



相位、相位噪声与抖动：从原理到测量

一、相位与相位噪声

相位 (Phase): 交流信号表达式 $A \cdot \sin(2\pi f t + \varphi)$ 中的 φ 为相位，描述的是“波形在时间轴上的位置”，它是一个瞬时量，单位是弧度 (rad)。

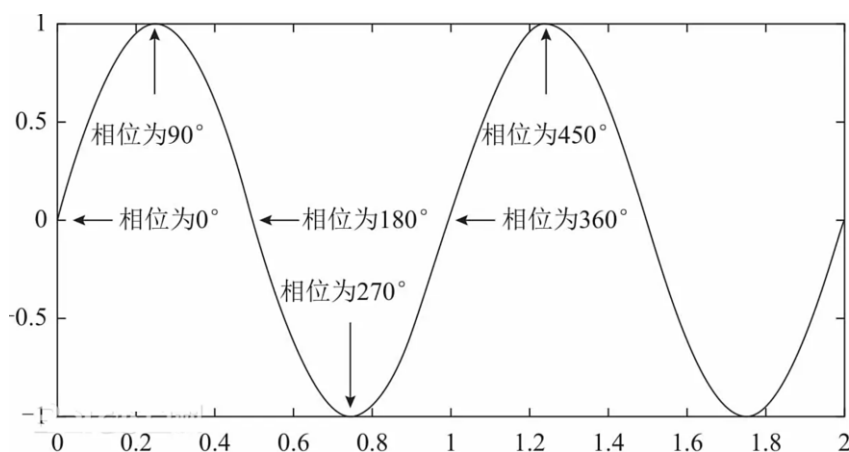


图1 正弦信号的相位

在实际系统中，由于噪声的影响，信号的相位会发生随机变化，导致波形出现畸变。这种相位的随机变化在时域称之为“抖动”在频域称之为“相位噪声”，它会使信号的频谱展宽，影响信号的传输和处理，一句话区分相位与相位噪声：相位是“静态位置”，相位噪声是“位置的随机晃动”。

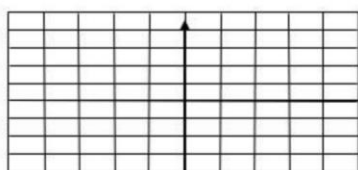
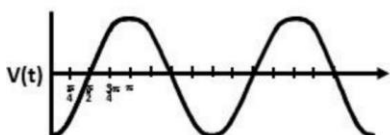
理想的信号

$$V(t) = A_0 \sin 2\pi f_0 t$$

Where

A_0 = 幅度

f_0 = 频率



真实世界的信号

$$V(t) = [A_0 + E(t)] \sin [2\pi f_0 t + \phi(t)]$$

Where

$E(t)$ = 随机幅度起伏

$\phi(t)$ = 随机相位起伏

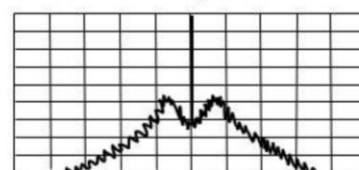
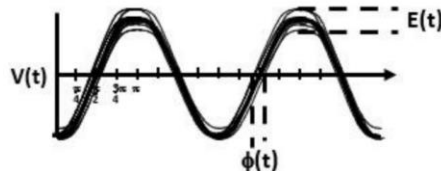


图2 理想与真实世界的信号在频域与时域表现形式



相位噪声 (Phase Noise): 描述的是 ϕ 随时间发生“快速、短期、随机”的微小抖动, 在频域表现为载波频谱的连续噪声边带。在量化相位噪声的众多技术指标中, 最常用的测量指标是“单边带(SSB) 相位噪声”。

从数学角度来讲, 美国国家标准与技术研究院(NIST)将其定义为“偏离载波频率处单位带宽内的单边带信号功率与载波信号总功率的比值”, 由此我们可以总结出单边带相位噪声的三要素: 频偏、单位 HZ 以及相对于载波。

