

示波器原理

汇报人：王正禹

地点：会议室

日期：2026年2月

目 录

Part 1. 示波器概述

Part 2. 示波器对信号的测量及分析



Part 1

示波器概述

前端调理电路（带宽）

ADC转换电路（采样）

触发电路（触发）

存储电路（存储深度）



Part I. 示波器概述

示波器是用于观察电信号电压随时间变化关系的仪器，是时域测量仪器。

示波器作用：

用来观察和分析电信号的各种特性，包括：

- 频率
- 幅度
- 相位
- 波形

测试时间参数：

- 频率
- 周期
- 占空比
- 上升时间
- 下降时间

电压参数：

幅度，最大电压，最小电压，平均电压。



Ruggedized 1 mm Male Bulkhead Connector with AutoProbe III Interface



Standard 1.85 mm Male Bulkhead Connector with AutoProbe III Interface



Ruggedized 3.5 mm Male Bulkhead Connector with AutoProbe II Interface

Adapter Type	Part Number
1 mm F Ruggedized to 1 mm F	Y1900B
1 mm F Ruggedized to 1 mm M	Y1900C
1 mm F Ruggedized to 1.85 mm F	Y1901B
1 mm F Ruggedized to 2.92 mm F	Y1903B
1.85 mm F to F Adapter Assembly	N5520B
2.4 mm M to 2.92 M	11904A
2.4 mm F to 2.92 mm F	11904B
2.4 mm M to 2.92 F	11904C
2.4 mm F to 2.92 mm M	11904D
3.5 mm F to 3.5 mm F	5061-5311



Y1900B



Y1903B



Y1901B



11904D



11904B

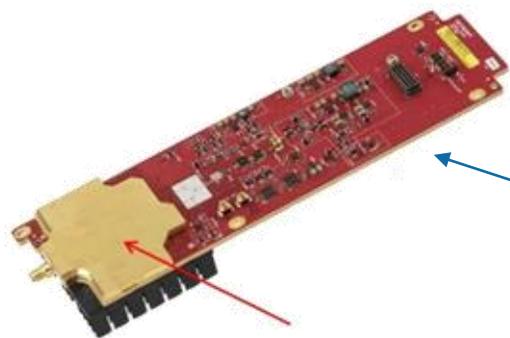


3.5 mm F to 3.5 mm F

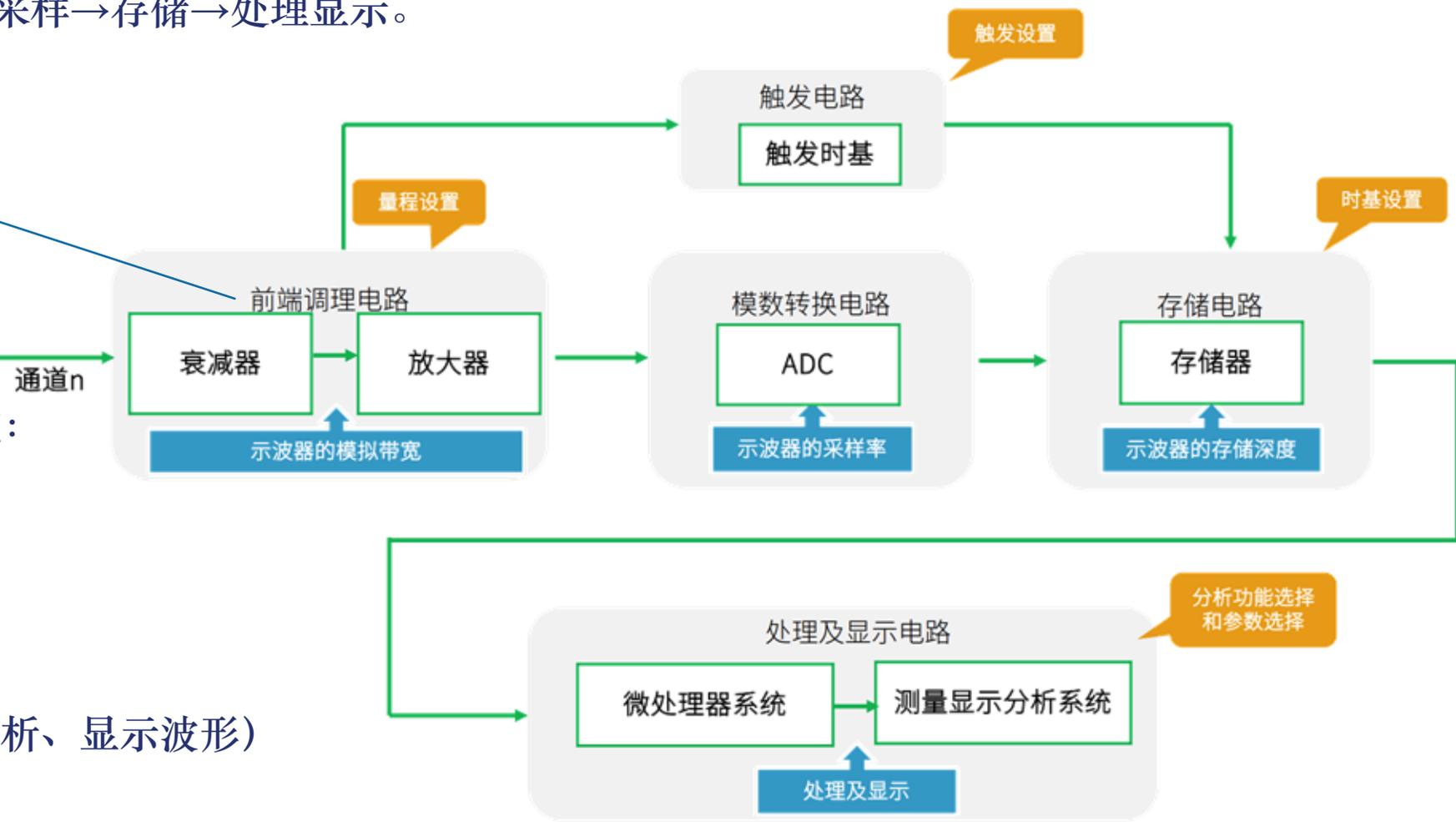
Part I. 示波器概述

数字示波器的基本结构

数字示波器是由模拟电路与数字电路所组成的一个复杂链路，信号从输入→调理→触发控制采样→存储→处理显示。



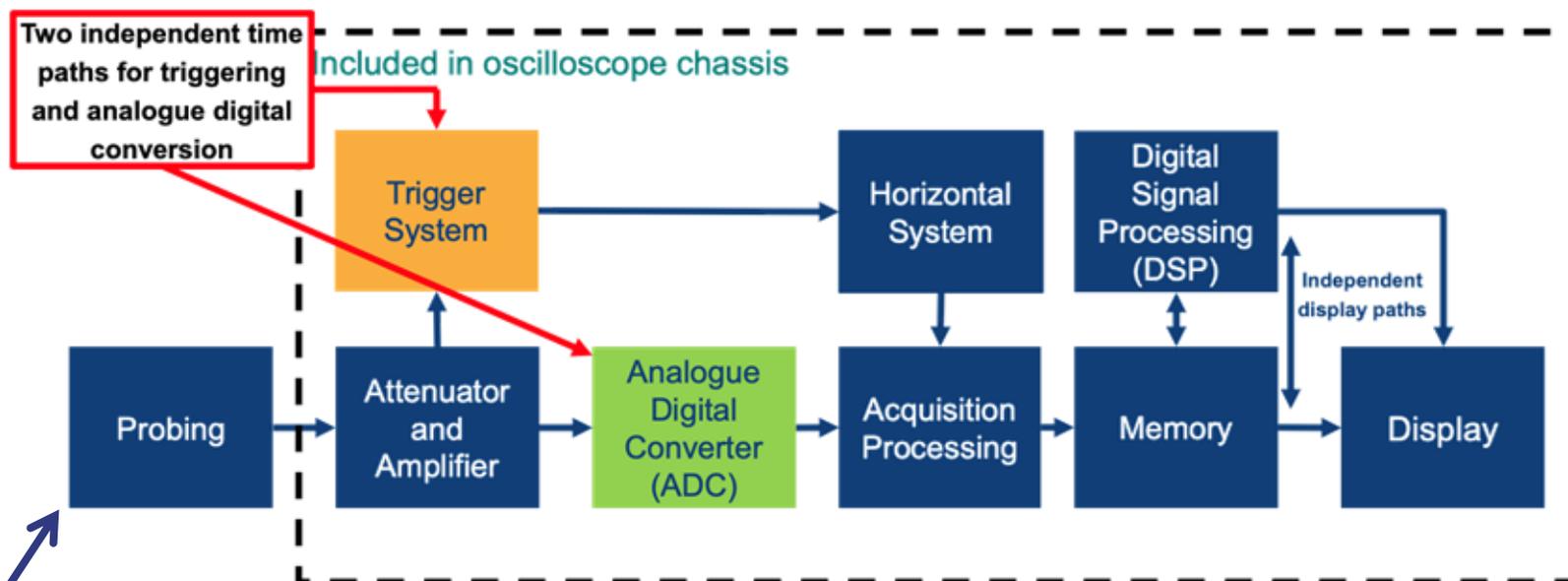
Faraday Cage Technology



数字示波器主要由五大部分组成：

1. 前端调理（衰减+放大）
2. 触发系统（稳定捕捉波形）
3. ADC（模数转换）
4. 存储器（保存采样数据）
5. 微处理器+显示（处理、分析、显示波形）

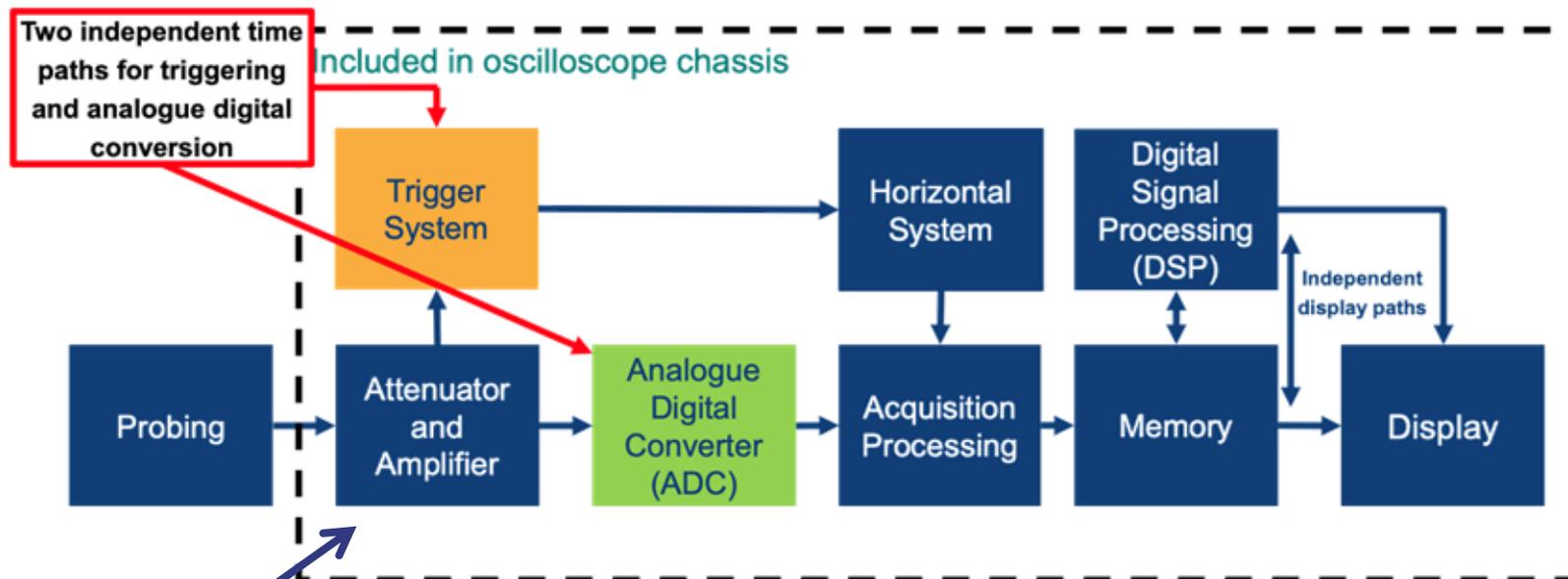
示波器结构图



Probing (探头)

