

锁相环相位噪声测试方案

在任何手机射频电路当中，都有一个很重要的组成部分，那就是频率合成器。频率合成器分直接频率合成(DDS)和间接频率合成(PLL)。手机中的频率合成一般都采用锁相环频率合成器。用它来构成接收一、二本振电路及发射本振电路。锁相环起的作用是确保手机压控振荡器的输出频率与基准参考频率始终保持一致。

是德科技 MXG 射频信号源采用了新的三阶锁相环路 (PLL) 设计和“频率规划”算法，可达到很高的频率和较折中的频率分辨率，显著提升了近端和远端的相位噪声性能。是德科技频谱分析仪，采用超外差式的分析方法，将 PLL 锁相环作为本振源；矢量网络分析仪也采用 PLL 的方案产生矢量网中激励信号；所以锁相环的测试至关重要。

一、锁相环原理简介

锁相环路(Phase Locked Loop)是一个闭环的相位控制系统，它的输出信号的相位能自动跟踪输入信号相位，它是一个相位的负反馈控制系统。这个负反馈控制系统是由鉴相器 (PD)、环路滤波器 (LF) 和电压控制振荡器 (VCO) 三个基本部件组成的，基本构成如图 1:

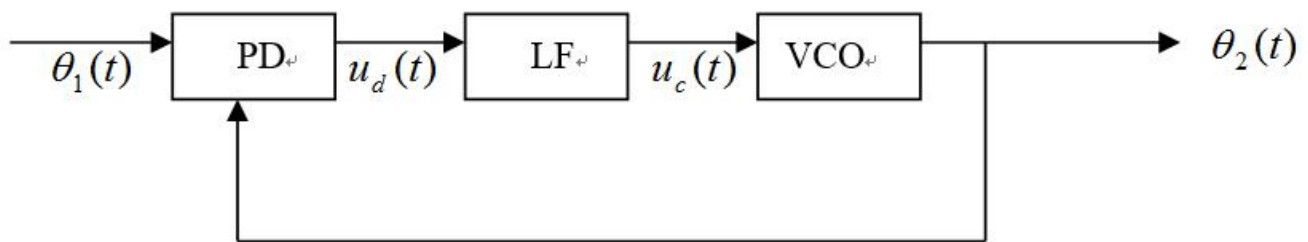


图 1 锁相环结构

实际应用中有各种形式的环路，但它们都是由这个基本环路演变而来的。下面逐个介绍基本部件在环路中的作用

鉴相器 (PD) 是一个相位比较装置，用来检测输入信号相位与反馈信号相位之间的相位差。输出的误差信号是相差的函数，即鉴相特性可以是多种多样的，有正弦形特性、三角形特性、锯齿形特性等等。常用的正弦鉴相器可用模拟相乘器与低通滤波器的串接作为模型。

环路滤波器 (LP) 具有低通特性，它可以起到图中低通滤波器的作用，更重要的是它对环路参数调整起差决定性的作用。

压控振荡器 (VCO) 是一个电压——频率变换装置，在环中作为被控振荡器，它的振荡频率应随输入控制电压 $u_c(t)$ 线性地变化。实际应用中的压控振荡器的控制特性只有有限的线性控制范围，超出这个范围之后控制灵敏度将会下降。

二、锁相环相位噪声指标测试

锁相环的主要指标有频率范围、频率准确度、功率（信号和谐波、压控条件）、相位噪声、杂散抑制、PLL 锁定时间(瞬态响应)、剩余相位噪声(Residual Phase Noise)、压控特性。本文重点介绍 PLL 相位噪声测试。

相位噪声测试有两大类方法：时域测量（主要测艾伦方差和 RMS 抖动）和频域测量。频域测量方法有频谱仪测量法、鉴相器测量法、PLL 测量法、互相换测量法、数字相位解调发、延迟线法等。

北京东方中科集成科技股份有限公司

地址：北京市海淀区阜成路 67 号银都大厦 12、14、15 层

电话：010-68715566

传真：010-68728001

邮编：100142

服务咨询热线：400-650-5566

网址：<http://www.jicheng.net.cn>

1、时域测量

相位噪声在时域的表现是抖动(Jitter)。抖动是指随时间变化的信号对其当时理想位置的偏离，往往又被称作时间间隔误差(TIE)。Jitter 表征数字时钟或数字传输信号的短期时域波动，是信号周期、相位、占空比等时域参数稳定性的体现，与频域的相位噪声参数等效。工程师常常把抖动看成是信号边沿相对于参考边沿(触发点)的“跳动”(见图 2)。在此例中，示波器触发在时钟的某个边沿上，我们观察该边沿后面的边沿，多次采集得到其抖动分布。这时体现示波器捕获和显示信号动能力的，有一个关键指标，就是波形捕获率，好的示波器可快速积累足够的波形得出抖动的极端情况。

