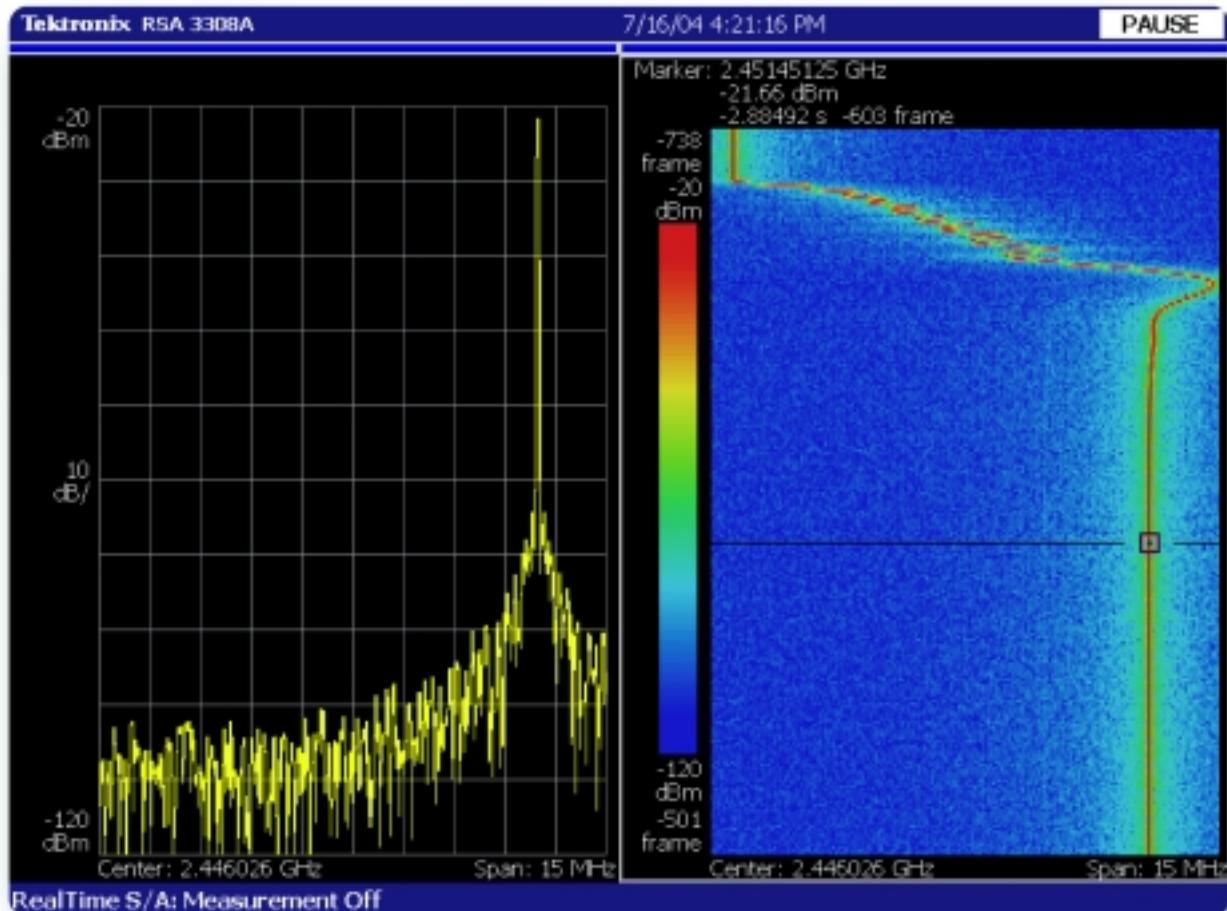


使用泰克实时频谱分析仪检定锁相环



导言

锁相环已经成为电子器件中最通用的元件之一。它们位于电路和系统的核心，包括数据通信中的时钟恢复模块及手机中普遍采用的局部振荡器。使输出频率成为参考频率的倍数，这一特点使得锁相环(PLL)成为频率合成器、对准同步系统中的各种时钟及混合应用中的首选电路，如跟踪卫星多普勒位移及在工控接近式传感器中传感瞬间电抗变化。

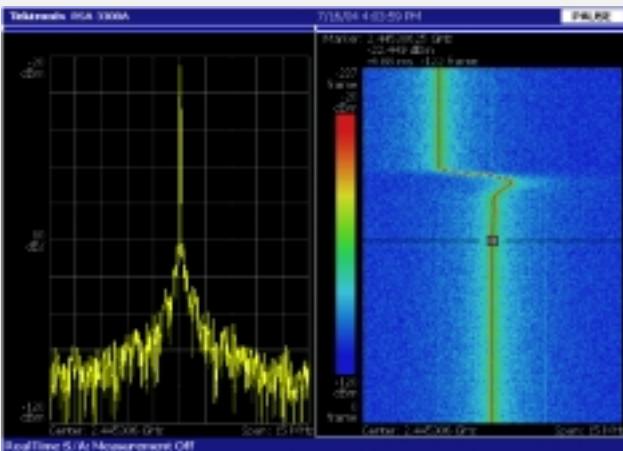
业内已经做了大量的工作，根据其功能把PLL描述为线性反馈控制系统。线性稳定状态近似值精确地描述了PLL操作，可以确定与稳定锁定状态有关的很小的变化。线性对描述小信号效应已经足够了，如PLL对小信号调制的响应、相噪或杂散辐射。线性分析主要在频域中完成，它使用传统频谱分析仪和网络分析仪进行性能测量。但是，在远离锁定、在切换瞬变过程中及在对大的信号输入作

出响应时，PLL 的行为方式与线性模型有着很大的差别。非线性操作通常主导关键参数，如稳定时间、切换速度和捕获范围。了解线性操作和非线性操作对满足频率捷变通信系统中的辐射要求也至关重要，这些系统采用PLL，作为跳频振荡器的一部分。非线性分析通常在时域中完成，使用在线探头和示波器进行性能测量。