这是示波器的输入部分，用于连接到被测电路，采集原始电信号。探头负责将信号引入示波器并可能进行初步调整。

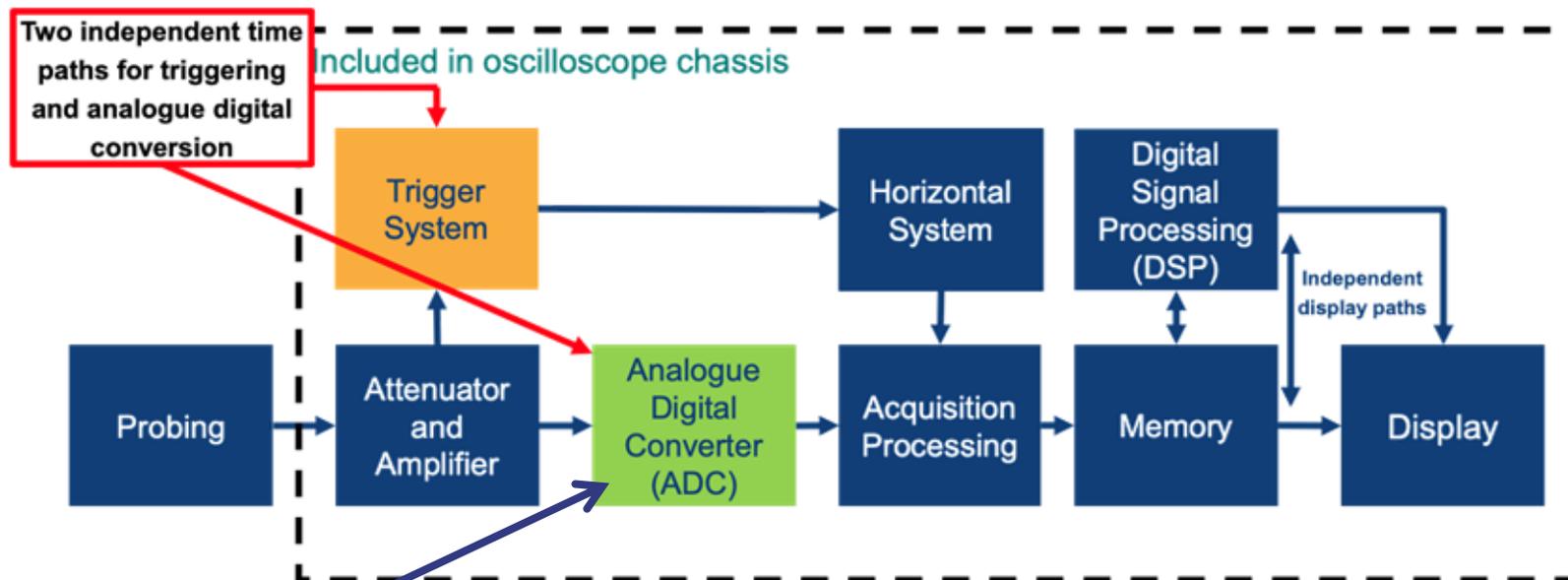
示波器结构图



Attenuator and Amplifier (衰减器和放大器)

衰减器和放大器对输入信号进行调节。如果信号幅度过大，衰减器会降低其强度；如果信号太弱，放大器会提升其幅度，以适应后续处理的范围。

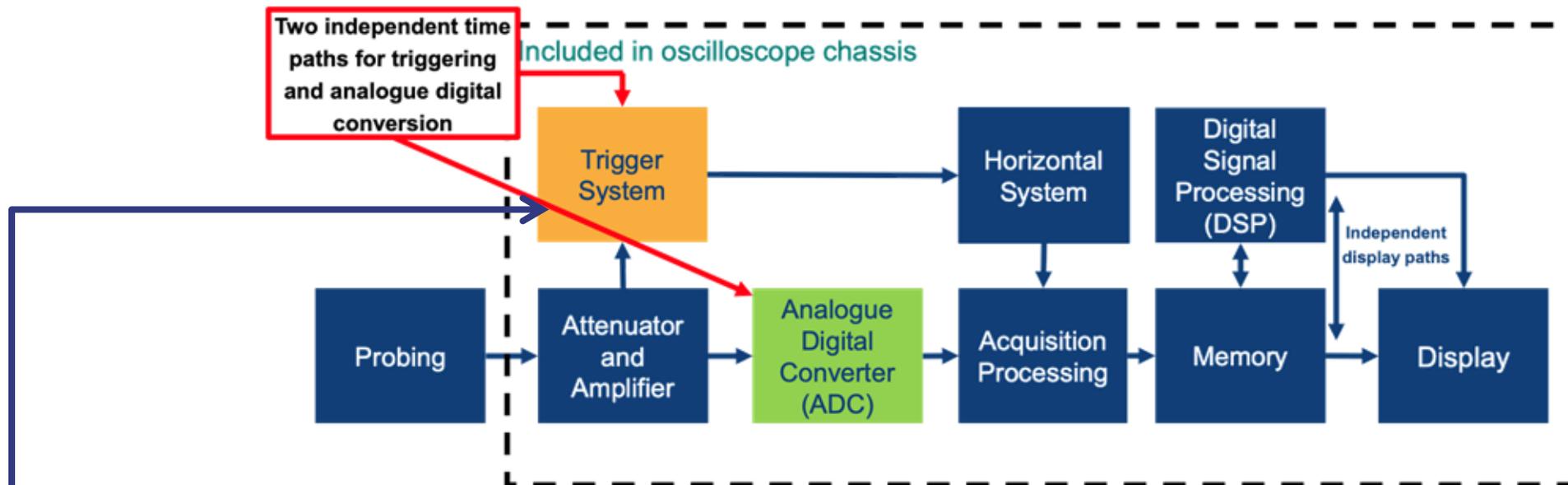
示波器结构图



Analogue Digital Converter (ADC) (模数转换器)

ADC将模拟信号转换为数字信号。这是示波器中从模拟域到数字域的关键步骤，决定了信号的采样精度和分辨率。

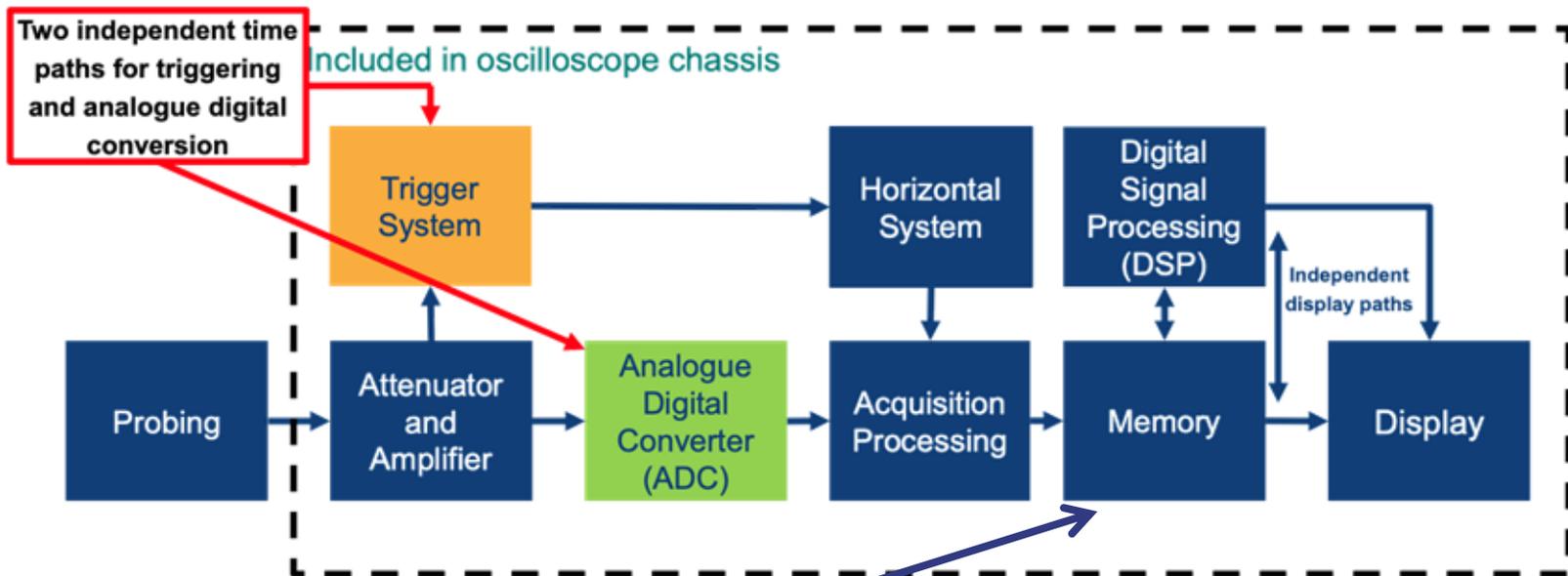
示波器结构图



Trigger System (触发系统)

触发系统用于确定信号捕获的起始点，确保波形在稳定的时间点上显示。触发器根据预设条件（如电压水平或边沿）启动数据采集。

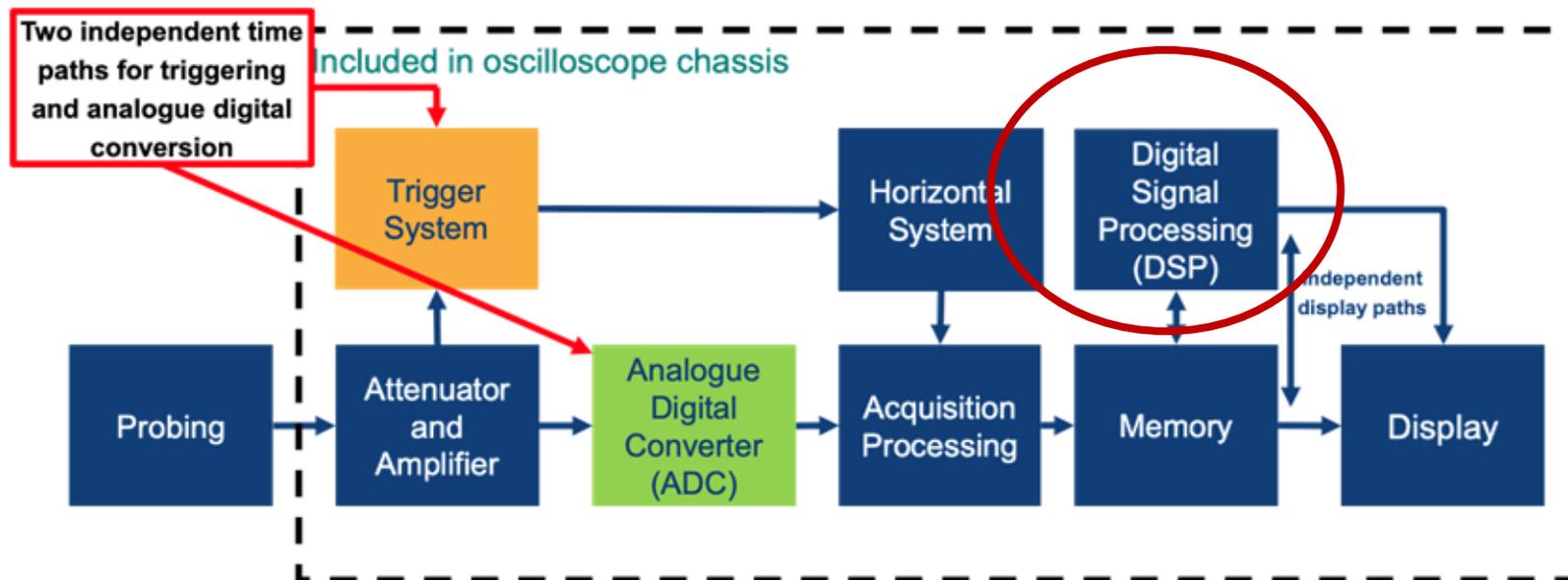
示波器结构图



Memory (存储器)

存储器用于保存ADC转换后的数字信号数据。这些数据随后可用于进一步处理或显示。

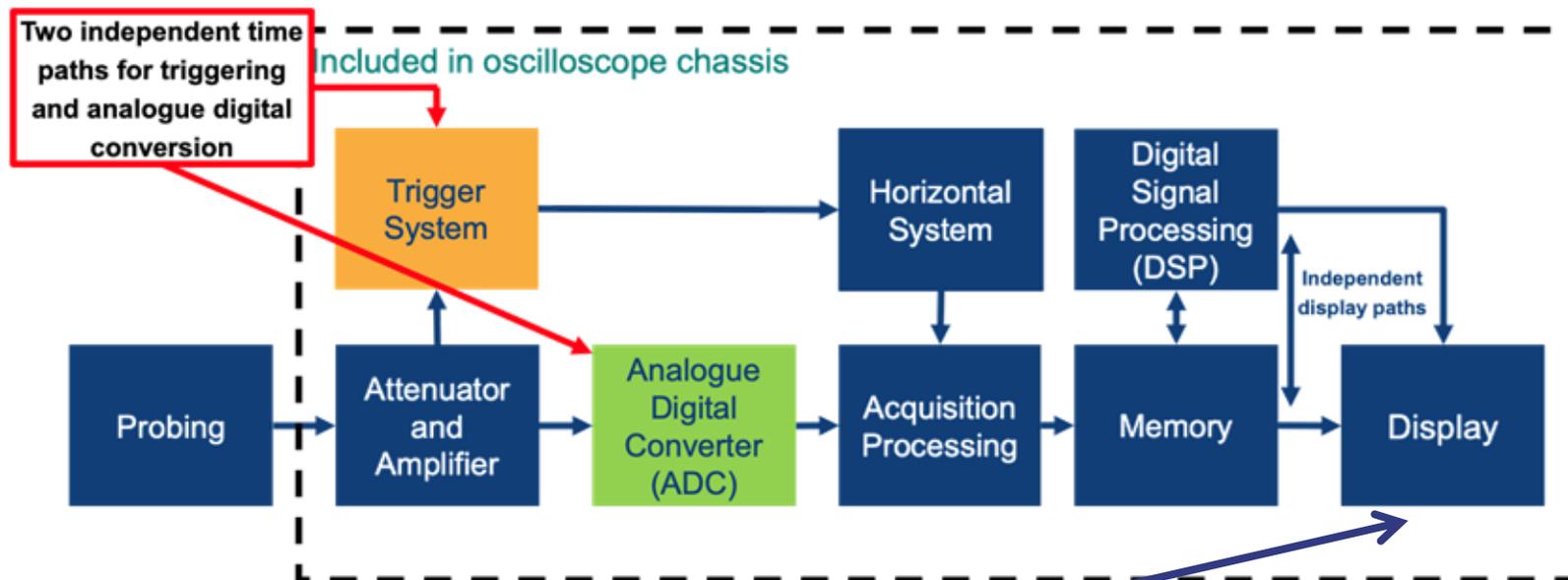
示波器结构图



Digital Signal Processing (DSP) (数字信号处理)

DSP对存储的数字信号进行处理，例如滤波、数学运算或数据压缩，以增强信号质量或提取特定特征。DSP处理的结果可以独立于显示路径。

示波器结构图



Display (显示器)