图 2 分析的是 50%幅度附近很窄的区域内的波形，以直方图形式给出其抖动分布。该水平直方图显示的是抖动的概率分布(PDF)，它和波形是时间相关的。在本例中，我们可以看到抖动呈双峰分布。波形直方图测量是最简单的抖动测量方法，也是当前大部分高性能示波器(包括 Keysight InfiniiVision 6000X 系列和 Infiniium 系列示波器)都提供的关键测量功能。捕获和查看重复时钟信号的抖动较为直接，串行数据信号的抖动观察则略显复杂，特别是在没有时钟信号可用作触发的情况下。目前大部分高速串行总线都采用嵌入式时钟，嵌入式时钟必须由接收端进行时钟恢复之后才能查看。对含有嵌入式时钟的串行总线数据信号执行抖动分析，要求示波器必须能够从数据信号中恢复时钟。抖动分析选件中的软件算法可以完成这一任务。其方法是创建一个虚拟时钟，以仿真串行数据总线接收端的时钟恢复。工程师以此恢复时钟为参考，对采集到示波器存储器中的串行数据进行逐个边沿对齐，完成 TIE 测量。

用 Keysight InfiniiVision 6000X 示波器虽然我们能够确定测得的抖动包含多种抖动分量(随机抖动和确定性抖动)，见图 2，但使用 Keysight InfiniiVision 6000X 系列示波器(MSOX6004A)无法分离各种抖动分量。要想分离，并根据设定的误码率推衍总体抖动，需要配备了 N5400B EZJIT+ 选件的 Keysight Infiniium 系列示波器(高清晰度 10 位分辨率 MSOS204A 示波器配合 N5400B-1TP EZJIT+ 抖动分析软件)，他们支持更高级的抖动分析功能。图 3 为 Keysight Infiniium S 示波器进行抖动分离的例子。使用尾部拟合(TailFit)算法，配备 EZJIT+ 选件的 Infiniium 示波器能够首先把确定性抖动从随机抖动、周期抖动中分离出来，然后再基于包含随机抖动和周期抖动的直方图，从其尾部将随机抖动分离出来。接着，它可以根据设定的误码率，由浴盆曲线推断出总体抖动。



图 2 基本抖动分析；通过波形直方图查看重复时钟抖动。直方图（蓝色）显示时钟抖动（黄色）呈双峰分布



图 3 使用配备 EZJIT+ 选件的 Infiniium S 系列 10 位示波器执行抖动分离和推算总体抖动

2、频域测量

相位噪声通常定义为在某一给定偏移频率处的 dBc/Hz 值，其中，dBc 是以 dB 为单位的该频率处功率与总功率的比值。一个振荡器在某一偏移频率处的相位噪声定义为在该频率处 1Hz 带宽内的信号功率与信号的总功率比值。根据该定义，直接用 N9000B 信号分析仪测量信号的频谱（见图 4），用 Marker Function 来读出偏离载波一定偏移频率处的噪声功率，进而计算出相位噪声。



图 4 直接频谱分析法(Marker Function)

(1) 频谱仪测量法的原理如下:

- a) 测量载波功率 P_0
- b) 测量某一频偏 f_m 处的噪声功率
- c) 结果: $L(f_m) = P_0 - (P_{noise, f_m} - 10 \cdot \log(\frac{B_{noise}}{Hz}) + D_{corr})$

P_0 : 载波功率

$P_{noise, fm}$: 频偏 f_m 处的噪声功率

B_{noise} : 分辨率滤波器噪声带宽

D_{corr} : RMS-检波器 ($VBW > 3 \cdot RBW$, 无平均): $D_{corr} = 0 \text{ dB}$
 取样检波器 ($VBW < RBW$): $D_{corr} = 2.5 \text{ dB}$

(2) 频谱分析仪法的优点

- a) 测试设置简单、快捷
- b) 频率偏移范围大 (高达 1 GHz)
- c) 可以测试很多信号源的特性
- d) 杂散发射
- e) 邻信道功率泄漏
- f) 高次谐波
- g) 直接显示相位噪声 (当调幅噪声忽略不计时)

(3) 频谱仪模式的不足和局限性

- a) 无法区分调幅噪声和相位噪声;
- b) 灵敏度受仪器固有的相位噪声限制 (图 5);
- c) 无载波抑制;
- d) 由于测量过程中载波存在, 因此在近频偏处, 测量范围受分辨率带宽和滤波器选择性限制 (图 6);
- e) 动态范围有限;