使用泰克实时频谱分析仪检定锁相环

► 应用指南

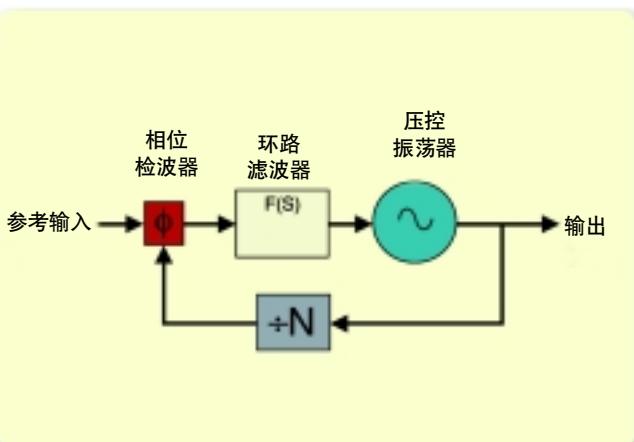
实时频谱分析仪



► 泰克实时频谱分析仪：频谱和频谱图，显示了PLL切换瞬变。

频率域和时域

泰克实时频谱分析仪能够在时域或频域中触发瞬时信号，捕获信号的无缝时间记录，在频域、时域、调制域和码域中分析捕获的信号。能够在多个域中操作，使得泰克实时频谱分析仪成为测量锁相环线性性能和非线性性能的理想仪器。



► 图1：锁相环的组件图。

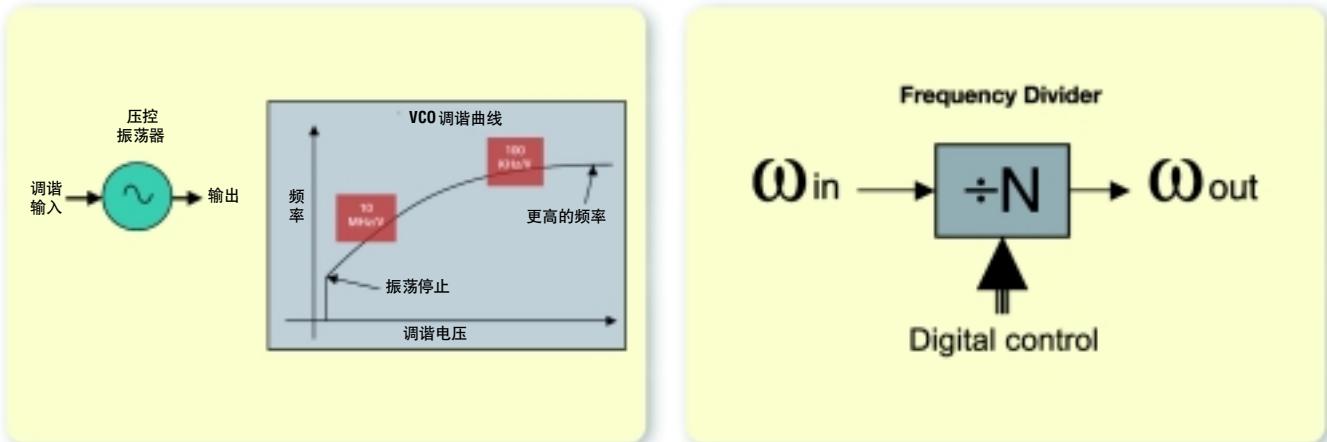
大规模混合信号集成电路的出现，把大部分PLL电路推到单片集成电路上，使得探测所需的信号变得不再可行。这就要求只使用通常可用的PLL输出信号，在时域中测量频率和相位。

本文概括介绍了锁相环操作，包括线性效应和非线性效应。它还介绍了怎样使用泰克实时频谱分析仪在时域和频域中测量这些效应。

PLL 基础知识

锁相环基本上是一种控制系统，它采用反馈技术，使输出信号的相位与参考信号的相位保持一致。更具体地说，在锁定时，PLL控制输出信号的相位，使其是参考信号的相位的N倍，如图1所示。类似的，输出信号的频率也是参考频率的N倍。与所有线性反馈控制系统一样，PLL具有动态行为特点，通常使用Fourier或Laplace技术描述，会得到S或 $j\omega$ 的转函。转函方法描述的线性行为可以用来分析锁定附近的环路操作。非线性效应是没有锁定条件下PLL行为的主要特点，如在改变分频比率，以在很大范围内切换频率时。

大多数锁相环共用的组件是相位检波器、环路滤波器、压控振荡器或VCO及分频器。每个组件都具有线性和非线性操作特点。



► 图2. 压控振荡器及其非线性调谐曲线。

压控振荡器(VCO)

压控振荡器或VCO通过调谐信号来控制输出频率，如图2所示。顾名思义，这个调谐信号一般是一个电压，但也可以是另一个变量，如可以实现流振振荡器、数字控制振荡器、甚至机械控制振荡器。

VCO的调谐灵敏度K_v是线性分析中最重要的参数。VCO通常是非线性的，调谐灵敏度在调谐范围内变化很大。采用VCOs、且调谐灵敏度变化很大的PLL通常要求增益补偿，以保持一致的性能。VCOs还具有其它需要考虑的非线性行为，包括最小和最大调谐频率，以及振荡停止或生成不想要的频率成分的调谐电压。

VCO 线性近似值

$$\omega_{out}(t) = K_V V_{in}(t) + \omega_0$$

$$\phi_{out}(t) = K_V \int V_{in}(t) dt + \phi_0 t$$

其中 $\phi_{out}(t)$ 和 $\omega_{out}(t)$ 表示 VCO 输出信号的相位和频率。VCO 相位和频率还可以表示为复合频率的函数。

$$\frac{\omega_{out}(s)}{V_{in}(s)} = K_V$$

$$\frac{\phi_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{K_V}{S}$$

分频器

频率合成中使用的锁相环通常采用分频器，如图3所示。这通常是一个数字计数器，它为N个输入脉冲生成一个输出脉冲。相位和频率都按比率N进行放大。N通常是一个整数。还存在着分数N技术，提供不是整数的比率。

