

文章编号: 1672-2892(2010)02-0169-04

## 模拟锁相陶瓷介质振荡器技术

杨光<sup>1</sup>, 蒋国琼<sup>2</sup>, 董洪新<sup>1</sup>, 李宪军<sup>1</sup>

(1.国营第783厂, 四川 绵阳 621000; 2.四川长虹电器股份有限公司, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 通过对模拟锁相频率源及传统方法实现的锁相频率源进行简要的分析比较, 在分析取样鉴相器工作原理的基础上给出了模拟锁相CRO的具体实现方案。重点介绍了环路滤波电路及自动捕获电路的工作原理及参数设置, 同时也给出了改进输出信号杂波抑制的方法。设计所得到的模拟锁相CRO, 其相位噪声指标是采用一般的锁相方式难以获得的。实测表明模拟锁相CRO的相位噪声较低, 输出频率3 GHz, 相位噪声可以达到 $\leq -115$  dBc/Hz@10 kHz, 杂波抑制指标也有一定的优势, 可以达到优于-70 dBc。

**关键词:** 模拟锁相; 取样鉴相; 压控振荡器; 环路滤波器

**中图分类号:** TN752

**文献标识码:** A

## Analog phase-locked ceramic resonator oscillators

YANG Guang<sup>1</sup>, JIANG Guo-qiong<sup>2</sup>, DONG Hong-xin<sup>1</sup>, LI Xian-jun<sup>1</sup>

(1.State-run NO.783 factory, Mianyang Sichuan 621000, China; 2.Changhong electric Co., Ltd., Mianyang Sichuan 621000, China)

**Abstract:** This study researched and analyzed the analog phase-locked Ceramic Resonator Oscillators(CRO) technology based on low-phase noise, high-clutter suppression techniques. The analog phase-locked frequency source and the phase-locked frequency source implemented by traditional methods, were compared and analyzed. Based on the analysis of the working principle of sampling phase detector, an implementation scheme for the analog phase-locked CRO was proposed. Highlighting the operating principle and parameters setting of loop filter circuit and the auto-capture circuit, a method was given to improve the output signal spurious suppression. The phase noise indicators of the designed analog phase-locked CRO, were difficult to be obtained using general phase-locked methods. The practical test result of the proposed scheme indicated that the phase noise of analog phase-locked CRO was very low(with output frequency of 3 GHz, the phase noise could be less than or equal to  $-115$  dBc/Hz@10 kHz), and the spurious suppression index also showed certain advantages(could be better than  $-70$  dBc).

**Key words:** analog phase-locked; sampling phase detect; voltage-controlled oscillator; loop filter

模拟锁相陶瓷介质振荡器(CRO)是利用模拟锁相技术实现的锁相式频率源(一般是固定点频), 它有别于传统的利用整数或小数分频技术实现的锁相频率源, 其主要优势是其极低的相位噪声。传统的锁相频率源由于预分频器和数字分频器的应用, 对输出信号的相位噪声特性影响比较大<sup>[1]</sup>; 而模拟锁相 CRO, 一方面因为用于锁相的 CRO 具有高 Q 值特性, 噪声基底非常低<sup>[2]</sup>, 其远端相位噪声远优于传统的基于压控振荡器(Voltage Controlled Oscillator, VCO)的锁相频率源; 另一方面因为利用微波取样鉴相器(Sampling Phase Detector, SPD)直接将输出锁定在参考信号的谐波频率上, 近端相位噪声特性也远优于传统的锁相频率源(按晶体振荡器近端相位噪声+20lg N+3 计算)。此外, 因为 CRO 都工作在一个窄带的频率范围内, 一般可以做到使模拟锁相 CRO 输出信号的杂波抑制 $\leq -70$  dBc。

### 1 模拟锁相 CRO 工作原理

模拟锁相技术的原理是利用一个取样鉴相器作为梳线谱发生器, 使输入的参考信号产生一系列参考信号频率的整数倍频率, 通过取样鉴相器中的混频器来检测梳线频率和压控振荡器输出频率的相位差以实现鉴频/鉴相,