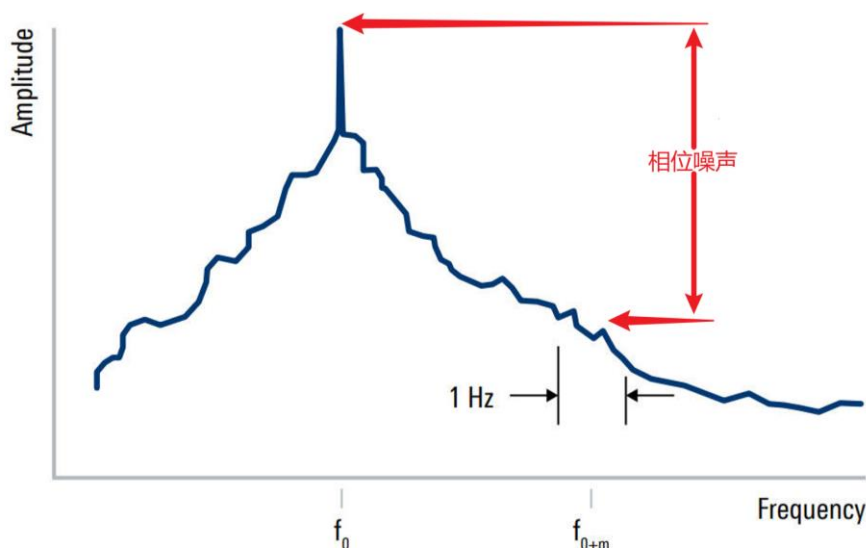


图 3 相位噪声

SSB phase noise	carrier offset = 20 kHz, measurement bandwidth = 1 Hz, CW, level = 10 dBm	
f = 100 MHz	< -142 dBc	-150 dBc (typ.)
f = 1 GHz	< -126 dBc	-132 dBc (typ.)
f = 2 GHz	< -120 dBc	-126 dBc (typ.)
f = 3 GHz	< -116 dBc	-123 dBc (typ.)
f = 4 GHz	< -114 dBc	-120 dBc (typ.)
f = 6 GHz	< -110 dBc	-117 dBc (typ.)
f = 10 GHz	< -106 dBc	< -112 dBc (meas.)
f = 20 GHz	< -100 dBc	< -106 dBc (meas.)
f = 40 GHz	< -94 dBc	< -100 dBc (meas.)

图 4 SMB100B 射频信号源不同中心频率下, 偏离载波 20kHz 的相位噪声

二、相位噪声与抖动: 时频域的双生子

上文我们提到过, 相位噪声与抖动是同一物理现象在不同维度上的表现形式, 本质均源于信号源的噪声特性。

相位噪声是从频域角度出发, 描述信号相位在频率上的随机波动特性, 具体表现为信号频谱在载波频率附近的能量扩散, 这种扩散会导致频谱纯度下降, 常见于振荡器、锁相环等射频与微波系统中。



抖动（Jitter）是从时域出发，定义为“信号的各个有效瞬时对其当时的理想位置的短期性偏离”，比如数字电路中信号的上升沿或下降沿在时间轴上的不稳定跳动，见下图 5。

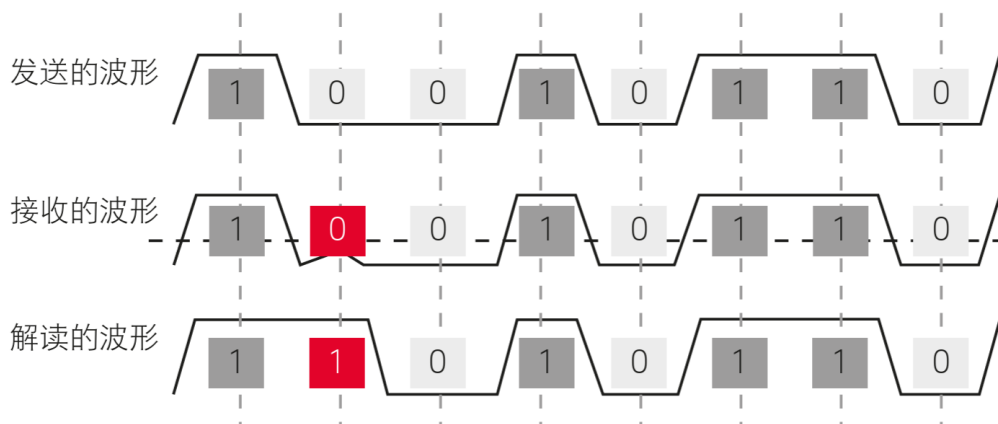


图 5 抖动会导致接收机错误地解读被传输的数字数据

抖动源通常分为两类：“有界”和“无界”