分频器线性近似值

$$\omega_{out} = \frac{\omega_{in}}{N}$$

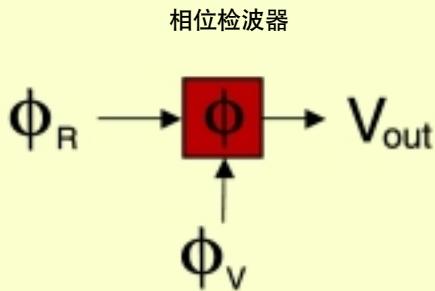
$$\phi_{out} = \frac{\phi_{in}}{N}$$

其中 ω_{out} 和 ϕ_{out} 是输出频率和相位， ω_{in} 和 ϕ_{in} 是输入频率和相位，N是分频比率。

整数N分频器以线性方式在指定除数和频率范围内工作，在这些范围内，它们使用恒定值扩大信号的相位。分数N分频器通过交替使用多个整数值，实现非整数的比率。这种非线性操作通常会生成要求滤波、校正或同时进行滤波和校正的杂散信号。

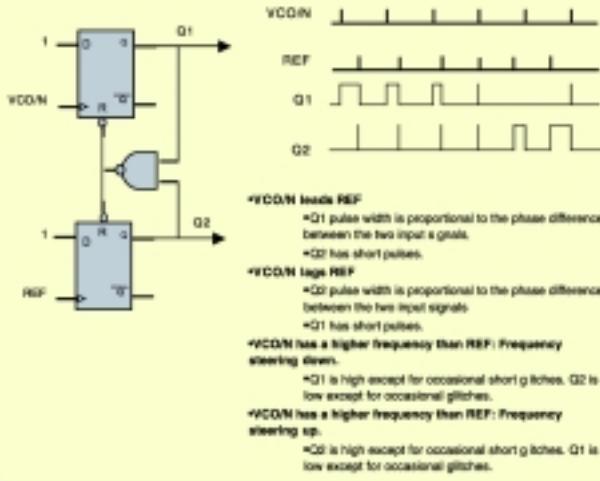
使用泰克实时频谱分析仪检定锁相环

► 应用指南



► 图4. 理想的相位检波器。

相位频率检波器逻辑和定时



► 图5. 相位频率检波器操作。

相位检波器

如图所示，相位检波器是生成与两个输入信号相位差成比例的输出信号的电路。

相位检波器线性近似值

$$V_{out}(t) = K_\phi [\phi_v(t) - \phi_R(t)]$$

其中 K_ϕ 是相位检波器增益， $\phi_v(t)$ 是来自 VCO 的信号的相位， $\phi_R(t)$ 是参考信号的相位。它有时可以用来独立考察两个信号的响应。

$$V_{out}(s) = K_\phi \phi_v(s)$$

或

$$V_{out}(s) = -K_\phi \phi_R(s)$$

相位频率检波器

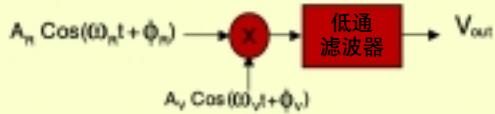
相位频率检波器是最流行的相位检波器之一。它使用非常频繁，因为它采用低廉的数字逻辑实现，在嵌入的PLL解锁时，它本身具有频率操纵能力。图5说明了基本相位频率检波器的逻辑和定时。

相位频率检波器具有弧度为 $\pm 2\pi$ 的线性工作范围，通常带有电流和电压源，其通过触发式逻辑状态选通开关。在

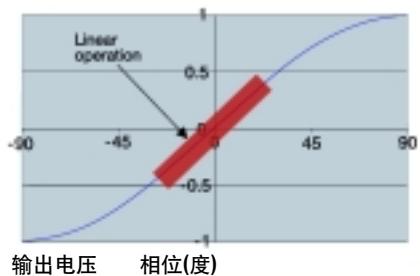
超过线性范围时，频率操纵操作以锁定方向推动环路。某些相位频率检波器在零相位差附近还有小的“盲区”非线性度，要求相位偏置，强制静止锁定点偏离零。

在输入上存在的两个信号之间的相位差超过 2π 弧度时，相位频率检波器输出会复位。后续复位只能由解锁条件引起，把相位频率检波器置于频率操纵模式下。在这种模式下，相位频率检波器提供了一个脉冲式信号，在锁定的正确方向上推动 VCO。在频率操纵过程中，PLL 有效开路。在频率操纵模式下，PLL 的瞬时性能不会表现出线性反馈控制系统预计的稳定波形。一旦输出频率接近锁定频率，相位频率检波器会返回相位检波模式。

作为相位检波器使用的 RF 混频器或复用器



在作为相位检波器使用时的混频器响应



线性近似值对正交附近的信号有效。对相位差大的行为，非线性操作是其主要特点。可以看出，在频率误差很小，且环路位于捕获范围内时，混频器的正弦曲线特点将把 PLL 驱动到锁定中。采用混频器型相位检波器的 PLL 通常使用外部预先调谐或频率操纵机制，使两个频率落在捕获范围内。

环路滤波器

环路滤波器用来剪裁 PLL 响应，以优化其带宽、切换速度、稳定时间、杂散电平或其它电路参数。环路滤波器通常包括积分器，其受到构成积分器电路的有源器件的线性特点影响。例如，在接近供电电压时，由于输出电压削波，对向放大器会变成非线性。