显示器将处理后的数据以波形或图表的形式呈现给用户。DSP和Memory的输出都会传送到显示器，分别提供原始波形和处理后的结果。

Part I. 示波器概述

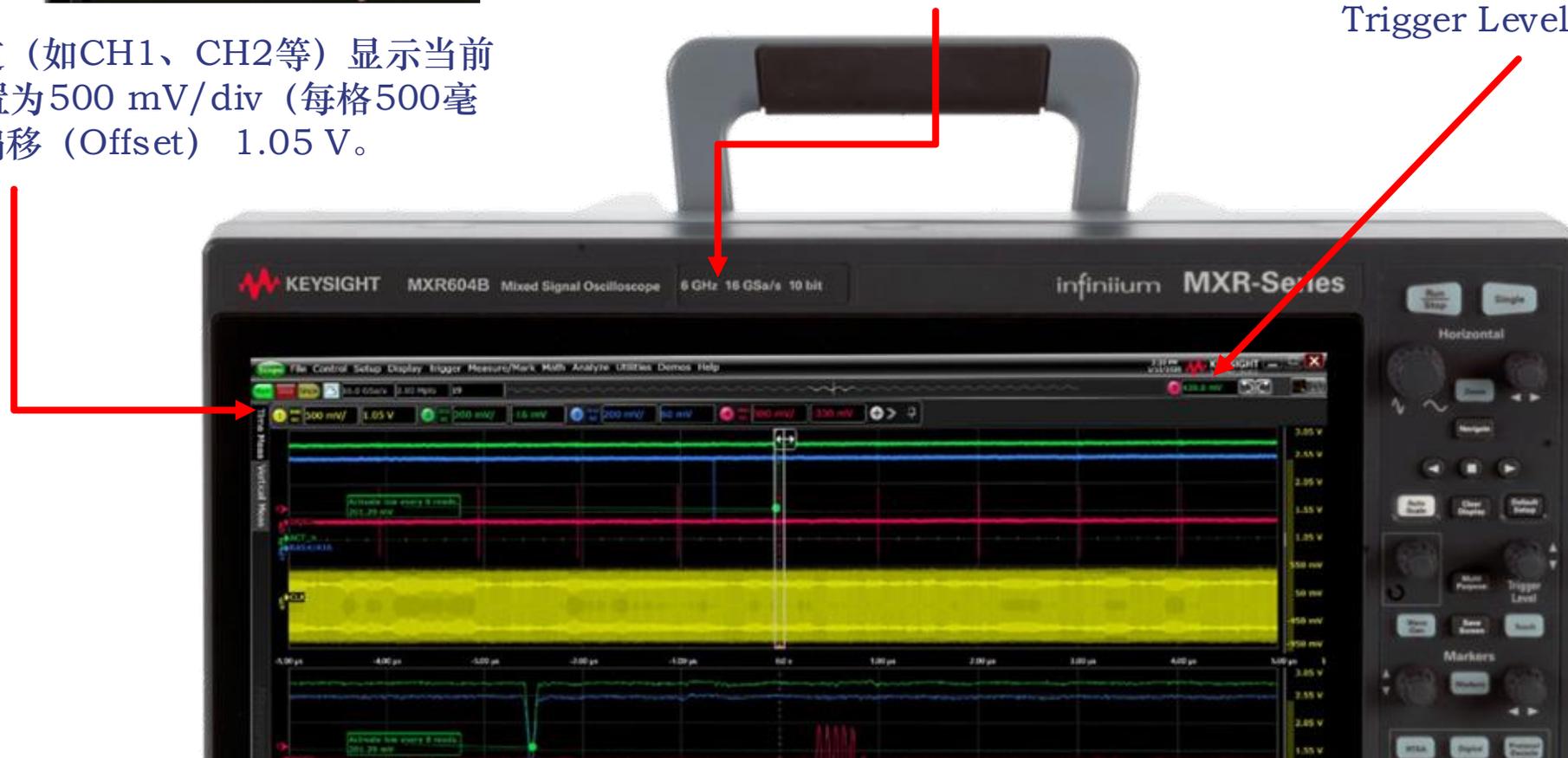


6 GHz 16 GSa/s 10 bit

表示示波器的带宽为6 GHz，采样率为16 GSa/s（16 giga-samples per second），分辨率为10位。这反映了示波器处理高频信号的能力和数据采集的精度。

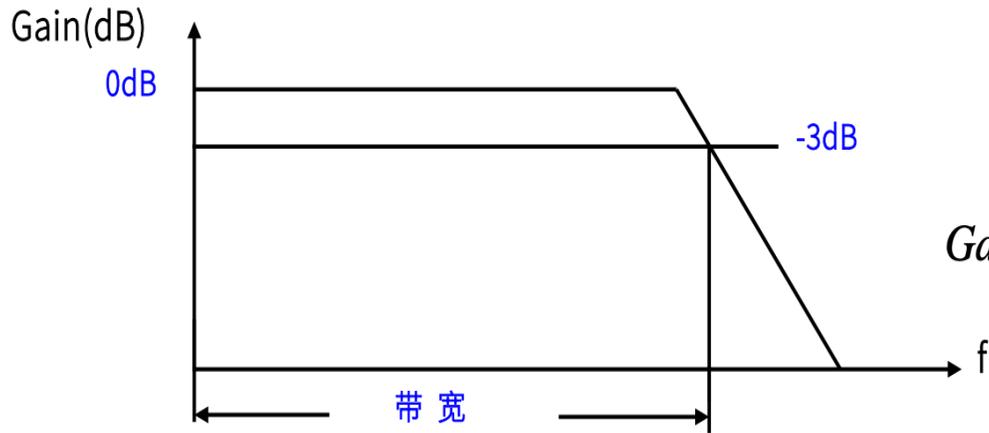
每个通道（如CH1、CH2等）显示当前CH1设置为500 mV/div（每格500毫伏），偏移（Offset）1.05 V。

Trigger Level，触发电平



Part I. 示波器概述

数字示波器带宽的定义



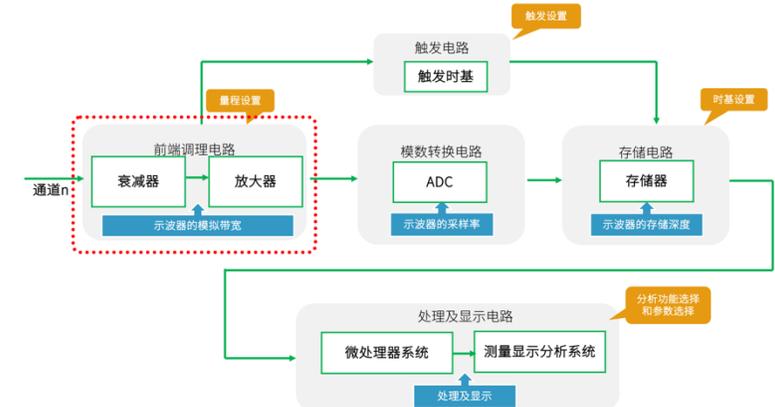
$$Gain(dB) = 20 \log \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

对于幅度，分贝的定义是： $dB = 20 \log_{10} \left(\frac{V_1}{V_2} \right)$

对于功率，分贝的定义是： $dB = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$

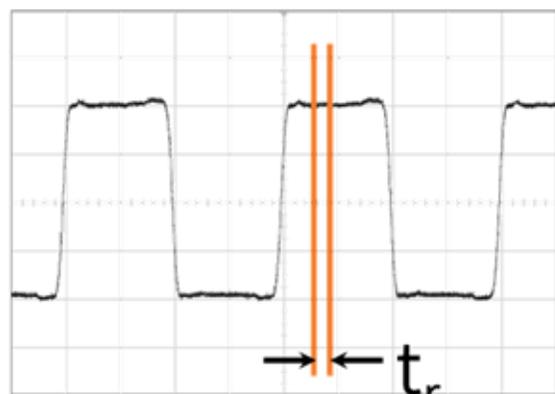
示波器（或放大器）的频率响应曲线（增益-频率特性），对数坐标（dB）表示垂直增益，随频率f变化。

- 横轴：频率 f（从低到高）
- 纵轴：增益 $Gain(dB) = 20 \log_{10} (V_{out} / V_{in})$
- 0 dB = 增益=1（输出电压=输入电压，无衰减）
- -3 dB = 增益 ≈ 0.707 （输出电压 \approx 输入电压的70.7%，幅度衰减约30%）



Part I. 示波器概述

示波器的**带宽**对数字信号测试的影响



被测信号

现象

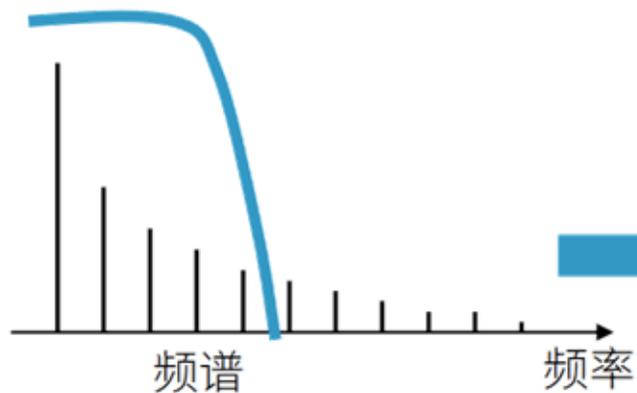
使上升时间变缓

使幅度衰减

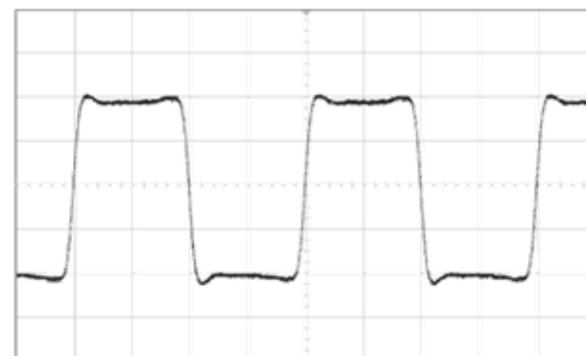
原因

衰减器和放大器

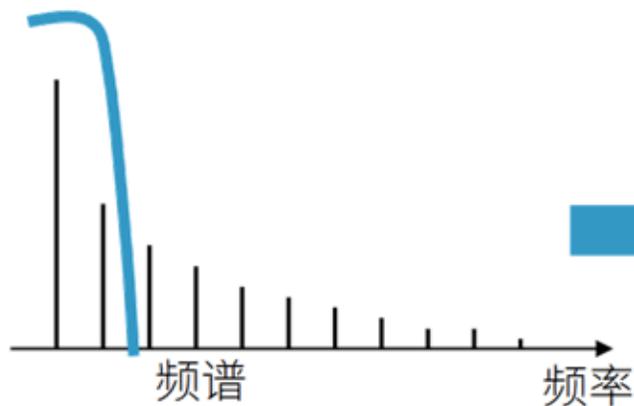
考虑到探头及附件



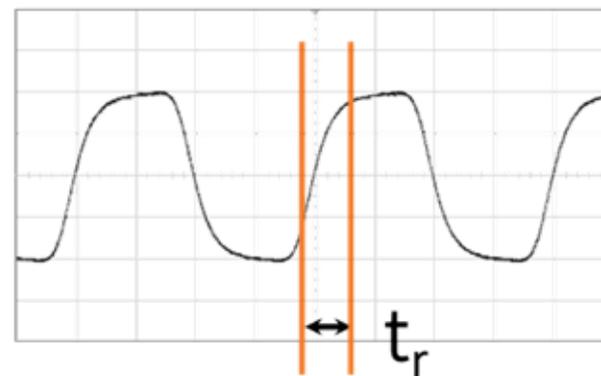
足够的带宽



精确的复现波形



带宽不够



观察到失真的波形

Part I. 示波器概述

如何选择合适的带宽?

根据业界经验公式计算带宽

根据业界的经验，示波器的带宽至少比被测信号最快的数字时钟速率高5倍，大多都可以满足需求。



Rule of thumb

$$f_{BW} \geq 5 \times f_{clk}$$

Part I. 示波器概述

示波器的**带宽**越大越好吗?

示波器的底噪与带宽相关，带宽越大，噪声电平越高!

