥工业大学,在中国电子集团公司第41研究所从事微波毫米波矢量网络分析仪的研发工作。

(收稿日期 2006-04-07)

微波射频测试仪器使用操作培训

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,推出多套微波射频以及天线设计培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



微波射频测量仪器操作培训课程合集

搞硬件、做射频,不会仪器操作怎么行!对于射频工程师和硬件工程师来说,日常电路设计调试工作中,经常需要使用各种测试仪器测量各种电信号来发现问题、解决问题。因此,熟悉各种测量仪器原理,正确地使用这些测试仪器,是微波射频工程师和硬件工程师必须具备和掌握的工作技能,该套射频仪器操作培训课程合集就可以帮助您快速熟练掌握矢量网络分析仪、频谱仪、示波器等各种仪器的原理和使用操作...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/67.html>

矢量网络分析仪使用操作培训课程套装

矢量网络分析仪是最常用的测试仪器是射频工程师和天线设计工程师最常用的测试仪器;该套培训课程套装是国内最专业、实用和全面的矢量网络分析仪培训教程套装,包括安捷伦科技和罗德施瓦茨公司矢量网络分析仪的 5 套视频培训课程和一本矢网应用指南教材,能够帮助微波、射频工程师快速地熟练掌握矢量网络分析仪使用操作...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/vna/34.html>



示波器使用操作培训课程套装

示波器是硬件和射频工程师几乎在每天的工作中都会用到仪器,因此掌握示波器的原理并能够正确使用示波器是所有从事电子硬件电路设计和调试的工程师必须具备的最基本的技能。本站推出的示波器视频培训课程套装既有示波器的基本原理以及示波器性能参数对测量结果影响的讲解,也有安捷伦和泰克多种常用示波器的实际操作讲解,能够帮助您更加深入地理解手边常用的示波器从而更加正确地使用示波器...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rftest/osc/49.html>