▶ 图 6. RF 混频器及其作为相位检波器操作。

混频器相位检波器

倍频器或混频器也可以作为相位检波器使用。如图 6 所示，可以看出混频器的输出与两个输入之间的相位差的正弦成正比。

$$V_{out} = K_{det} A_R A_v \cos(\phi_R - \phi_v)$$

$$\text{Let } \varphi_R, \varphi_v = \frac{\pi}{2} - \Delta\varphi$$

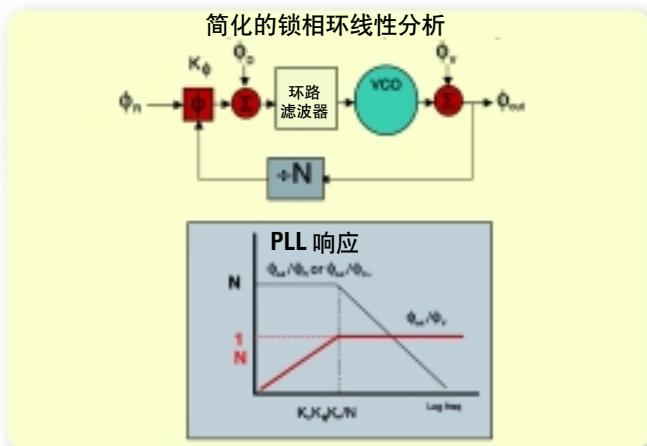
其中 A_R 和 A_v 是幅度， ϕ_R 和 ϕ_v 是两个相位检波器输入信号的相位， K_{det} 是混频器转换增益。

对接近正交的小相位差：

$$V_{out} = K_{det} A_R A_v \sin(\Delta\phi) \approx K_{det} A_R A_v (\Delta\phi)$$

使用泰克实时频谱分析仪检定锁相环

► 应用指南



► 图 7. PLL 线性分析。

PLL 线性操作

通过使用为反馈控制系统开发的技术，生成 S 转函，可以简便地描述锁定附近的 PLL 操作。S 是 Laplace 变换中使用的复合频率参数。

通过使用传统技术，可以找到到各种可能激励点的转函。这里介绍了对参考信号相位波动的响应、对 VCO 相位波动的响应及对相位检波器输出上注入的信号相位波动的响应。

$$\frac{\phi_{out}(s)}{\phi_R(s)} = \frac{K_V K_\phi F(s)}{S + \frac{K_V K_\phi F(s)}{N}}$$

Let $F(s) = K_F$.

$$\frac{\phi_{out}(s)}{\phi_R(s)} = \frac{K_V K_\phi K_F}{S + \frac{K_V K_\phi K_F}{N}}$$

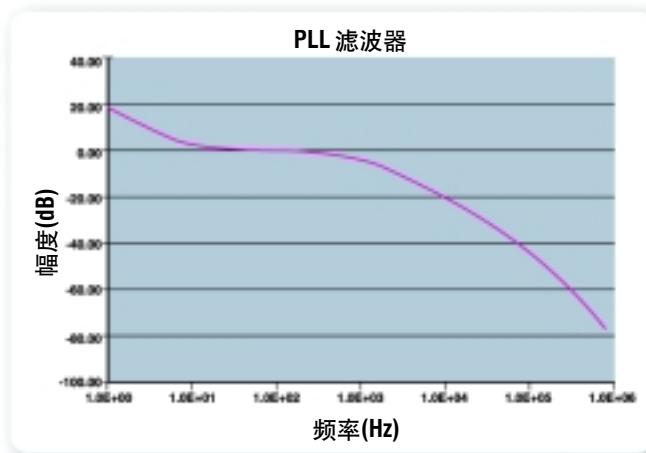
通过类似操作，可以获得对相位检波器输出上加总的信号的响应。

$$\frac{\phi_{out}(s)}{\phi_D(s)} = \frac{K_V K_F}{S + \frac{K_V K_\phi K_F}{N}},$$

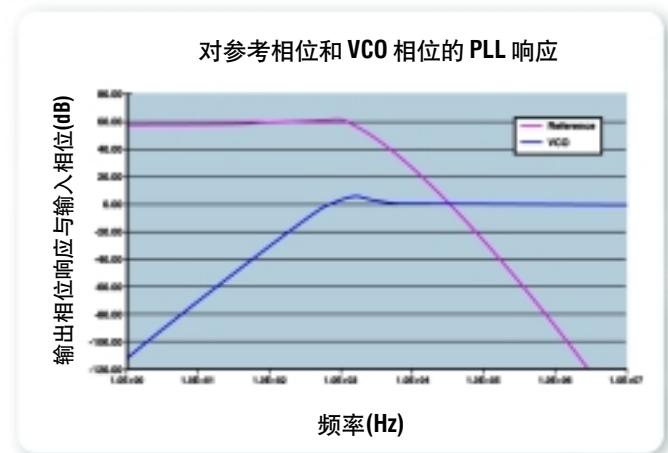
以及对 VCO 相位波动的响应。

$$\frac{\phi_{out}(s)}{\phi_V(s)} = \frac{S}{S + \frac{K_V K_\phi K_F}{N}}.$$

PLL 转函描述了对参考相位波动的响应，其具有低通形状。如图 7 所示，对低于 PLL 带宽的频率成分，输出相位为参考相位波动乘以 N。对高于 PLL 带宽的相位成分，输出相位独立于参考相位。对在相位检波器上增加的信号，响应具有类似的低通形状。描述对 VCO 相位波动的 PLL 响应的转函具有高通形状。对高于环路带宽的波动成分，PLL 对 VCO 相位没有影响，但它会衰减位于环路带宽内部的低频成分。PLL 的这种特点通常用来改善振荡器的相位稳定性，其中使用相噪很低的参考信号改善高频 VCO 的相噪。参考信号的相噪和相位检波器噪声乘以 N 在低频中占主导地位，VCO 的相噪则在高频中占主导地位。PLL 以类似的方式影响其它相位调制源(噪声、杂散信号等)。为简单起见，这里只考虑了 VCO、参考和相位检波器噪声。