所以对应的测试还是应该选择合适的带宽。

业界常用总线带宽的选择推荐:

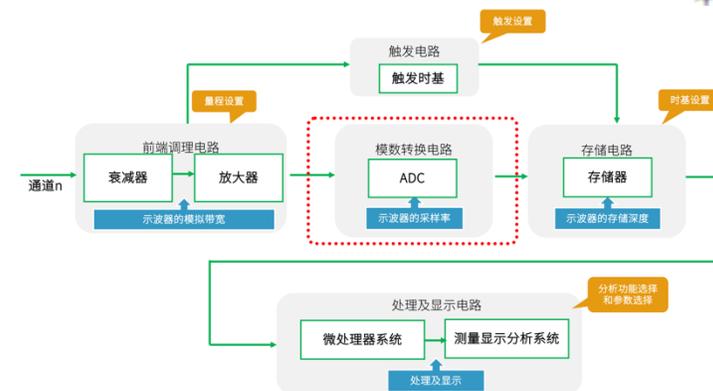
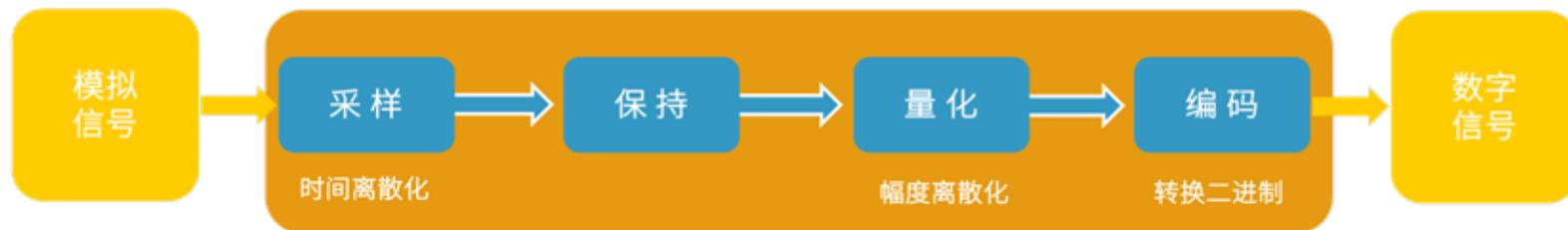
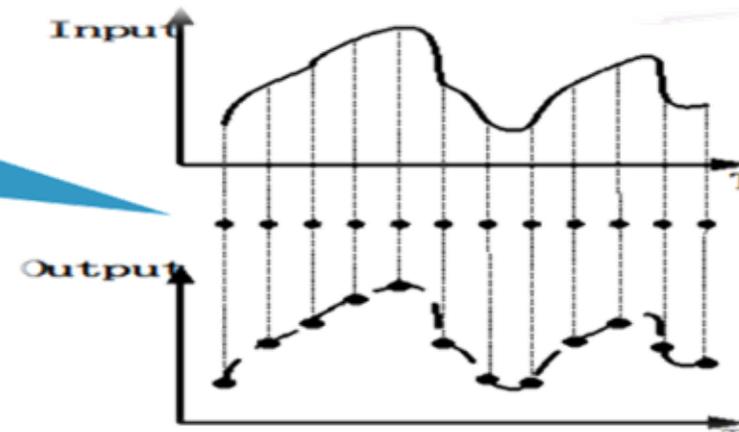
技术	数据速率	最快上升时间	示波器带宽	技术	数据速率	最快上升时间	示波器带宽
以太网 10BASE-T	10 Mbps	30 ns	600 MHz	16G 光纤通道	14.025 Gbps	24 ps	30 GHz
以太网 100BASE-T	100 Mbps	3 ns	600 MHz	HDMI 1.4	3.4 Gbps	50 ps	8 GHz
以太网 1000BASE-T	250 Mbps x 4	1.2 ns	1 GHz	DisplayPort 1.2	17.28 Gbps	50 ps	13 GHz
USB 2.0	480 Mbps	300 ps	2.5 GHz	10G 以太网	10 Gbps	60 ps	12 GHz
USB 3.0	5 Gbps	50 ps	12 GHz	10Gbase-KR	10.3125 Gbps	24 ps	25 GHz
USB 3.1	10.3125 Gbps	25 ps	25 GHz	XAUI	3.75 Gbps	60 ps	12 GHz
DDR1	400 MT/s	500 ps	2 GHz	MIPI® M-PHY®	5.83 Gbps	17.2 ps	24 GHz
DDR2	1066 MT/s	250 ps	4 GHz	MIPI D-PHY SM	2.5 Gbps	100 ps	6 GHz
DDR3	2133 MT/s	100 ps	8 GHz	PCI Express 2	5 Gbps	30 ps	12.5 GHz
DDR4	3200 MT/s	75 ps	12 GHz	PCI Express 3	8 Gbps	25 ps	20 GHz
GDDR5	8 Gbps	30 ps	16 GHz	28/32G 光纤通道	28 Gbps	18 ps	45 GHz
SATA 3G	3 Gbps	67 ps	12 GHz	Thunderbolt 10G	10.3125 Gbps	22 ps	25 GHz
SATA 6G	6 Gbps	33 ps	16 GHz	SFP +	10 Gbps	34 ps	16 GHz
SAS-2	6 Gbps	42 ps	16 GHz	MHL	2.25 Gbps	75 ps	8 GHz
SAS-3	12 Gbps	21 ps	30 GHz	InfiniBand II	2.5 Gbps, 5 Gbps	75 ps	8 GHz

Part I. 示波器概述

示波器模数转换(ADC)技术

示波器ADC采样原理，是为了将输入的连续时间域上的模拟信号转换到离散时间域上的数字信号。
采样速率越高，时间分辨率就越高，时间参数测量精度也就越高。

将模拟信号按采样速率进行离散化分割

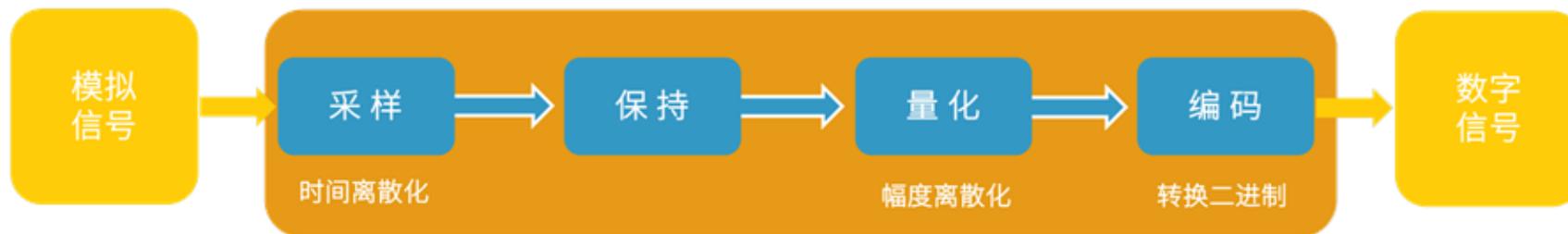


A/D转换过程:

要把模拟量转化为数字量一般要经过四个步骤，分别称为 采样、保持和量化、编码 这几个步骤。

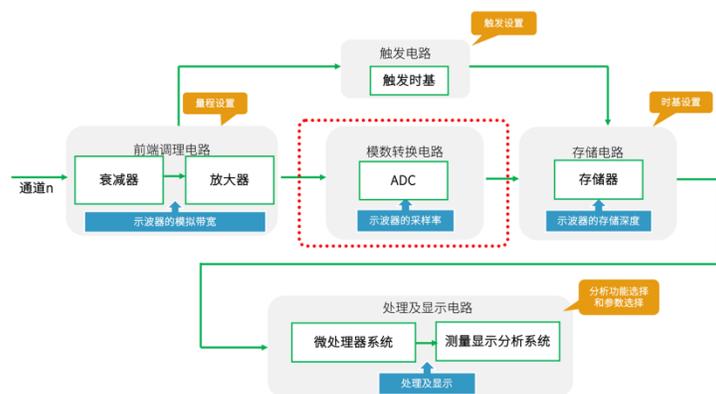
Part I. 示波器概述

示波器模数转换(ADC)技术

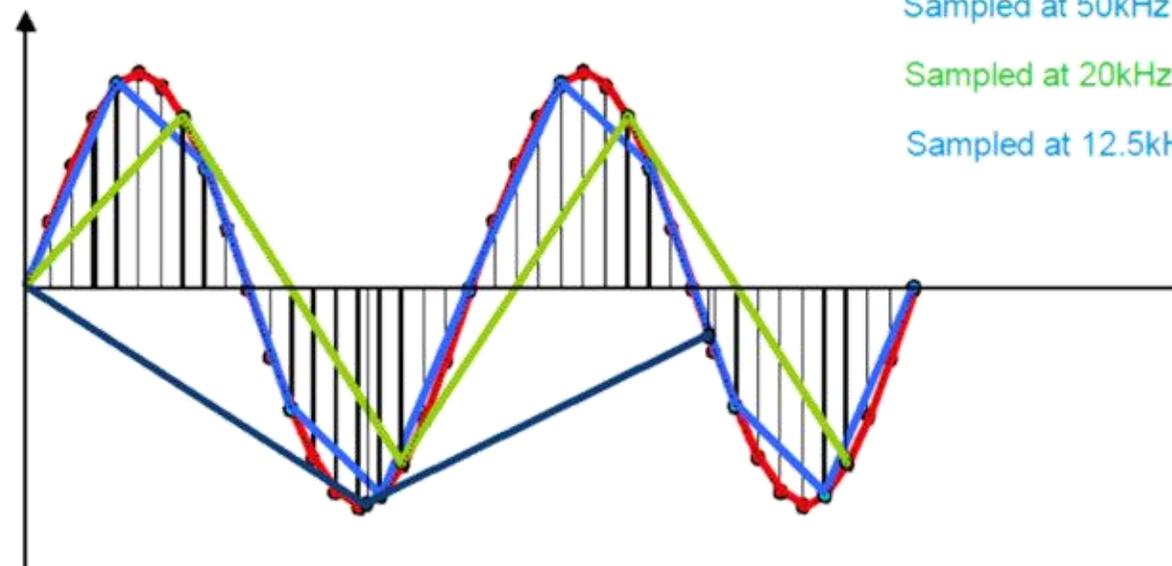


采样

将信号从连续时间域上的模拟信号转换到离散时间域上的离散信号的过程。



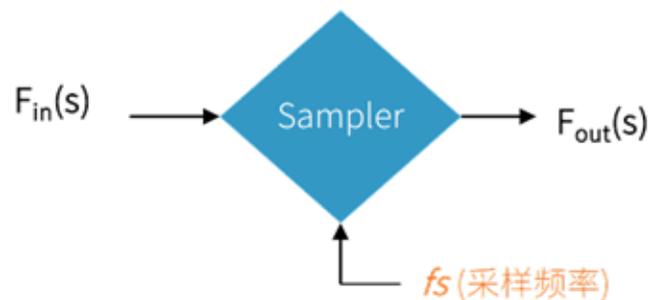
Sinusoids at 10kHz



从图中可以看出，采样率越高，重建的波形越接近原始信号；

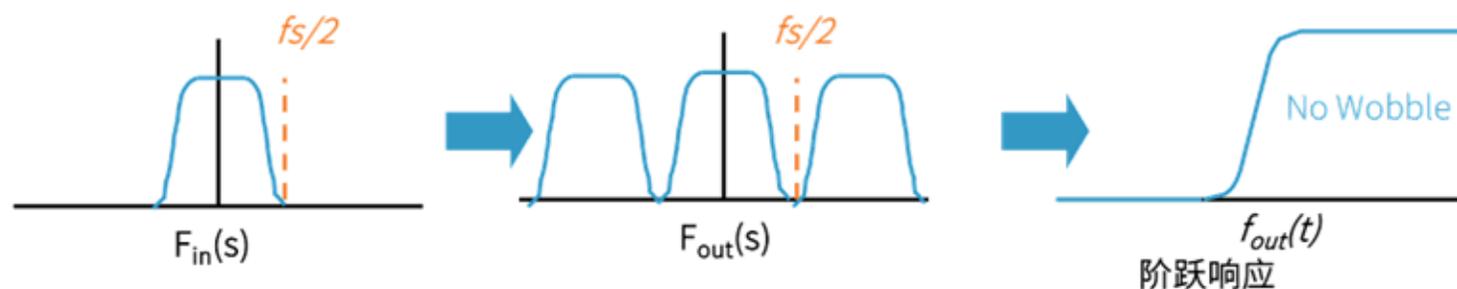
Part I. 示波器概述

示波器模数转换(ADC)技术



Nyquist采样定理

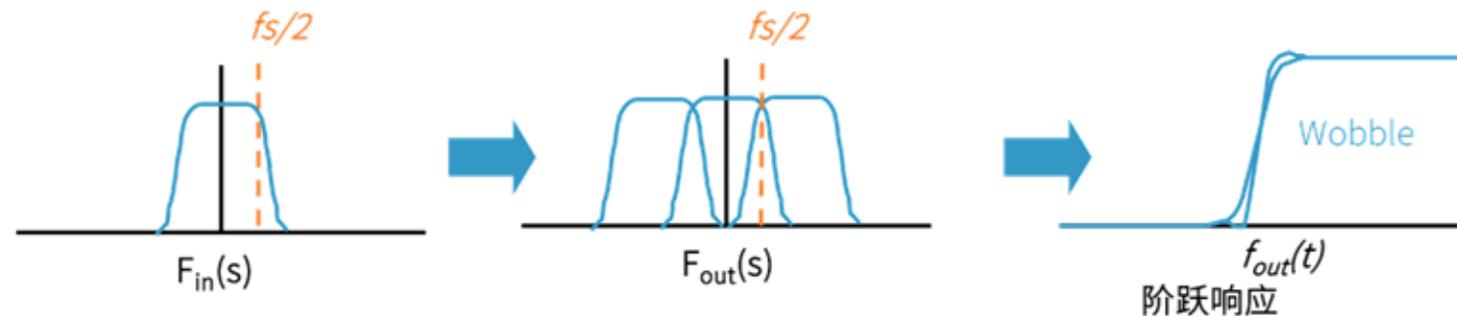
采样率至少为信号最大频率分量的2倍: 没有混叠



采样率小于信号最大频率分量的2倍: 混叠

奈奎斯特频率: $f_s/2$

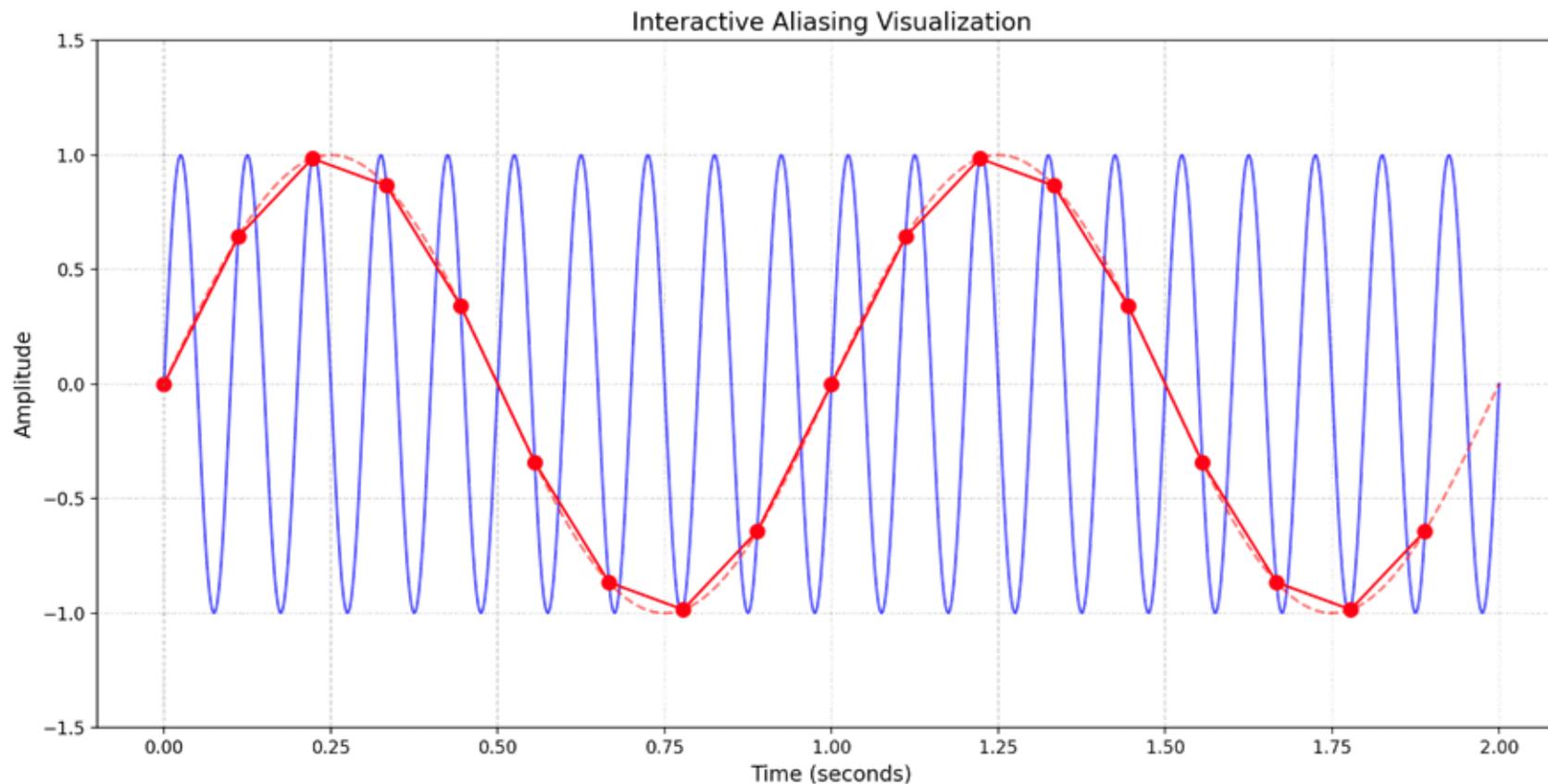
奈奎斯特频率, 它定义为采样频率的一半($f_s/2$), 只要信号最高频率不超过奈奎斯特频率, 就能完整采样。



Part I. 示波器概述

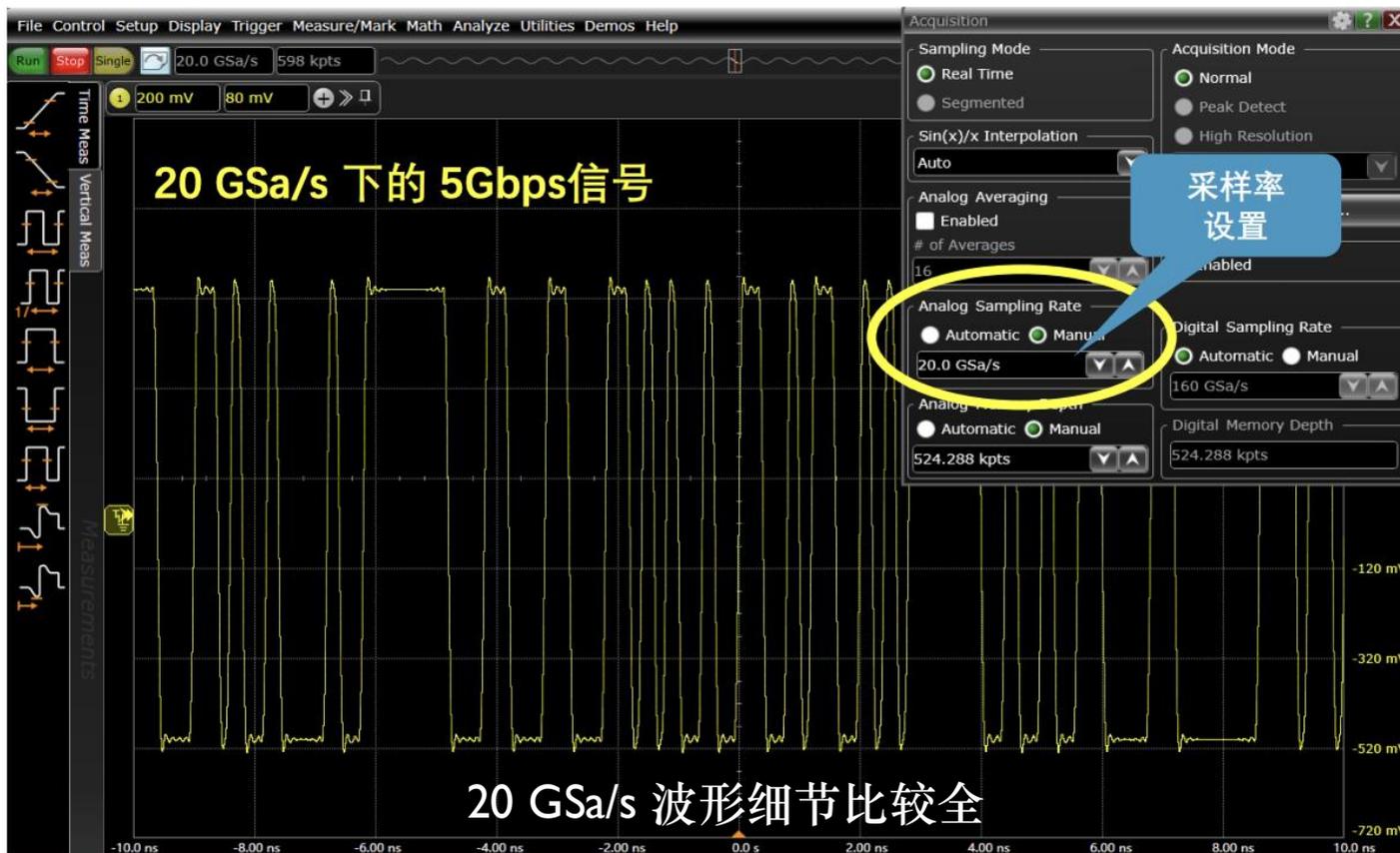
混叠效应：采样率不足时，高频信号“折叠”成低频假信号（下图的红色假波）。

采样率低于信号频率的两倍时，会出现混叠，导致波形失真。这强调了采样定理的重要性，即要准确重建信号，采样率必须至少为信号最高频率的两倍。

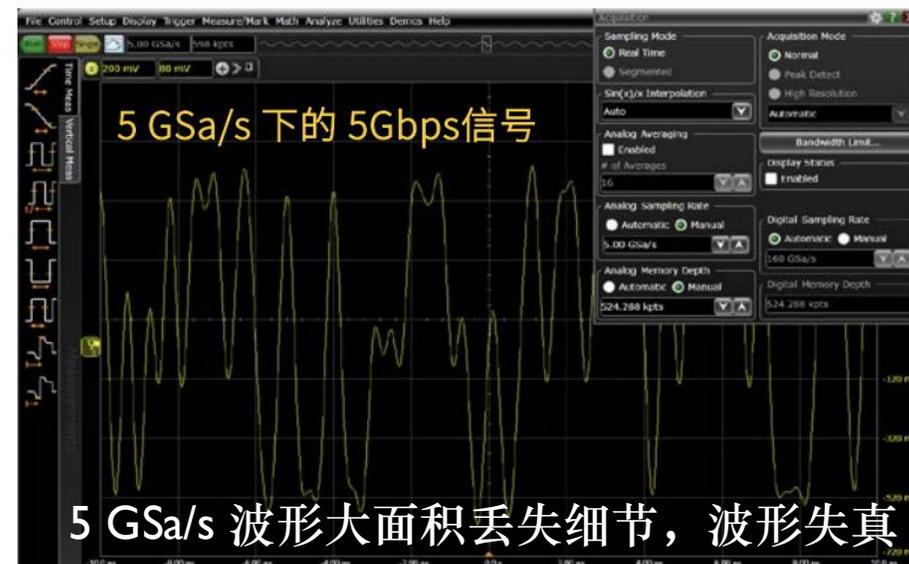
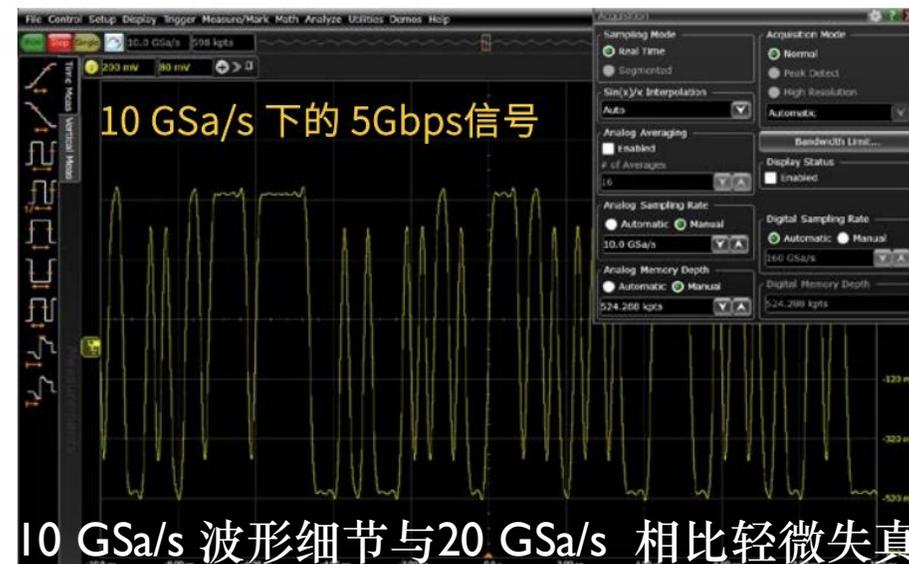


Part I. 示波器概述

采样率设置不当，容易导致信号的失真。



正确的采样率设置：确保采样率值至少是带宽的2.5倍，或者，在Auto模式下满足：采样率*时间长度=存储深度

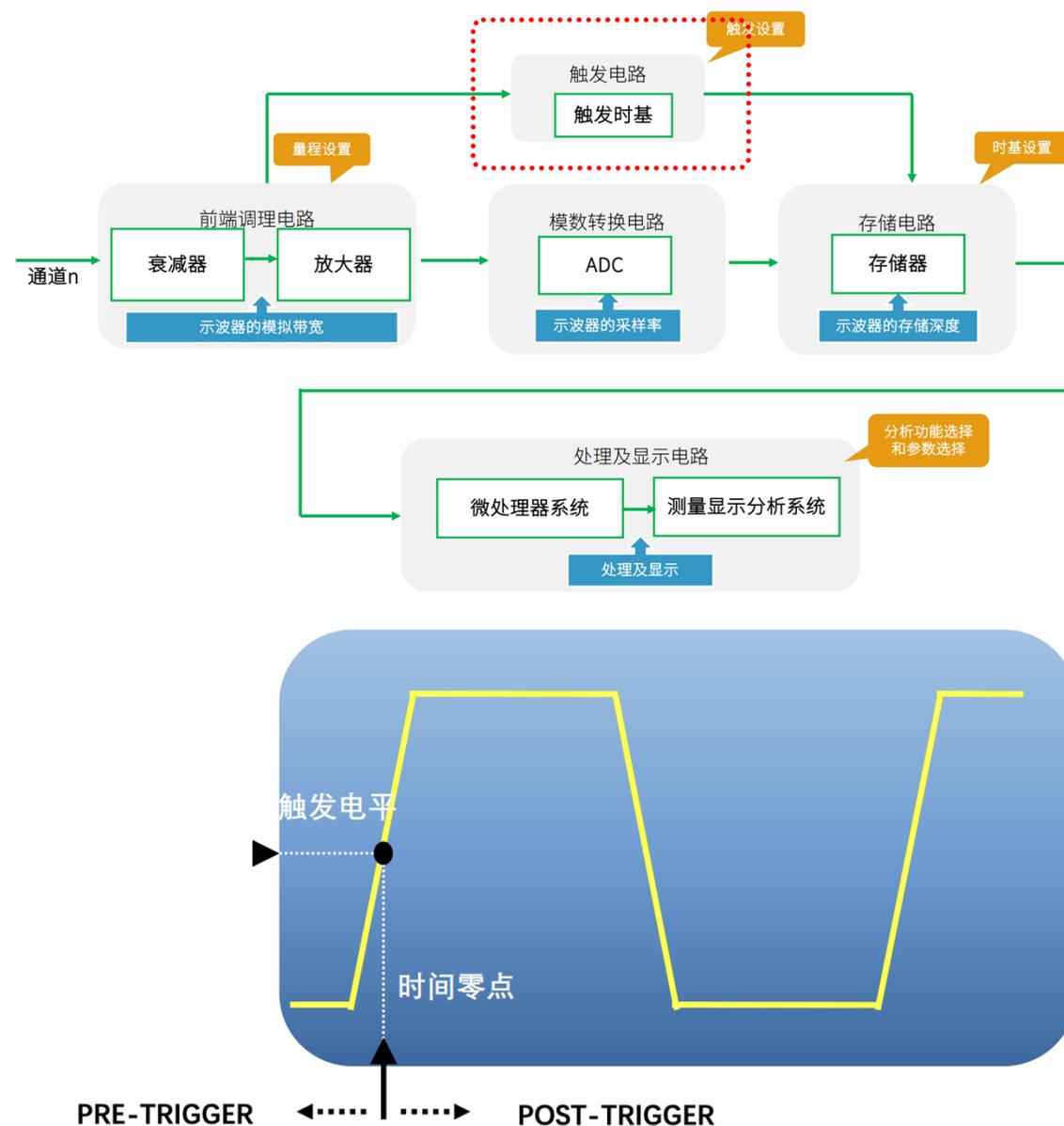


Part I. 示波器概述

示波器的触发技术

触发主要作用

- 捕获感兴趣的信号波形
- 确定时间参考零点,稳定的显示波形



Part I. 示波器概述

示波器的触发技术

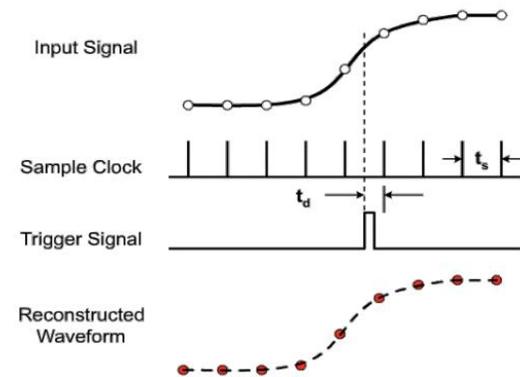
示波器常见的触发模式有三种：Single、Normal（也称Trig'd）和Auto。