从而将输出信号直接锁定在参考信号的高次谐波上，实现锁相。

取样鉴相器由 3 部分组成，见图 1。阶跃恢复二极管(Step Recovery Diode, SRD)对应 D1，它的作用是产生一个周期同输入信号频率的窄脉冲。门电容对应 C1 和 C2，它们的作用就如同一个开关<sup>[2]</sup>。肖特基二极管对应 D2 和 D3，其作用是作为鉴相器来比较输出信号与相应参考信号的谐波频率，输出的差拍信号送到锁相环路中的环路滤波电路做锁相用。

模拟锁相 CRO 的简要工作原理见图 2。晶体振荡器产生的参考信号经过预放大等处理，送到取样鉴相器产生一系列参考信号整数倍的谐波频率。其中的一个需要的谐波信号与压控 CRO 输出负反馈信号(一般通过耦合得到)在取样鉴相器中进行鉴频/鉴相，其输出的差拍信号送到环路滤波及自动捕获电路，经过有源环路滤波电路滤除高频信号后，得到一个调谐电压，该电压控制压控 CRO 的输出频率，从而将压控 CRO 的输出锁定在参考信号的谐波频率上。压控 CRO 输出信号主路输出经过放大滤波等处理后，最终输出满足指标要求的连续波信号。

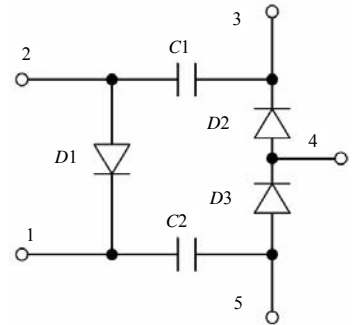


Fig.1 Sampling phase detector  
图 1 取样鉴相器组成

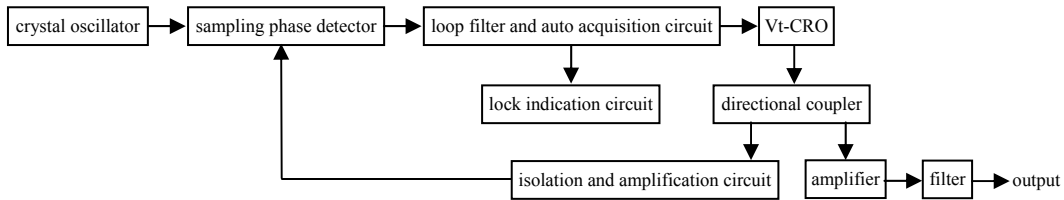


Fig.2 Schematic of analog phase-locked CRO  
图 2 模拟锁相 CRO 工作原理

## 2 关键技术

### 2.1 环路滤波及自动捕获电路参数设置

本文介绍的模拟锁相技术不同于一般的数字锁相技术，一般的数字锁相环其有源环路滤波电路都是负反馈型的<sup>[3]</sup>，而该模拟锁相技术其环路滤波电路除了负反馈支路之外还有一个辅助正反馈支路，可以进行自动捕获。如果环路滤波电路只有负反馈，那么在 VCO 负载牵引、环境条件变化等情况下，开机一旦出现输入信号频率没有落在锁相环路捕获带内的情况，环路就会出现失锁，而该状态可能会一直持续<sup>[4]</sup>；而本文介绍的模拟锁相技术其正反馈支路可通过检测取样鉴相器输出电压来主动帮助锁相环路进入锁定状态。

模拟锁相 CRO 要实现锁相，其关键就是环路滤波及自动捕获电路的设置。该电路是模拟锁相 CRO 中最重要的部分，它决定了锁相环路能否进入自动捕获、输出信号的相位噪声、环路的稳定性等特性。在本项目中采用的环路滤波及自动捕获电路见图 3。

从图 3 可见，环路滤波及自动捕获电路是由 2 个反馈支路构成的：由 OPA2 环路滤波电路及 OPA3 高输入阻抗隔离缓冲电路构成的负反馈支路；由 OPA1 作为施密特触发比较器和 OPA2 积分电路构成的正反馈支路<sup>[5]</sup>。该电路实际上可以看成是一个三角波电压产生电路。