► 图 8. PLL 滤波器幅度响应。



► 图 9. 与参考相位和 VCO 相位中的波动对应的四阶 PLL 的相位转函。

实际环路滤波器

实际 PLL 滤波器包含一个积分器、一个电极、一个对 PLL 响应整形的零极以及滤除参考频率馈通杂散信号的另一个电极。如图 8 所示，在环路滤波器中包含积分器的 PLL 称为二类锁相环。

$$F(s) = K_i \frac{bc}{a} \frac{(s+a)}{s(s+b)(s+c)}$$

然后，PLL 响应变成四阶函数。如图 9 所示，PLL 对参考相位中相位波动的响应及对相位检波器上加总的信号的响应是低通函数，公式如下：

$$\frac{\phi_{out}(s)}{\phi_R(s)} = \frac{K_V K_\phi K_i \frac{bc}{a} (s+a)}{s^4 + (b+c)s^3 + bcs^2 + \frac{K_V K_\phi K_i}{N} \frac{bc}{a} s + \frac{K_V K_\phi K_i}{N} bc}$$

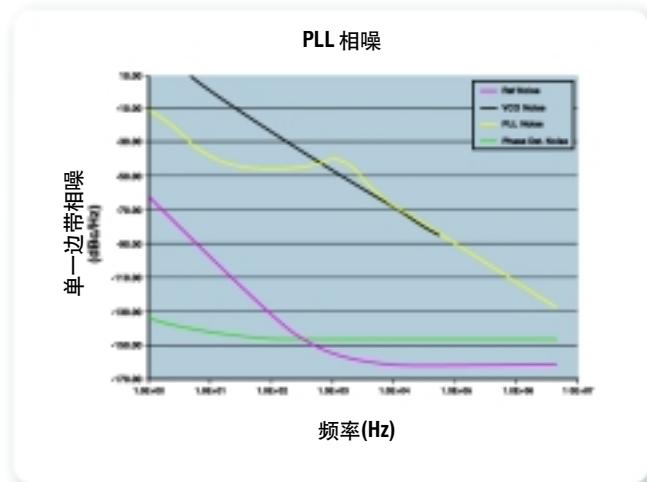
$$\frac{\phi_{out}(s)}{\phi_V(s)} = \frac{K_V K_i \frac{bc}{a} (s+a)}{s^4 + (b+c)s^3 + bcs^2 + \frac{K_V K_\phi K_i}{N} \frac{bc}{a} s + \frac{K_V K_\phi K_i}{N} bc}$$

PLL 对 VCO 相位波动的响应是一个高通函数，公式如下：

$$\frac{\phi_{out}(s)}{\phi_V(s)} = \frac{s^4 + (b+c)s^3 + bcs^2}{s^4 + (b+c)s^3 + bcs^2 + \frac{K_V K_\phi K_i}{N} \frac{bc}{a} s + \frac{K_V K_\phi K_i}{N} bc}$$

使用泰克实时频谱分析仪检定锁相环

► 应用指南



► 图10. PLL 相噪、未校正的 VCO 相噪、参考噪声和相位检波器 噪声。

线性分析实例：PLL响应对相噪性能的影响

相噪在振荡器中

所有振荡器都存在着相位波动。这些波动可以解释为每个过零确切时间的不规律性，称为抖动。波动还可以视为随机相位调制，称为相噪。相噪通常用 1 Hz 带宽中的边带功率与信号功率之比表示，单位为 dBc/Hz。图 10 是低噪声晶体振荡器中典型参考信号的相噪、2.4 GHz VCO 噪声及相位检波器导致的噪声曲线。图中还显示了 PLL 输出上的合成噪声。注意，输出噪声明显要低于低频偏置时没有锁定的 VCO 噪声，只在接近环路带宽附近的很窄区域中超过了 VCO 噪声。通过进一步优化环路滤波器及改善相位检波器的噪声性能，可以改善系统相噪，超过这里所示的性能。



► 图11. 测量载波噪声比(C/N)和1Hz带宽中的载波噪声比, C/No。

测量相噪

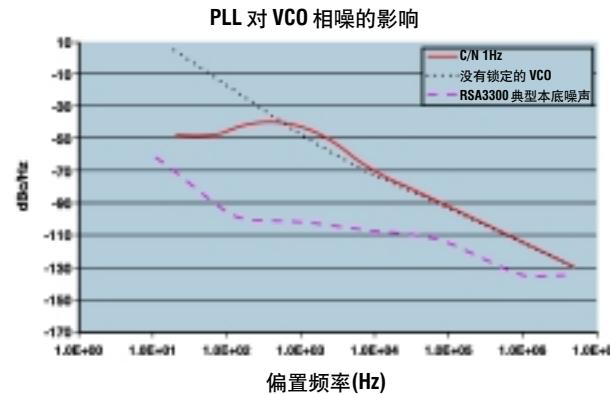
泰克实时频谱分析仪可以使用载波噪声比指标(C/N)直接测量相噪。可以使用直接读数测量这一指标，它提供了指定带宽中的 C/N 及 1 Hz 带宽中的 C/N (C/No)。另一种方法是使用标尺读数，其提供了给定分辨率带宽时的标尺功率读数以及归一到 1 Hz 带宽的功率。

图 11 是 C/N 测量屏幕。在这种情况下，以距载波中心频率 2 Hz 的偏置测量 C/N。100 Hz 指定噪声带宽的 C/N 是 25.21 dB，C/No 是 45.21 dB，如屏幕左下角所示。

表1是在各种偏置时进行的测量。根据使用的跨度及希望的噪声平均数量，测量带宽会有所变化。

偏置频率 (Hz)	测量带宽 (9Hz)	C/No (dBc/Hz)
20	10	-49
50	10	-48.5
100	10	-46.4
200	50	-43.3
300	50	-42.2
500	100	-42
700	100	-41.7
1000	100	-42.7
1500	100	-44.8
2000	100	-48.8
3000	100	-54.8
5000	200	-62
7000	200	-66.3
10000	200	-70.6
30000	1000	-81.5
100000	10000	-93.7
300000	100000	-104.4
1000000	100000	-114.8
5.00E+06	100000	-128.8