Single（单次触发）：当满足触发条件时，**只采集并显示一次波形**，捕获完成后**自动停止**，进入等待或休止状态。如果一直不满足触发条件，示波器会保持等待，不会刷新屏幕，常用于捕捉**稀有或单次瞬态事件**（如异常毛刺或上电脉冲）。

Normal（正常触发，也显示为Trig'd）：每次满足触发条件时，都会采集并**刷新**一次波形。如果不满足触发条件，示波器保持等待状态，屏幕冻结在上一次捕获的波形，不会强制刷新。这种模式适合观察稳定重复的信号，能有效避免假信号干扰。

Auto（自动触发）：无论是否满足触发条件，示波器都会**周期性强制触发并刷新波形**。如果没有有效触发信号，也会自动产生触发，导致波形可能不稳定、晃动或显示随机水平线。这种模式最宽松，常用于**初次调试、预览未知信号或观察信号变化的大致情况**。

Signal Acquisition: Real-Time Oscilloscope



Part I. 示波器概述

示波器的触发技术

常见的触发条件

Edge Triggering (边沿触发)

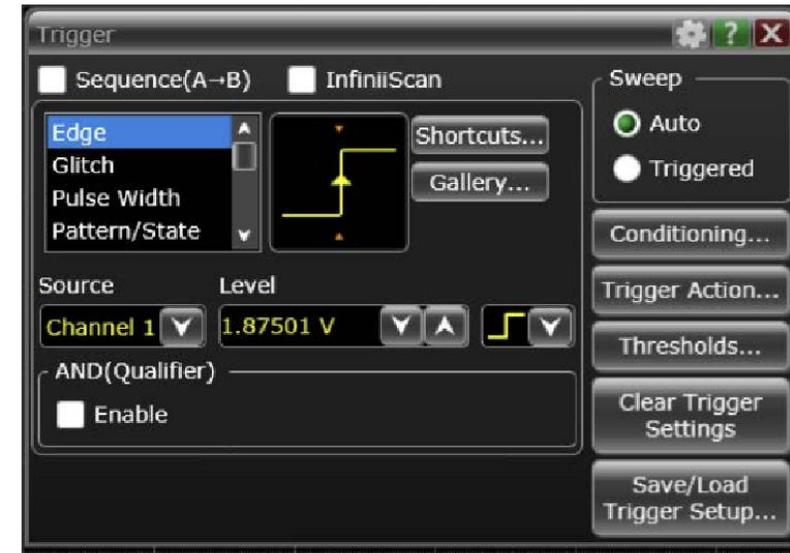
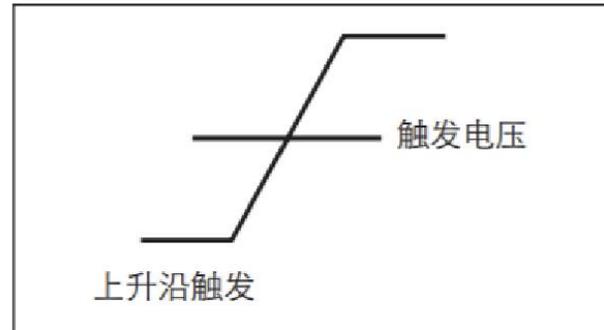
Glitch Triggering (毛刺触发)

Signal Integrity Triggering (信号完整性触发)

- Pulse Width (脉冲触发)
- Setup and Hold (建立/保持时间触发)
- Transition (上升/下降时间触发)
- Runt (矮电平触发)

Parallel Logic Triggering

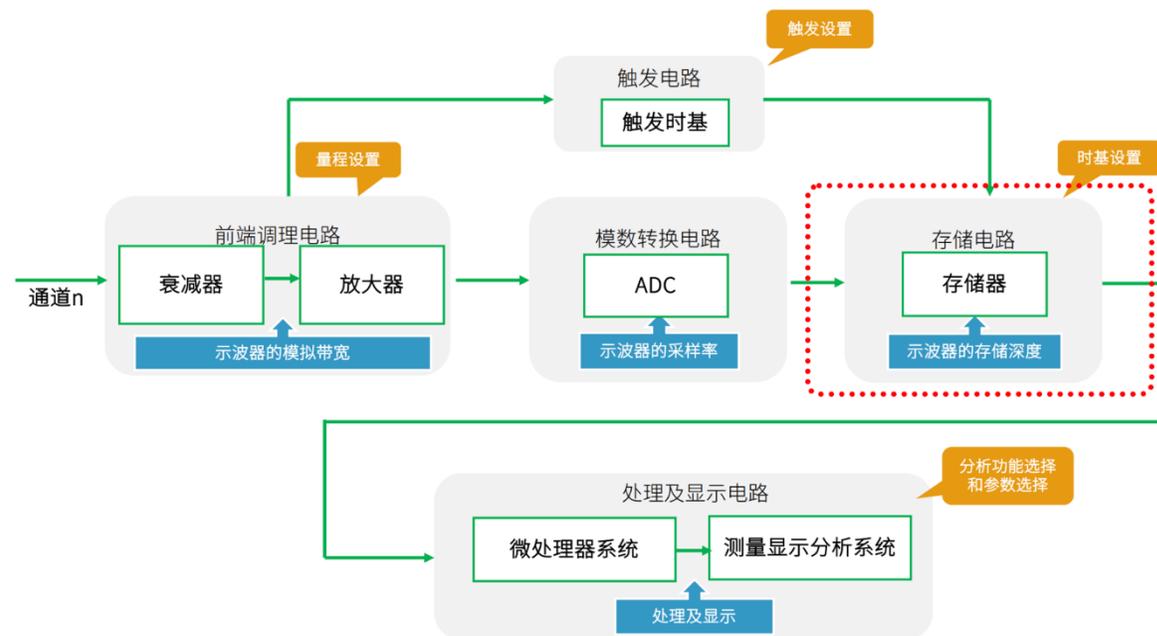
Pattern/State (码型触发)



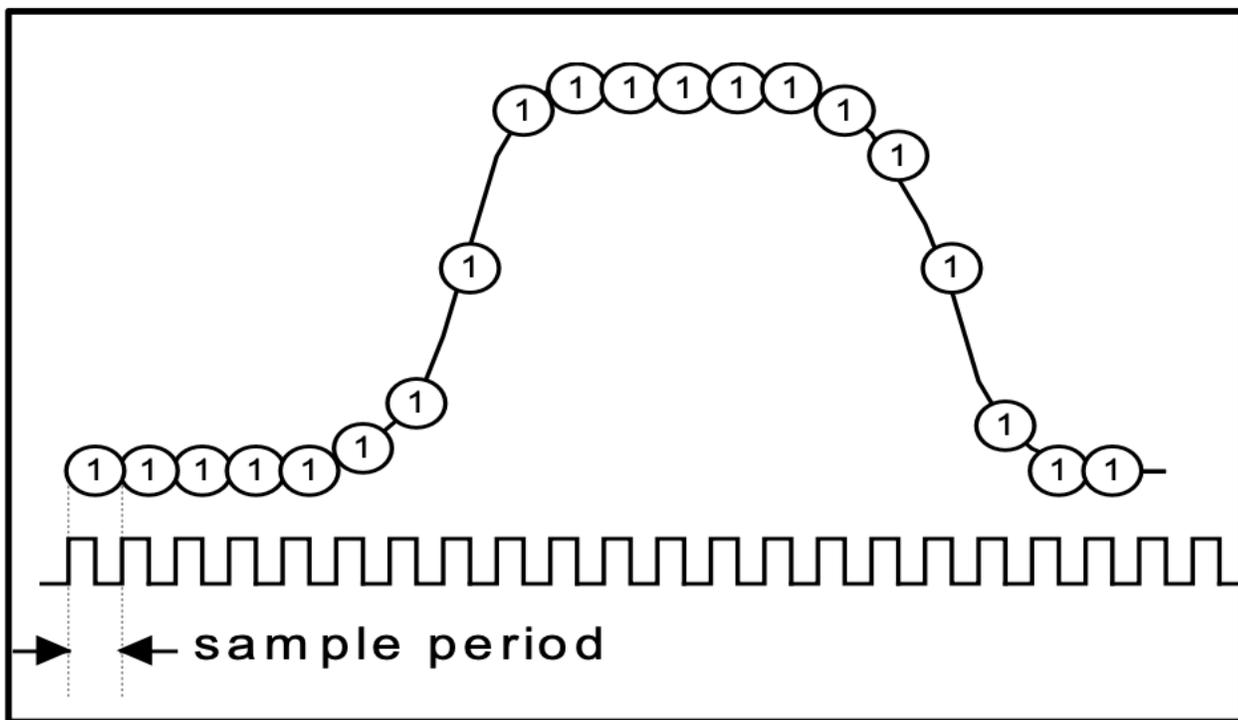
Edge Triggering (边沿触发)

示波器的存储技术

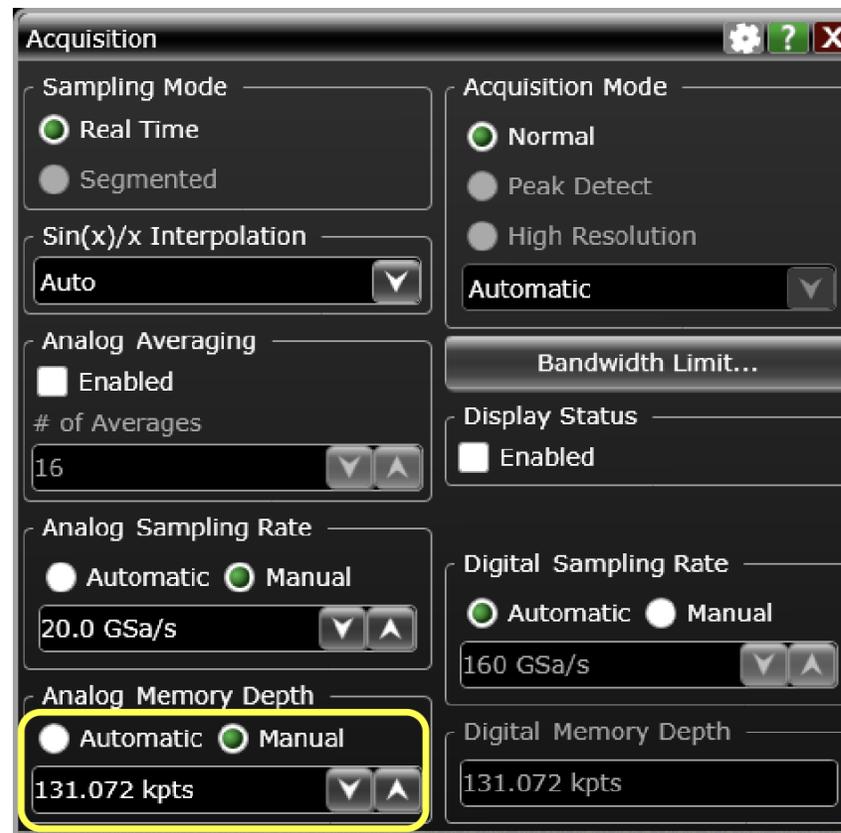
- 每一个采样点必须存储到存储器，才能进行后续的处理和显示
- 示波器的**存储深度**是指每个通道可以存储的数字化的点数
- 更深的存储深度可以**存储更多的采样点**
- 捕捉更长时间数据意味着如果需要保持采样率就需要更高的存储深度



存储深度与采样率的关系



存储深度 = 采样率 × 采样时间(时间刻度 * 10格)



存储深度设定

Q: 那是不是意味着存储深度越深越好呢?