三角波电压扫描的频率为：

$$f = \frac{R_6}{2(R_6 - R_4)R_5C_1} \quad (1)$$

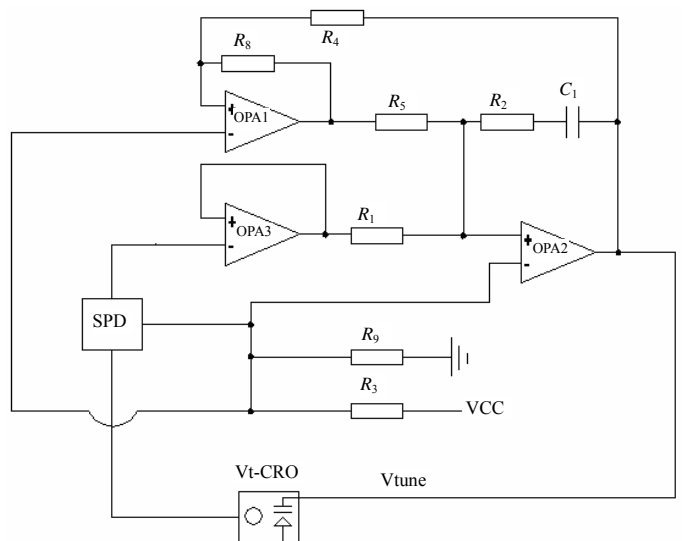


Fig.3 Loop filter and auto acquisition circuit  
图 3 环路滤波及自动捕获电路

三角波电压产生与否取决于正负反馈支路谁起主要作用。在环路未进入锁定状态前，取样鉴相器输出电压下降，由施密特触发器 OPA1 产生的通过 R5 的电流将占优势，三角波扫描信号将会产生，直到环路进入锁定状态。

当环路处于锁定状态下时, 取样鉴相器的输出电压是其最大值, 通过电阻  $R_4$  的电流远大于通过电阻  $R_5$  的电流, 此时负反馈占优势, 正反馈支路被抑制, 三角波扫描信号停止。因此, 当该三角波的频率设置适当的时候, 利用三角波电压对压控 CRO 进行频率扫描, 就可使锁相环路进行自动捕获, 保持环路的锁定状态。环路带宽为:

$$\omega_n^2 = \frac{K_d K_v}{R_1 C_1} \quad (2)$$

式中:  $K_d$  为取样鉴相器输出灵敏度;  $K_v$  为压控 CRO 调谐器灵敏度。

阻尼系数为:

$$\xi = \frac{1}{2} R_2 C_1 \omega_n \quad (3)$$

三角波扫描频率与环路带宽有一定对应关系, 环路带宽越宽, 谐波锁相环路的捕获能力就越强, 允许的扫描频率越高。要使环路进入锁定状态, 三角波扫描电压的频率  $\Delta\omega$  必须满足以下条件:

$$\Delta\omega = 2\pi f < \frac{\omega_n^2}{2} \quad (4)$$

在实际应用中, 可以这样设置:

$$\Delta\omega = 2\pi f = 0.1 \times \frac{\omega_n^2}{2} \quad (5)$$

## 2.2 杂波抑制改善

在模拟锁相 CRO 的实际实现过程中, 锁相环路射频负反馈支路的隔离放大对模拟锁相 CRO 的杂波抑制有很大改善。如果不加隔离放大, 只是采用简单的耦合或功放措施得到射频负反馈信号, 取样鉴相器产生的丰富的参考谐波分量会通过射频负反馈支路影响压控 CRO 的输出信号, 形成不需要的杂波, 这样很难做到使模拟锁相 CRO 杂波抑制小于等于  $-60$  dBc, 而这些杂波如果放到后面处理就非常麻烦, 需要增加一个窄带的带通滤波器, 相应地增加模块体积及成本。采取隔离放大后, 由于放大器的反向隔离作用(一般有  $40$  dB 的反向隔离作用), 输出信号不需要滤波, 也可以很轻松地使模拟锁相 CRO 的杂波抑制小于等于  $-70$  dBc。

## 2.3 压控 CRO 工作频带选择

压控 CRO 的输出频率随调谐电压的变化而变化, 其工作频带不宜宽, 除了包含所需要的输出频率  $f_{out}$  外, 其调谐电压对应输出频率不允许达到  $f_{out} \pm f_{ref}$  ( $f_{ref}$  为参考信号频率)。否则, 锁相环路可能发生错锁(三角波扫描电压可能在不需要  $f_{out} \pm f_{ref}$  处就停下来, 进入锁定状态)。