▶ 表1. 各种偏置时的C/N指标。

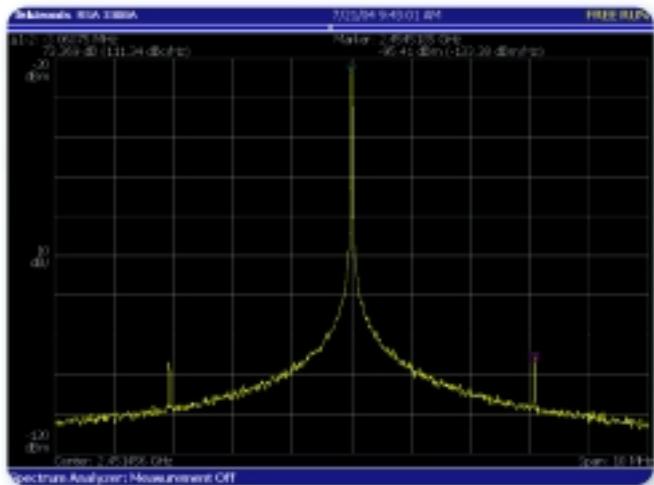


▶ 图12. PLL 输出相噪、没有锁定的VCO 噪声和RSA 系列典型测量本底噪声。

图12是在上面测得的PLL相噪叠加在没有锁定的VCO相噪图。另外还显示了泰克RSA系列实时频谱分析仪典型的本底噪声。

使用泰克实时频谱分析仪检定锁相环

► 应用指南



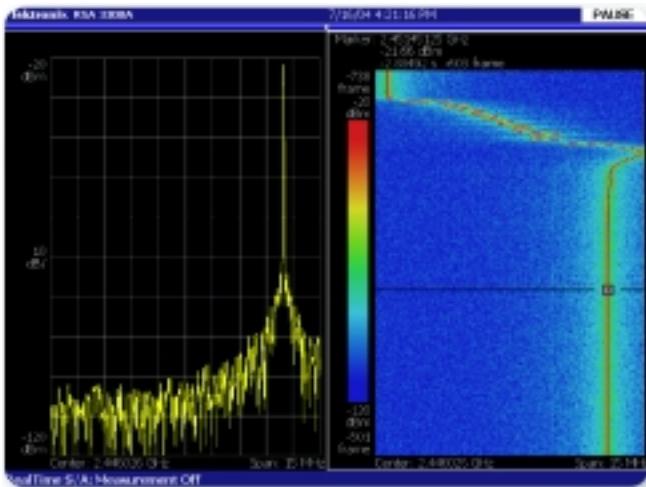
► 图 13. 测量参考杂散信号。

测量杂散信号

许多杂散信号源可能会影响锁相环的输出，如驱动数字电路的时钟、电源开关频率、附近转换阶段的局部振荡器及各种频率中的互调制产物。在PLL中普遍存在的一个杂散信号来源是参考信号。相位检波器输出通常由参考频率上发生的脉冲组成，它以参考频率倍数生成频率成分。环路滤波器中通常设计了参考频率抑制功能，以降低与参考信号有关的杂散信号电平。预测参考杂散信号电平的分析方法并不理想。在设计过程中通常必需进行测量，在检验中也需要进行测量。

测量杂散信号通常在频域中进行。可以选择分辨率带宽(RBW)，把想要的杂散信号从存在的任何噪声中解析出来，并使用轨迹平均功能，滤掉显示的任何额外噪声。标尺增量为识别杂散信号频率及其相对于PLL输出频率的幅度提供了一种方便的方式。

图13显示了PLL中参考杂散信号的标尺增量测量结果，其中显示了低于载波73.4 dB的电平、3.07 MHz的频率偏置及PLL参考频率时的杂散信号。



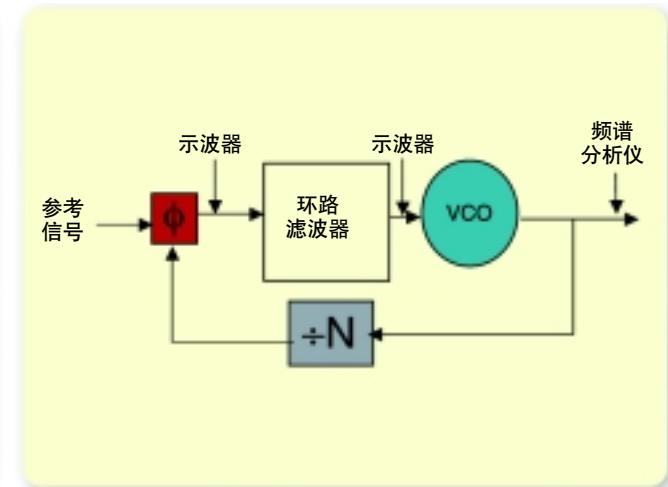
► 图14. 频谱图, 显示了PLL 切换瞬变的频率操纵部分。频率从 2439.17 MHz 切换到 2451.46 MHz。

非线性操作：测量瞬时特点

图 14 画出了在从 2439.17 MHz 切换到 2451.46 MHz 时 PLL 合成器的频率输出。相位频率检波器的非线性频率操纵操作占用了很大一部分稳定时间。线性操作在 550 微秒以后开始, 这时相位检波器位于工作范围内, 环路关闭。线性分析可以预测超过这一点时的行为。时域建模通常使用 Z 变换技术完成, 必需对切换瞬变的非线性部分进行直接测量。

传统测量方法

在传统上, 锁相环一直使用离散器件实现, 探测和测量会使用上面讨论的每个部件。图 15 显示了可以怎样测量这类系统中的瞬时行为, 其方式是探测 VCO 调谐线、相位检波器输出和 VCO 输出, 以直接观察瞬时行为。这种探测 PLL 信号通路中关键点的方法特别适合能够使用要求的探测点的情况。