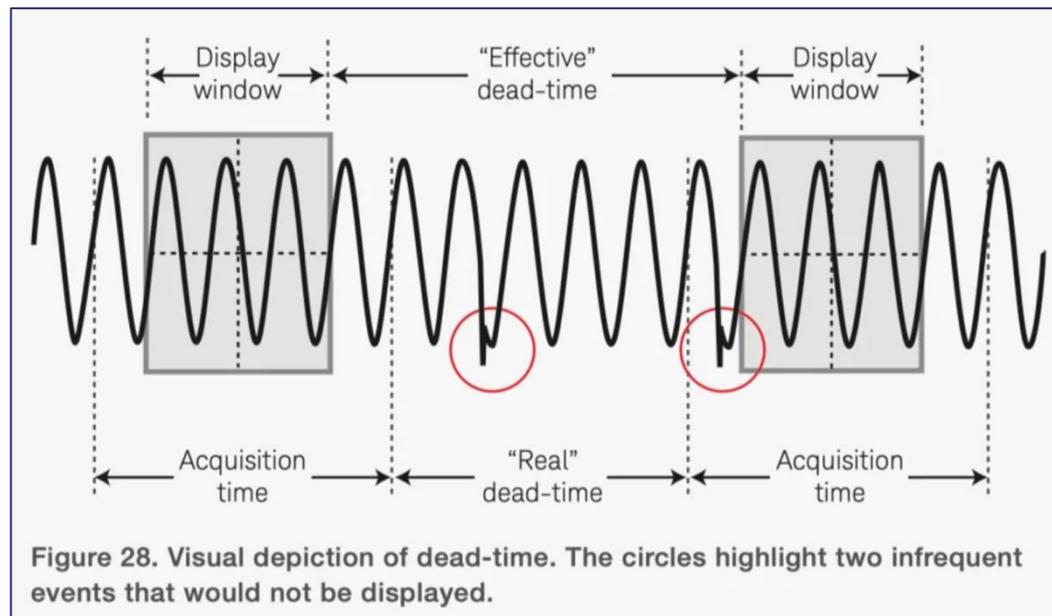
A: 其实深存储也会带来负面影响:

- 波形更新率较慢
- 面板响应时间较慢
- 波形捕获的**死区时间**增加
- 死区时间内的信息被错过

说明一下:

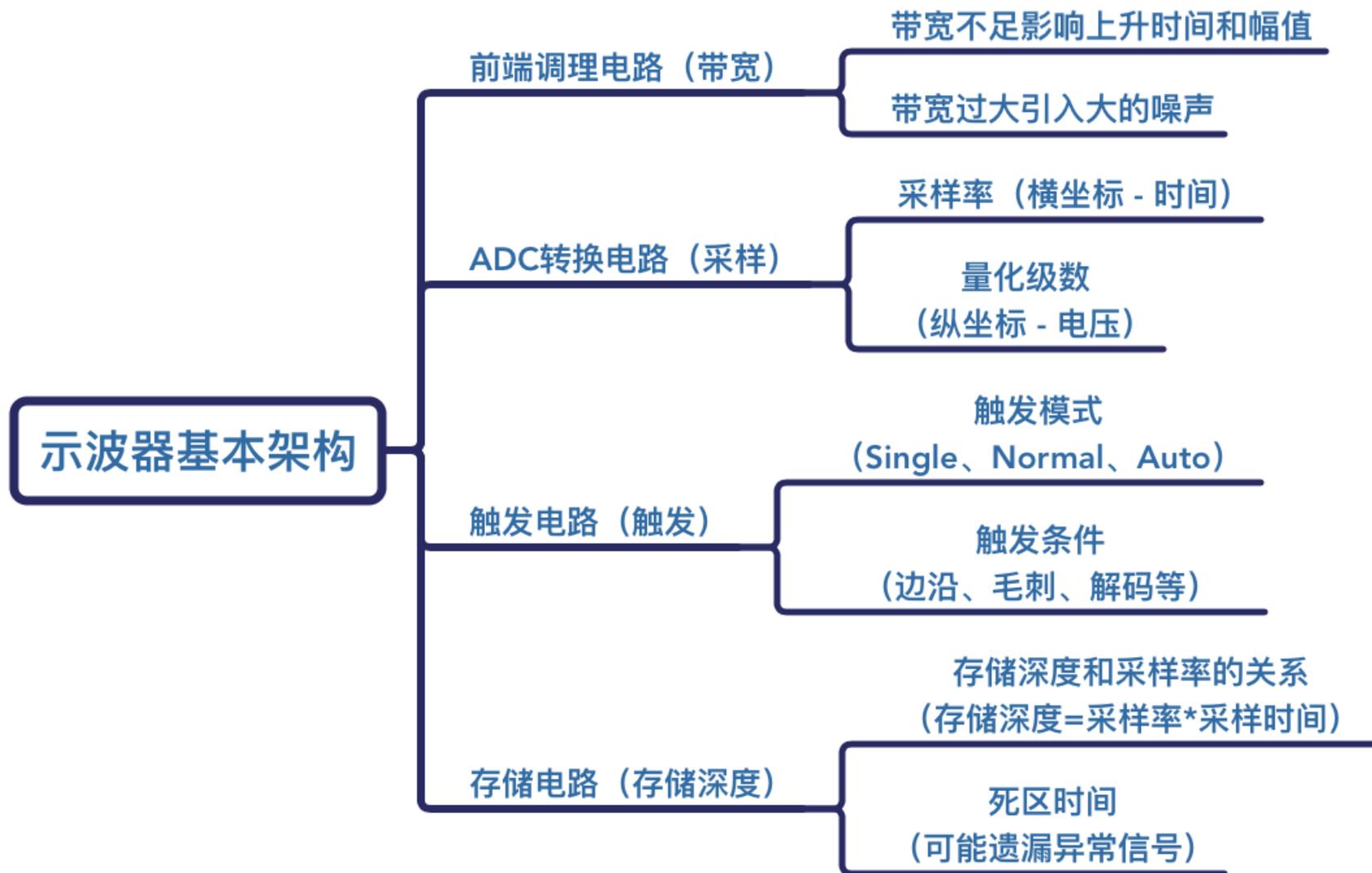
$$\text{采集时间 (灰色方框的宽度)} = \frac{\text{存储深度}}{\text{采样率}}$$

如果我们在保持高清晰度 (高采样率) 的同时, 看更长的时间 (把图中灰色的方框拉宽), 我们就必须增加**存储深度**。



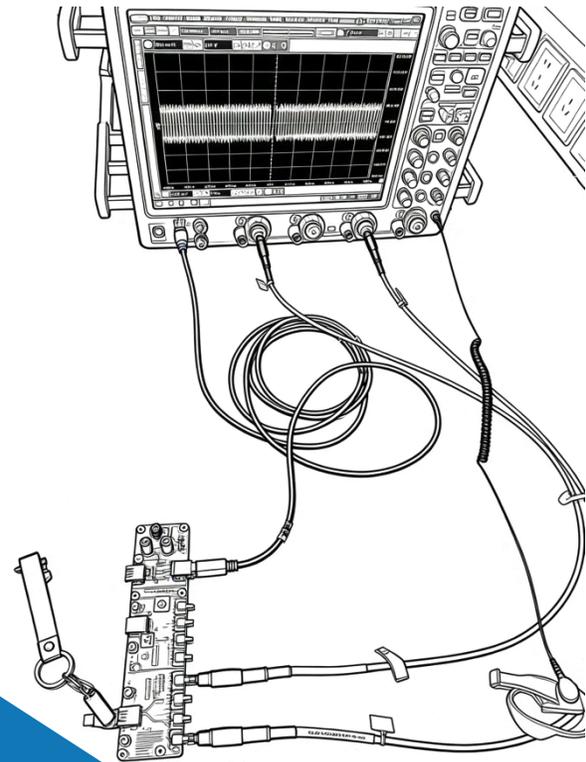
然而, 副作用如下:

1. 处理变慢: 内存越大, CPU/ASIC 需要处理的数据点就从“几千个”变成了“几千万个”。处理 1k 个点可能只要微秒级, 处理 100M 个点可能需要几百毫秒甚至秒级。
2. 死区变大: 在这几百毫秒的处理时间内, 示波器是不采集信号的 (即图中的 Real dead-time 变长了)。
3. 漏掉异常: 死区时间越长, 漏掉图中那个红色圆圈 (偶发故障) 的概率就越高。



示波器对信号的测量及分析

Part 2



电压测量参数

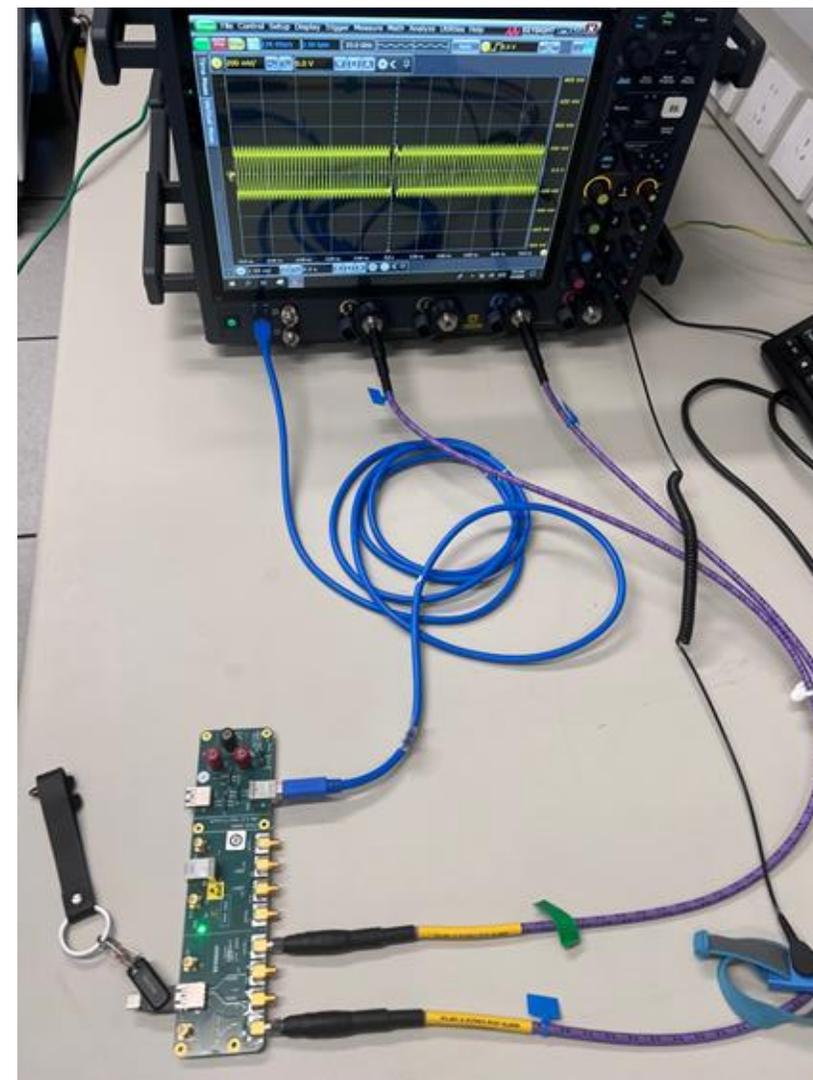
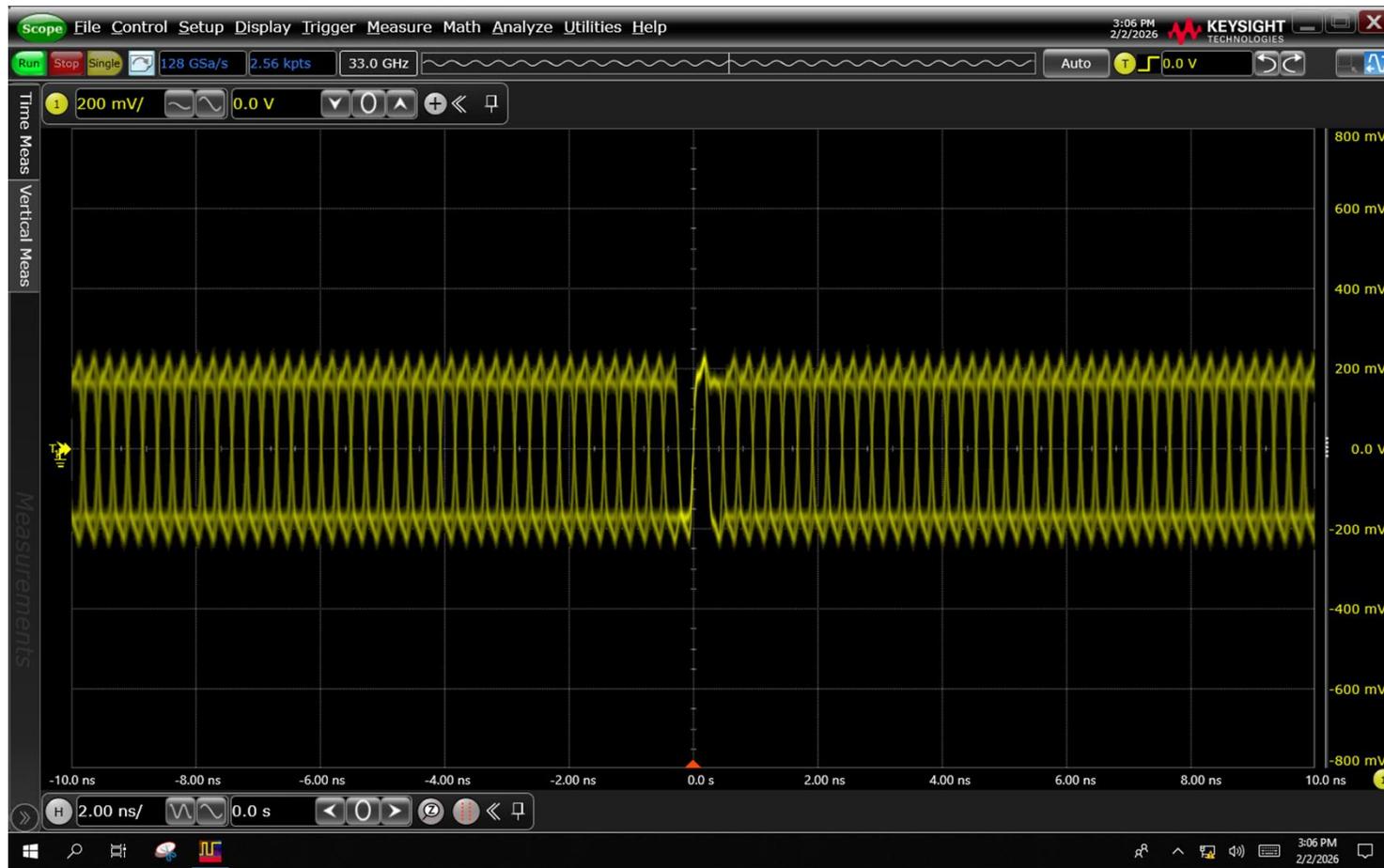
- Average Voltage (Vavg) (平均电压)
- Root Mean Square Voltage (Vrms) (均方根电压/有效值)
- Maximum Voltage (Vmax) (最大电压)
- Minimum Voltage (Vmin) (最小电压)
- Overshoot (过冲)
- Peak-to-Peak Voltage (Vp-p) (峰峰值电压)
- Top Voltage (Vtop) (顶部电压)
- Voltage Amplitude (Vamptd) (电压幅度)
-