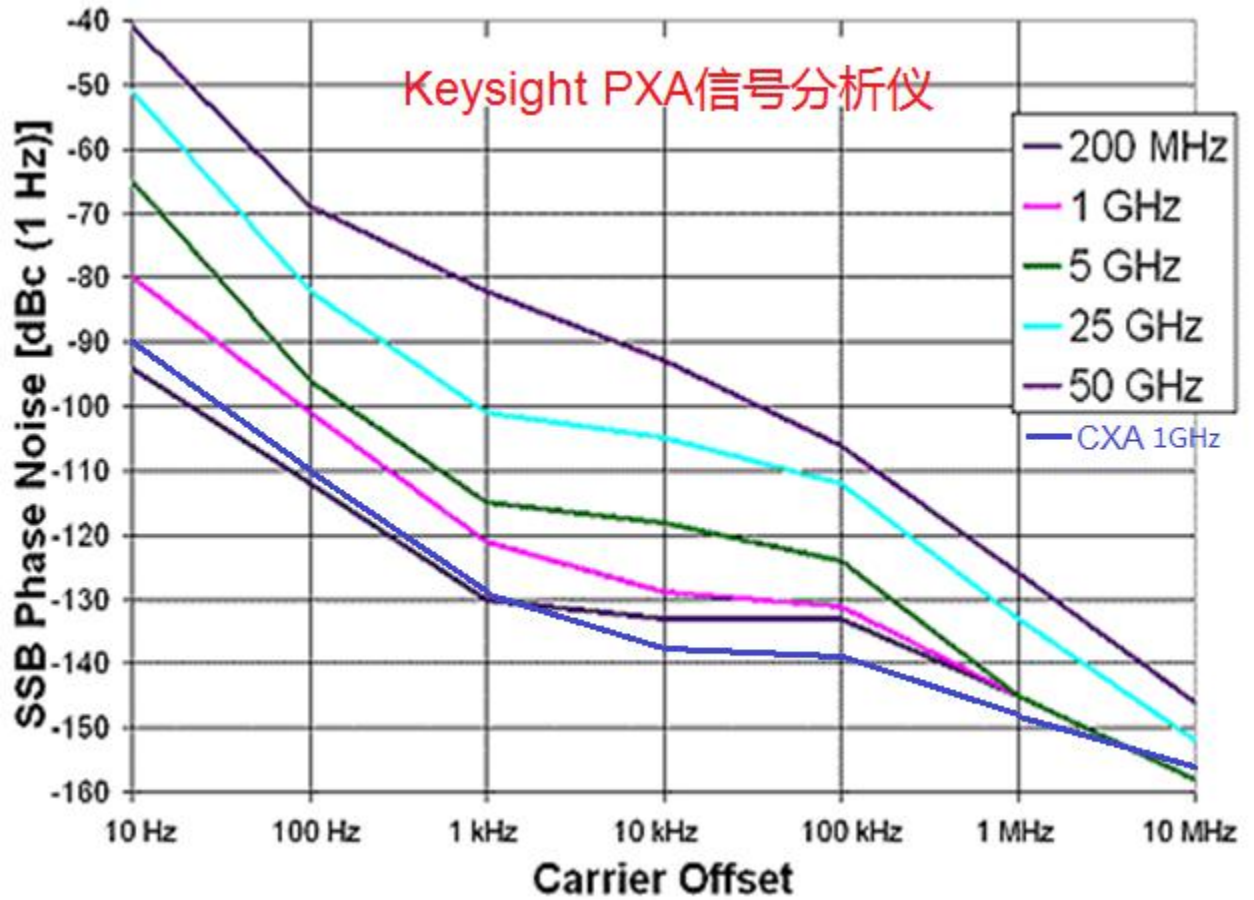


图 5 频谱仪相位噪声特性限制测量范围

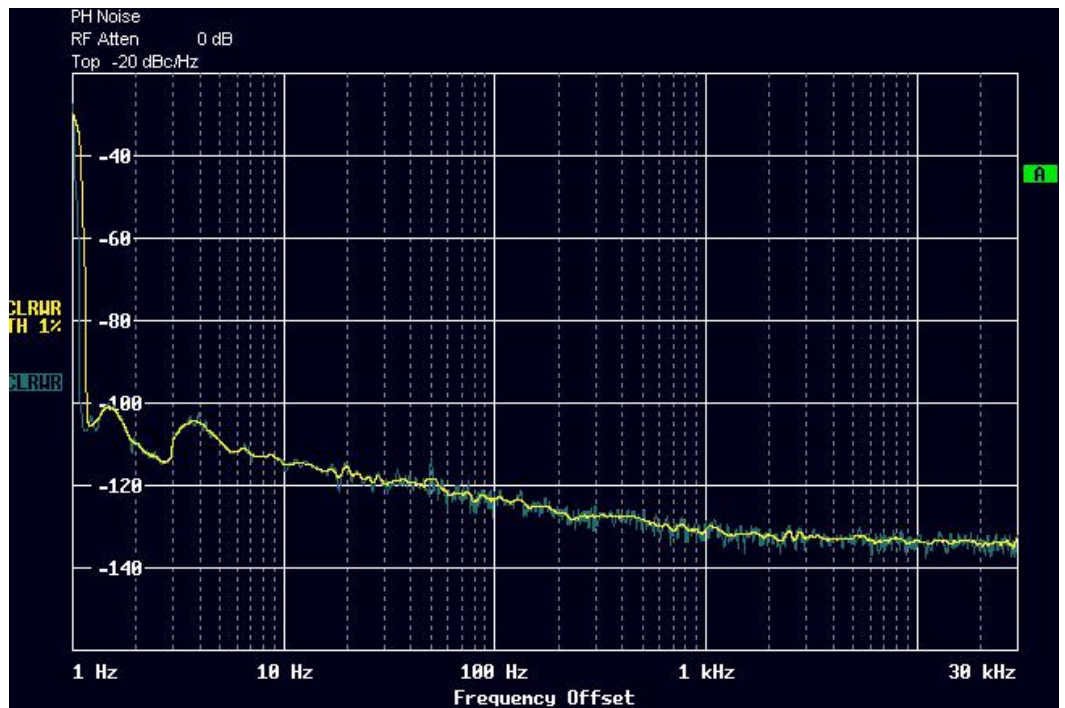


图 6 近载频载波泄露

(4) 频谱仪测量相位噪声的误差源

- a) 当测量结果和频谱分析仪的固有指标可以相比拟时,校正频谱分析仪相位噪声带来的影响(图7)。

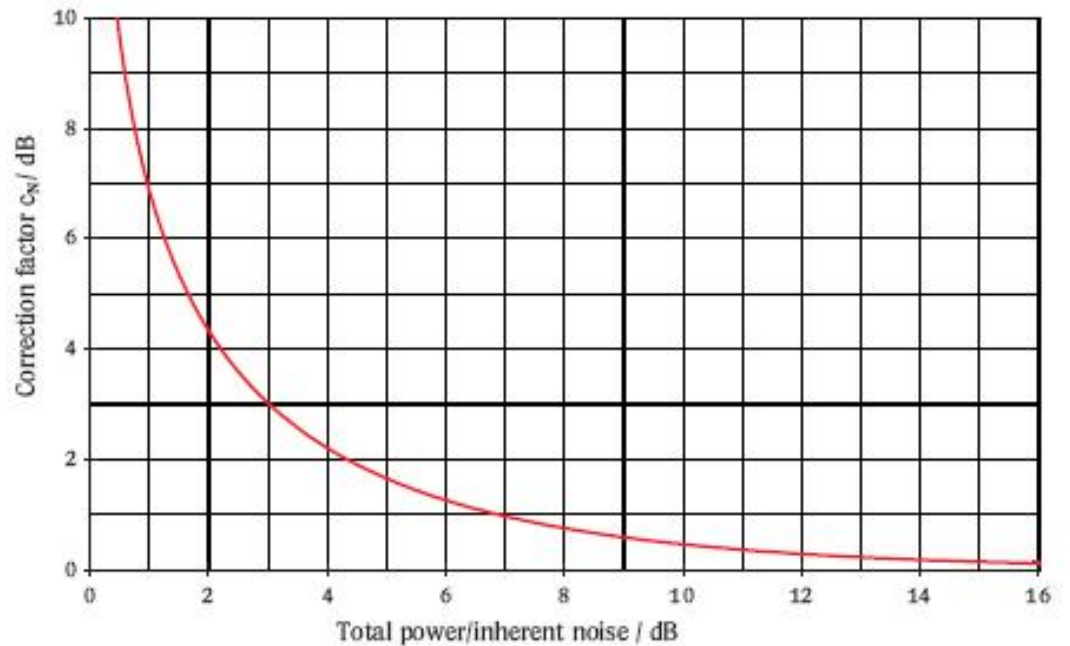


图 7 当测量结果和频谱分析仪的固有指标可以相比拟时,校正频谱分析仪相位噪声带来的影响

- b) 频谱分析仪的线性误差
 c) 参考电平设置的不确定度(如果测量过程中参考电平有调整)
 d) 衰减器切换不确定度(如果测量过程中衰减器有调整)
 e) 频率响应误差(频率偏移大于 100 kHz)
 f) 带宽的不确定性(因为计算单位为 dBc/Hz)
 g) 测量过程中的频率漂移
- (5) 是德科技 N9000B 信号分析仪与 N9068C 相位噪声测试软件配合,实现直接频谱测量法进行 PLL 相位噪声的测试,见图 8。