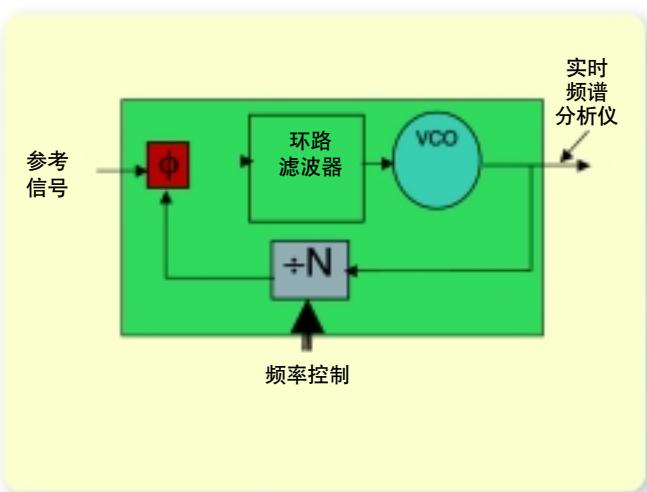
► 图15. 通过探测相位检波器输出和VCO 控制信号, 测量瞬时响应。

PLL 集成到多功能集成电路中

蜂窝电话、无线网卡、串行数据通信等正日益作为单芯片子系统实现。整个 PLL 通常是集成电路的一部分, 集成电路中还包含许多其它部件。一旦集成电路被封装, 探测将不再可行, 即使能够在集成电路针脚上提供任何信号, 也几乎不能进行探测。必须只使用提供的信号进行 PLL 检定。自然的信号是输出频率、参考频率和任何控制输入。如果不能说是全部的话, 起码大部分所需信息可以通过在实时频谱分析仪上观察 PLL 输出的频率轨迹来获得, 如图 16 所示。RTSA 可以使用频率模板触发器在外部触发(如使用来自控制总线的信号)或在内部触发。

使用泰克实时频谱分析仪检定锁相环

► 应用指南

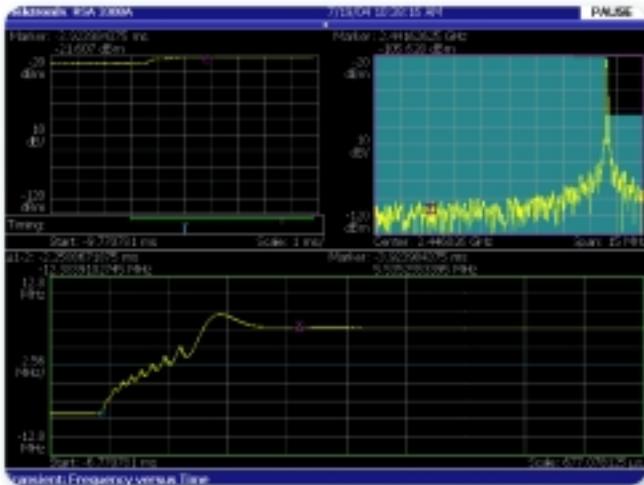


► 图 16. 集成 PLL 中提供的信号。

频率模板触发器

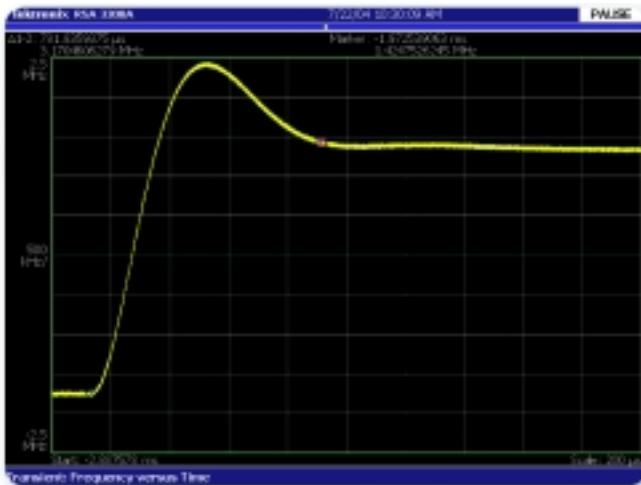
可以设置频率模板触发器，在频谱越过预定模板的瞬间触发采集。在上面所示的实例中，模板设置成在振荡器频率越过目的频率(2.45146 GHz)的瞬间触发采集，如图17右上方的曲线所示。触发发生的瞬间在左上方曲线中用蓝色的T标出。

通过查看左上方曲线中绿条表明的触发前数据和触发后数据，可以分析导致频率切换的频率轨迹，以及在下方曲线显示之后的轨迹。可以在右上方曲线中显示给定时点的频谱，其在左上方曲线中用红条表示。增量标尺显示了稳定到最终频率 100 KHz 范围内的切换时间是 2.259 mSec。频率操纵占用了前面 1.3 mSec 的切换时间，其余部分被闭环稳定所占用。

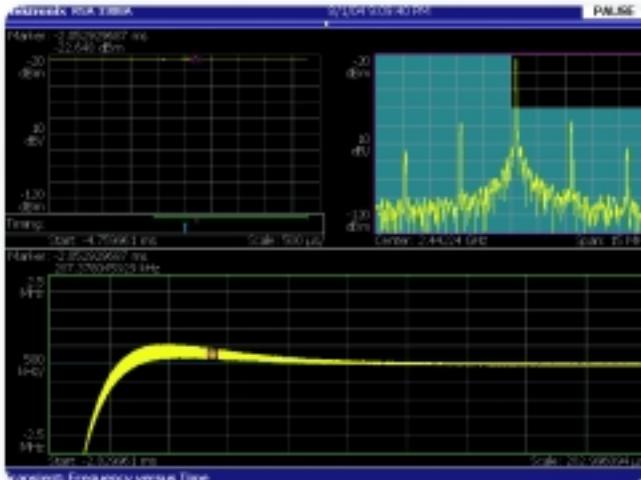


► 图 17. 使用频率模板触发器测量切换速度。注意线性区域和非线性区域。

通过以较小的步进切换同一个PLL的频率，可以显示PLL线性操作和非线性操作之间的差异。图18显示了在从2.44838 GHz 切换到 2.45146 GHz、步进为 3.072 MHz 时的PLL频率轨迹。稳定到最终频率 100 KHz 范围内的输出频率稳定时间现在是 781.8 μS。瞬变形状显示了适度过冲时闭环系统的预计步进响应，在测量更大的步进时，PLL没有显示非线性操纵行为。