## 3 测试结果

下面是利用模拟锁相技术实现的一个输出频率为  $3$  GHz 锁相 CRO 的测试指标, 输出信号单边带相位噪声测试结果见图 4。其中, 输出频率为  $3$  GHz; 单边带相位噪声:  $\leq -110$  dBc/Hz@ $1$  kHz,  $\leq -115$  dBc/Hz@ $10$  kHz,  $\leq -120$  dBc/Hz@ $100$  kHz; 杂波抑制:  $\leq -70$  dBc; 谐波抑制:  $\leq -50$  dBc; 输出功率:  $\leq +10$  dBm; 参考工作频率为  $100$  MHz(外供); 工作温度:  $-40$  °C~ $+70$  °C; 尺寸:  $\leq 71$  mm  $\times$   $71$  mm  $\times$   $17$  mm。

## 4 结论

在美欧等国家, 模拟锁相技术已经相

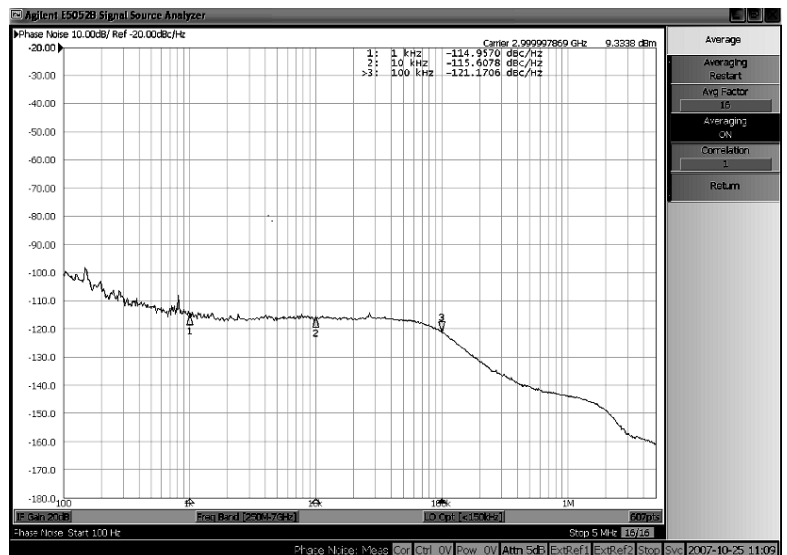


Fig.4 Results of testing analog lock CRO SSB phase noise with signal source analyzer E5052B(Note: In the chart, the value of the power of the test signal was the value of signal after the transmission cable attenuation, the actual value was about  $10.8$  dBm, meeting the demand.)

图 4 用信号源分析仪 E5052B 测试模拟锁相 CRO 单边带相位噪声的测试结果(该图中测试信号的功率为信号经过传输电缆衰减后的值, 实际值约  $10.8$  dBm, 满足指标要求)

当成熟。由于其具有超低相位噪声、高杂散抑制及低成本等优势,模拟锁相频率源已广泛应用在仪器、雷达、直接频率合成器、通信及电子战系统中。本文介绍的模拟锁相 CRO 由于受 CRO 的工作频段限制,一般可实现几百 MHz 到 4 GHz 频段内锁相点频源。但本文介绍的模拟锁相技术具有通用性,如果要得到更高工作频率则只需将压控 CRO 换成工作频率更高的压控介质振荡器即可,最高可实现 22 GHz 的模拟锁相。

#### 参考文献:

- [1] 高树亭,高峰,徐盛旺,等. 合成频率源工程分析与设计[M]. 北京:兵器工业出版社, 2008.
- [2] Inder Bahl,Prakash Bhartia. 微波固态电路设计[M]. 2 版. 郑新,译. 北京:电子工业出版社, 2006.
- [3] 张蔚盛,郑继禹,万心平. 锁相技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1994.
- [4] 方建邦,董献忱. 锁相环原理及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 1988.
- [5] Avi Brillant. Understanding Phase-Locked DRO Design Aspects[J]. MICROWAVE JOURNAL, 1999,42(9):22-42.

#### 作者简介:



杨光(1976-),男,四川省遂宁市人,硕士,研究方向为频率合成器及相关产品。

蒋国琼(1978-),女,四川省广安市人,学士,研究方向为数字信号处理.email:guoqiong.jiang@changhong.com.

董洪新(1976-),男,江苏省宝应县人,硕士,研究方向为接收技术。

李宪军(1980-),男,山东省郓城县人,工程硕士,研究方向为 T/R 组件。