有界抖动源会在可识别的时间间隔内达到最大和最小的相位偏差值。这类抖动也叫“确定性抖动（DJ）”；它们是由系统和与数据相关的（系统：辐射信号或传导信号之间的串扰、散射效应、阻抗失配，数据：码间干扰、占空比失真、伪随机、比特序列周期性）抖动源而引发的。

无界抖动源在任何时间间隔内都不会出现最大或最小的相位偏差，而且至少理论上，它们的抖动幅度会趋于无穷大。这类抖动也会被归类为“随机抖动（RJ）”。它们会因为随机噪声源（热噪声、散粒噪声、粉红噪声）而引发。

三、测试设备选择

1. 主流测试设备

序号	测试参数	主流测试设备	特点	推荐型号
1	相位	示波器	最高可到 8 路信号相位测试	RTB2000 系列 RTM3000 系列 MXO4 系列 MXO5 系列
		双通道频率计	双路信号测试（频率 $\leq 200\text{MHz}$ ）	数英 SS7406 系列
		矢量网络分析仪	多通道高频相位测试	ZNLE 系列
		锁相放大器	微小信号相位测试	苏黎世 MFLI-CN 系列
2	相位噪声	频谱分析仪	一般相噪需求分析	FPL 系列
		相位噪声分析仪	超低相噪需求分析	FSWP 系列 FSPN 系列



序号	测试参数	主流测试设备	特点	推荐型号
3	抖动	示波器	时域眼图、浴盆曲线、直方图分析	RTO6 系列 PICO 9000 系列
		相位噪声分析仪	频域抖动分析，发现抖动随频率发生的偏移变化	FSPW 系列 FSPN 系列

2. 时域、频域抖动分析比较

测试信号：载波为 1 GHz，调制频率为 1 MHz 的调频信号，且伴有 0 Hz 至 4 MHz 的加性噪声，测试设备分别使用 FSWP 相位噪声分析仪与 RTO6 示波器。

设备	FSWP	RTO6
灵敏度	≤ 5 fs	600 fs（抖动噪声基底）
检测动态信号	-	使用跟踪功能检测
可测量的最大输入频率	最高 56 GHz（单机）	最高 6 GHz
混叠	无	是
近端测量	0.01 Hz	受最大记录长度的限制

在图 6 顶部，RTO6 测量波形显示为轨迹函数（TIE 伴随时间的变化趋势）。中间的图显示的是轨迹函数的 FFT。这个 FFT 显示为 PJ 的抖动频谱，代表的含义是信号的总体抖动 (TJ)，单位为 dBps。底部显示测量到的 TIE 的柱状图。