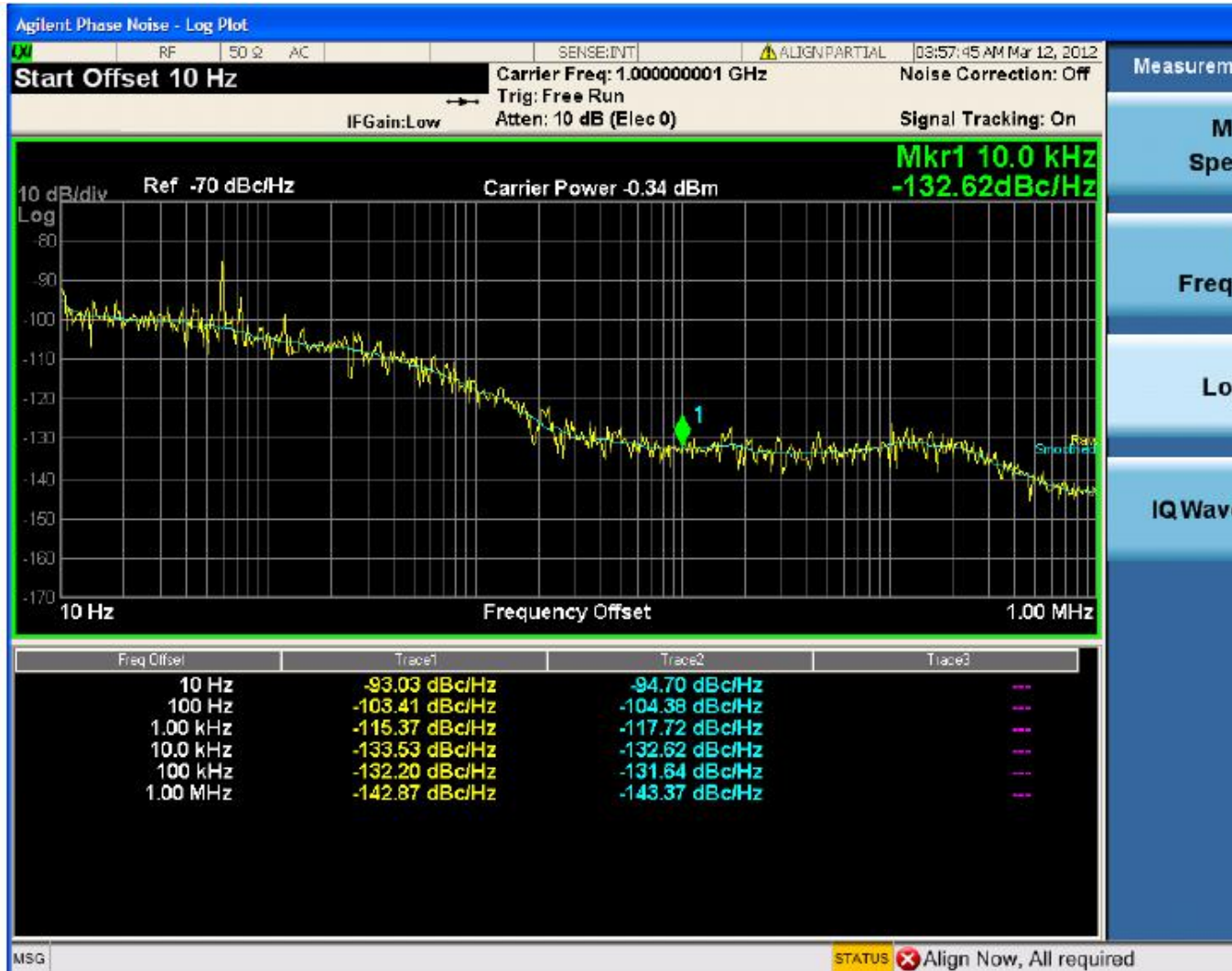


图 8 是德科技 N9000B 信号分析仪与 N9068C 软件进行直接频谱测量法测得 PLL 相位噪声