► 图18. 小的频率步进的切换速度测量。PLL 仍处于线性和锁定模式。



► 图19 和图20. 在频率切换瞬变过程中及稳定后PLL输出的频谱。

时间相关频谱分析

信号的频谱成分通常是通信系统设计人员关注的一个重要问题。必须认真对待在正常操作过程中切换频率的系统，不仅要满足全面频率稳定之后的频谱模板要求，还要满足频率转换过程中的频谱模板要求。切换过程中PLL输出的频率成分可能与所有瞬变稳定后的频率成分有着明显差别。瞬变的频谱成分可能是干扰的重要来源。

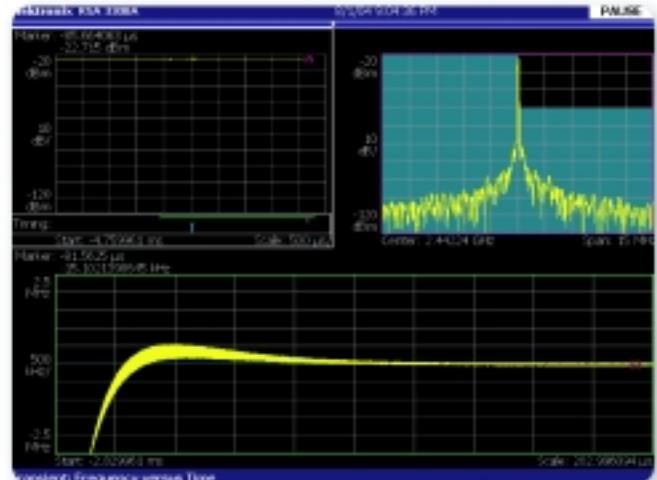


图19和图20比较了切换瞬变过程中PLL输出的频谱与稳定完成后的频谱。上面的曲线显示了瞬变接近稳定时(如标尺位置所示)PLL输出的频谱。在距载波3 MHz和6 MHz的偏置上，有大量的与参考信号相关的杂散信号。下面的曲线显示了进行足够稳定之后的频谱。注意，与参考信号有关的杂散信号消失了。另外在占用带宽和噪声电平及中心频率方面也可能存在明显差异。

使用泰克实时频谱分析仪检定锁相环

► 应用指南

总结

PLL已经成为各种通信系统不可或缺的组成部分。集成程度的提高使得模拟和分析变得至关重要，要求了解构成PLL的电路单元的线性行为和非线性行为。集成还带来了信号通路，要求在IC封装内部不能访问的地方测试这些信号通路。实时频谱分析技术为在时域、频域和调制域中检定、测量和查看PLL的行为特点提供了一种重要方式，为揭示以前隐藏的瞬时特点敞开了大门。

参考资料

1. D.B. Leeson, '反馈振荡器噪声频谱简化模型,' IEEE学报, Vol. 42 (1965年2月)。
2. Alan V. Oppenheim, 信号和系统(Prentice-Hall, 1983), 第243-247页。
3. William F. Egan, 通过相位锁定实现频率合成 (Wiley and Sons, 1998)。
4. Katsuhiko Ogata, 现代控制工程 (Prentice-Hall, 1996)。
5. '时间问题：当前的RF信号要求不同的频谱分析技术,' 泰克应用指南(2004)。

使用泰克实时频谱分析仪检定锁相环

► 应用指南

泰克科技(中国)有限公司
上海市浦东新区川桥路1227号
邮编：201206
电话：(86 21) 5031 2000
传真：(86 21) 5899 3156

泰克北京办事处
北京市海淀区花园路4号
通恒大厦1楼101室
邮编：100088
电话：(86 10) 6235 1210/1230
传真：(86 10) 6235 1236

泰克上海办事处
上海市静安区延安中路841号
东方海外大厦18楼1802-06室
邮编：200040
电话：(86 21) 6289 6908
传真：(86 21) 6289 7267

泰克广州办事处
广州市环市东路403号
广州国际电子大厦2807A室
邮编：510095
电话：(86 20) 8732 2008
传真：(86 20) 8732 2108

泰克深圳办事处
深圳市罗湖区深南东路5002号
信兴广场地王商业大厦G1-02室
邮编：518008
电话：(86 755) 8246 0909
传真：(86 755) 8246 1539

泰克成都办事处
成都市人民南路一段86号
城市之心23层D-F座
邮编：610016
电话：(86 28) 8620 3028
传真：(86 28) 8620 3038

泰克西安办事处
西安市东大街
西安凯悦(阿房宫)饭店322室
邮编：710001
电话：(86 29) 8723 1794
传真：(86 29) 8721 8549

泰克武汉办事处
武汉市武昌区民主路788号
白玫瑰大酒店924室
邮编：430071
电话：(86 27) 8781 2760/2831
传真：(86 27) 8730 5230

泰克香港办事处
香港铜锣湾希慎道33号
利园3501室
电话：(852) 2585 6688
传真：(852) 2598 6260



© 2004 年 Tektronix, Inc. 版权所有。全权所有。Tektronix 产品，不论已获得专利和正在申请专利者，均受美国和外国专利法的保护。本文提供的信息取代所有以前出版的资料。本公司保留变更技术规格和售价的权利。TEKTRONIX 和 TEK 是 Tektronix, Inc. 的注册商标。本文提及的所有其它商号分别为其各自所有公司的服务标志、商标或注册商标。11/04 KCJ/WOW 37C-18170-1