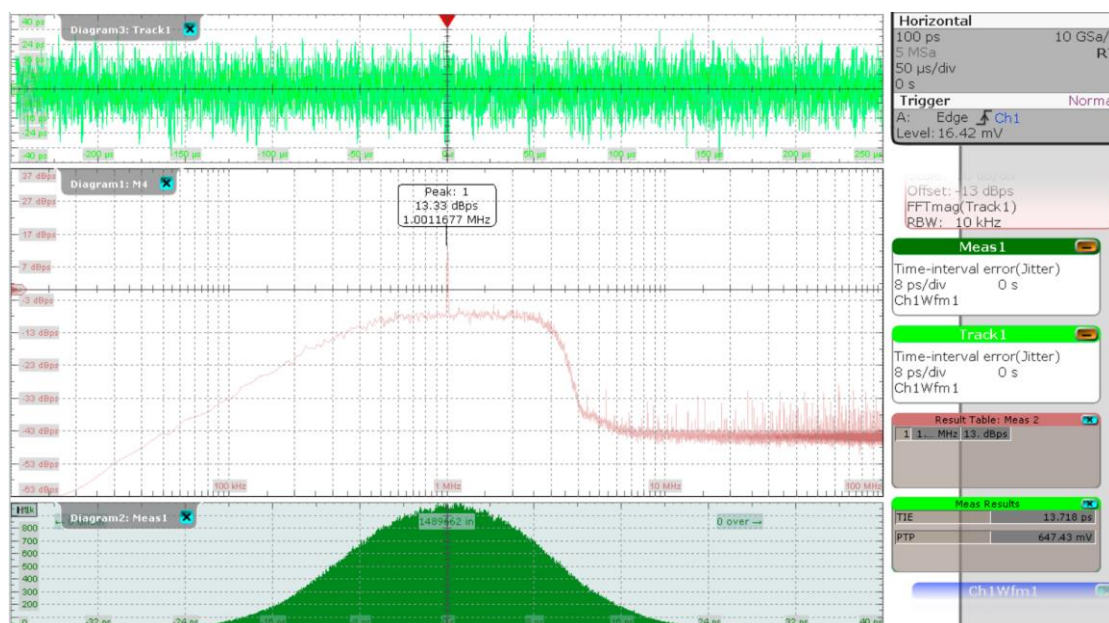


图 6 RTO6 示波器测试抖动

图 7 是以 dBc/Hz 为单位显示的 FSWP 的测量结果。FSWP 还计算每个杂散的 PJ、总 PJ 和相位噪声谱的 RJ（单位为 ps）。

为了比较结果，将两个测量结果的单位都转换为 ps。此外，RTO6 的随机抖动和 FSWP 的总体抖动使用以下公式进行计算：



$$TJ^2 = RJ^2 + PJ^2$$

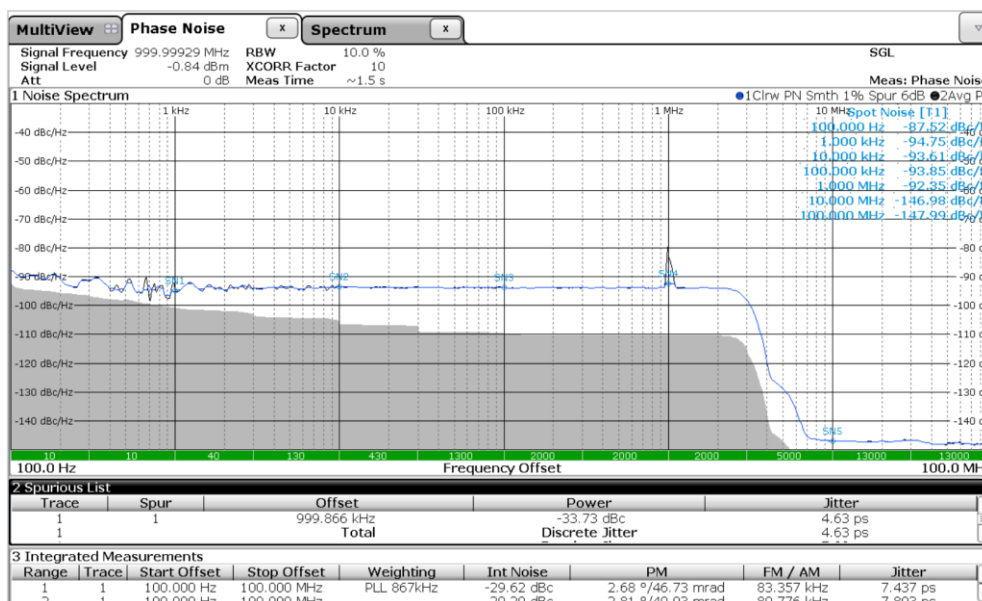


图7 FSWP 相位噪声分析仪测试抖动

下表显示了各个测量结果和差异，RTO6 和 FSWP 结果几乎完全相同。它们测量到的 PJ 的频率相同，并且测量值的差异小于 0.5 ps。检测到的 RJ 和 TJ 值的差异小于 0.5 ps。这种良好的一致性证明了这两种仪器具有可比性。

测量结果				
参数	频率	RTO6	FSWP	差值
周期性抖动	1.0 MHz	4.64 ps	4.63 ps	0.01 ps
随机抖动 (平均值)		7.34 ps	7.44 ps	0.10 ps
总体抖动 (平均值)		8.68 ps	8.76 ps	0.08 ps