时间测量参数

- Delta Time (Δ Time) (时间差)
- Duty Cycle (占空比)
- Fall Time (下降时间)
- Frequency (频率)
- Negative Pulse Width (-Width) (负脉宽)
- Phase (相位)
- Period (周期)
- Positive Pulse Width (+Width) (正脉宽)
- Rise Time (上升时间)
-

Part 2. 示波器对信号的测量及分析

搭建USB 3.2 Device 测试环境，作为演示



Part 2. 示波器对信号的测量及分析

拖放测量

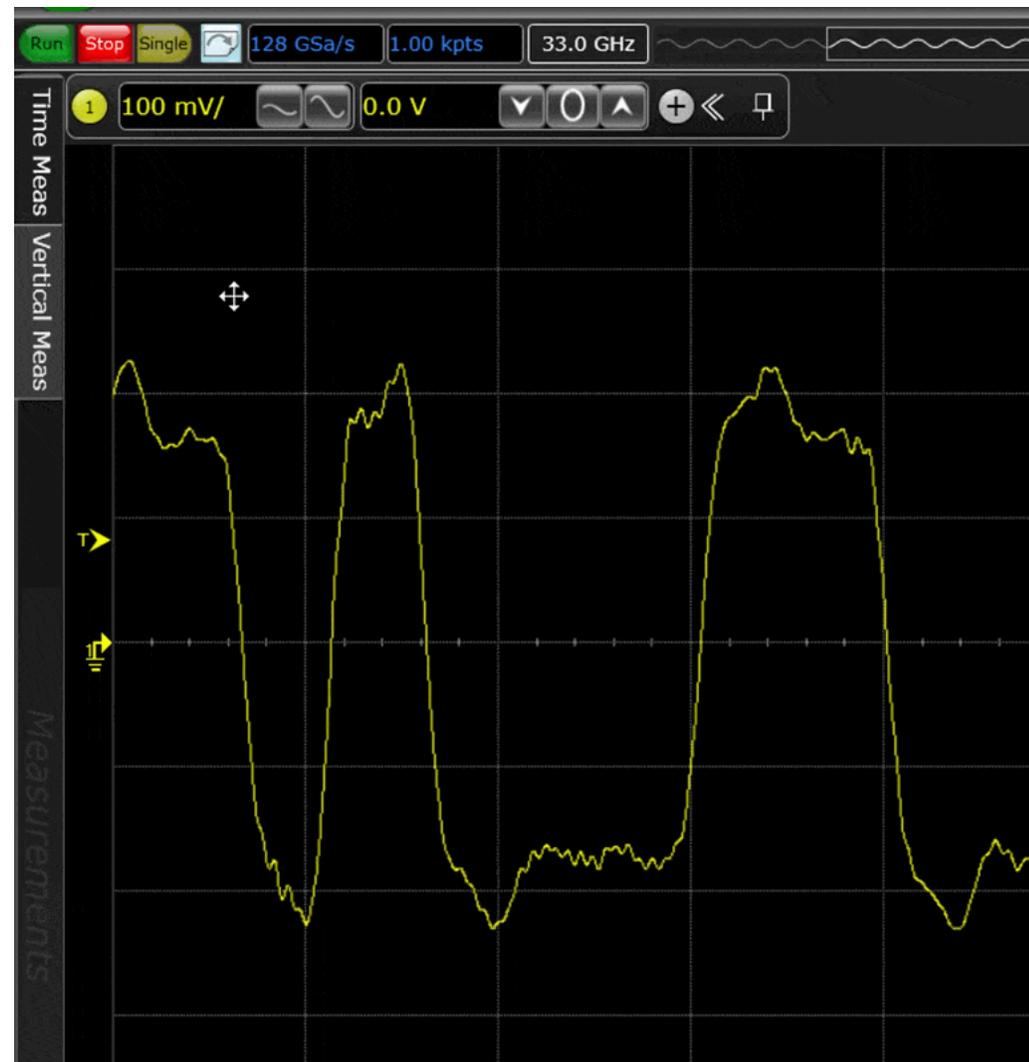
- 时间测量参数

	Rise Time
	Fall Time
	Period
	Frequency
	Positive Pulse Width (+ Width)
	Negative Pulse Width (- Width)
	Duty Cycle
	T Max
	T Min

通过鼠标拖动测量快捷图标，可以快速进行常规参数测量

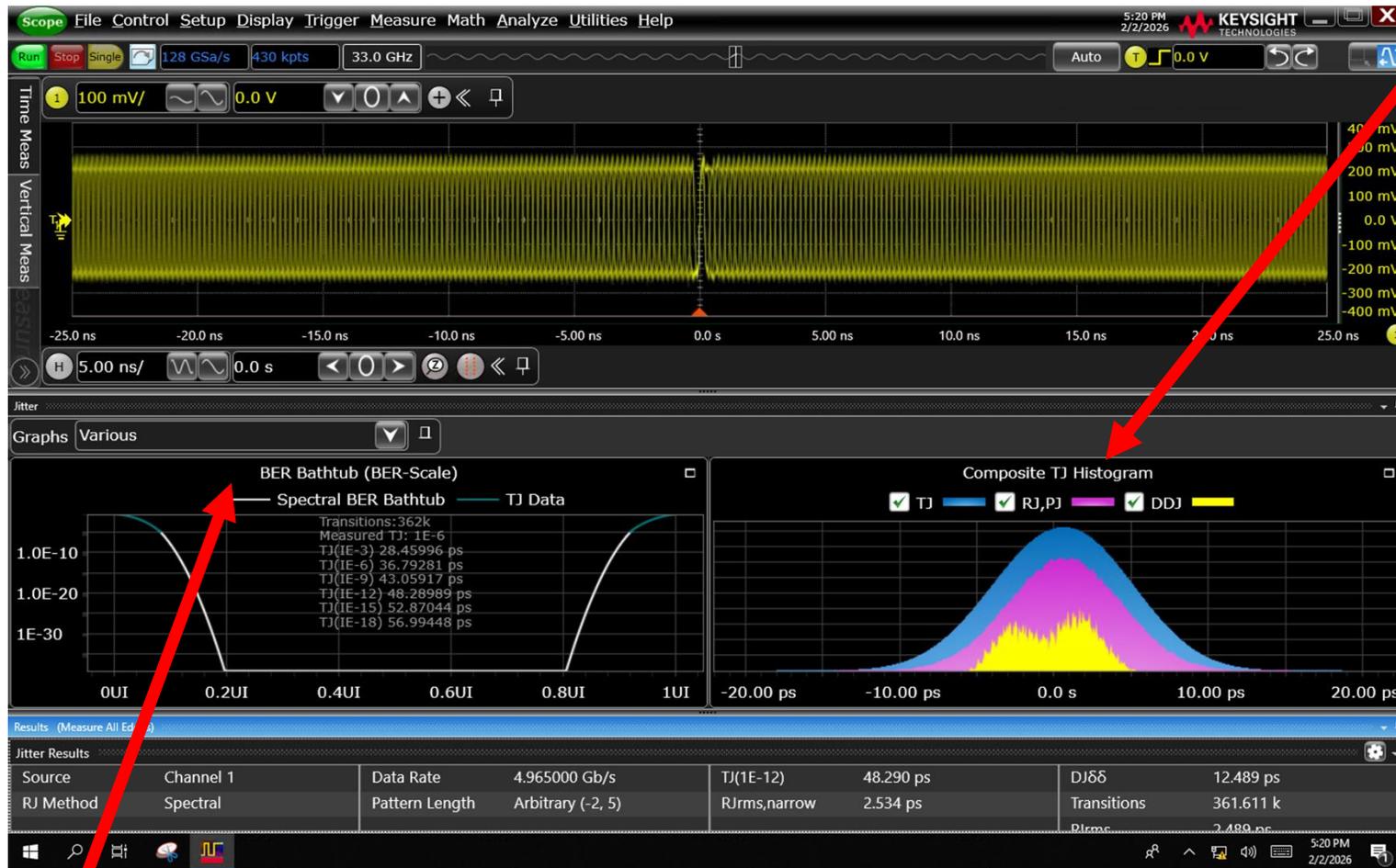
- 垂直测量参数

	Peak-to-Peak Voltage (Vp-p)
	Minimum Voltage (V min)
	Maximum Voltage (V max)
	Average Voltage (V avg)
	Overshoot
	Preshoot
	Amplitude (V amptd)
	RMS Voltage (V RMS)
	Area



Part 2. 示波器对信号的测量及分析

快速抖动分析 (Jitter Analysis)



复合总抖动直方图
(Composite TJ Histogram)

统计分布图，展示了抖动成分的构成。

蓝色 (TJ): 总抖动 (Total Jitter)。

粉紫色 (RJ, PJ): 随机抖动 (Random Jitter) 和周期性抖动 (Periodic Jitter)。

黄色 (DDJ): 数据相关抖动 (Data Dependent Jitter)。

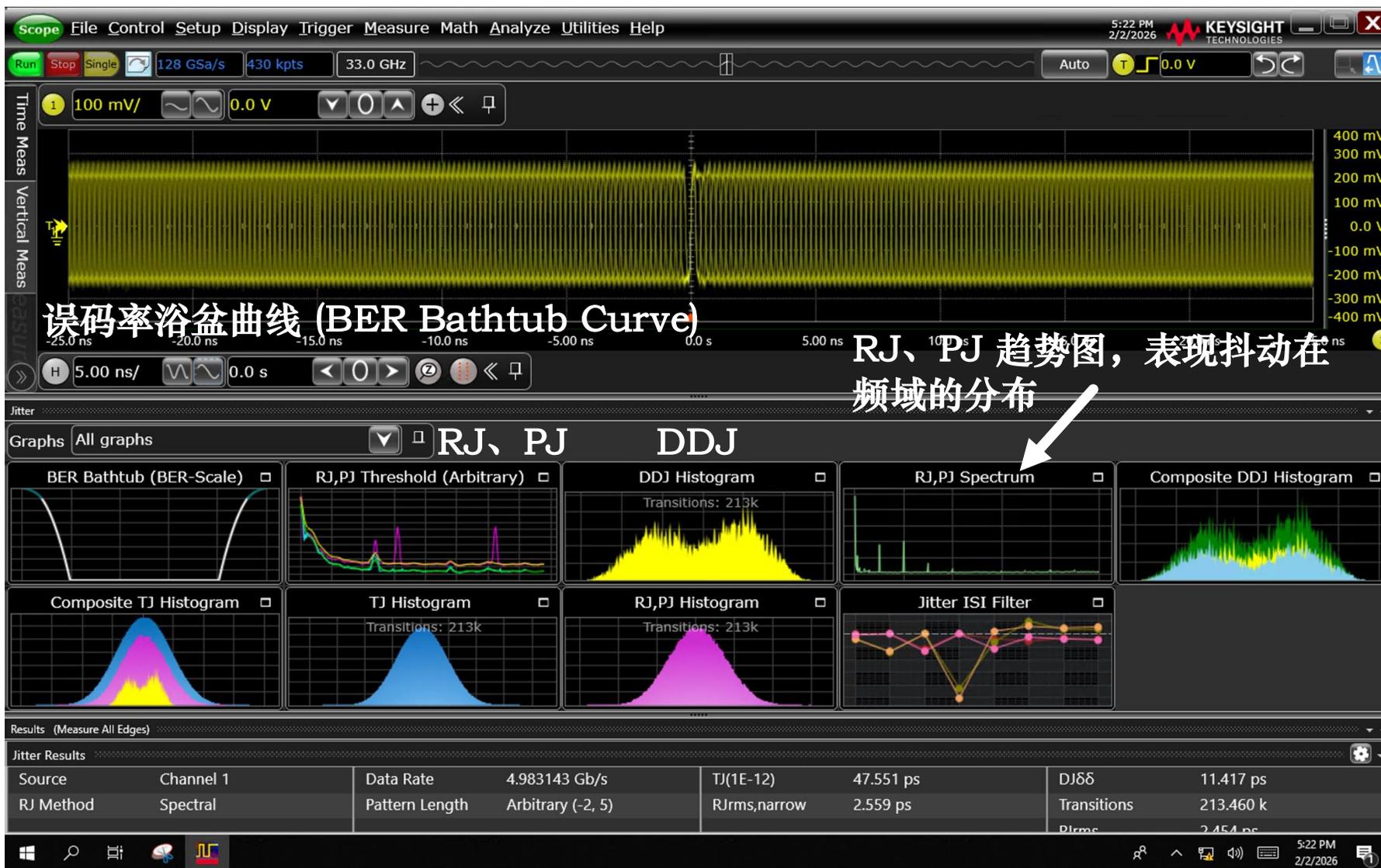
此功能能够帮助工程师分析抖动来源。如果主要呈高斯分布（钟形），通常是随机噪声；

如果有明显的双峰或多峰，通常是码间干扰 (ISI) 或特定频率的干扰。

误码率浴盆曲线 (BER Bathtub Curve)

Part 2. 示波器对信号的测量及分析

除了刚才展示的窗格，示波器还能将抖动进行更加细致的分解。

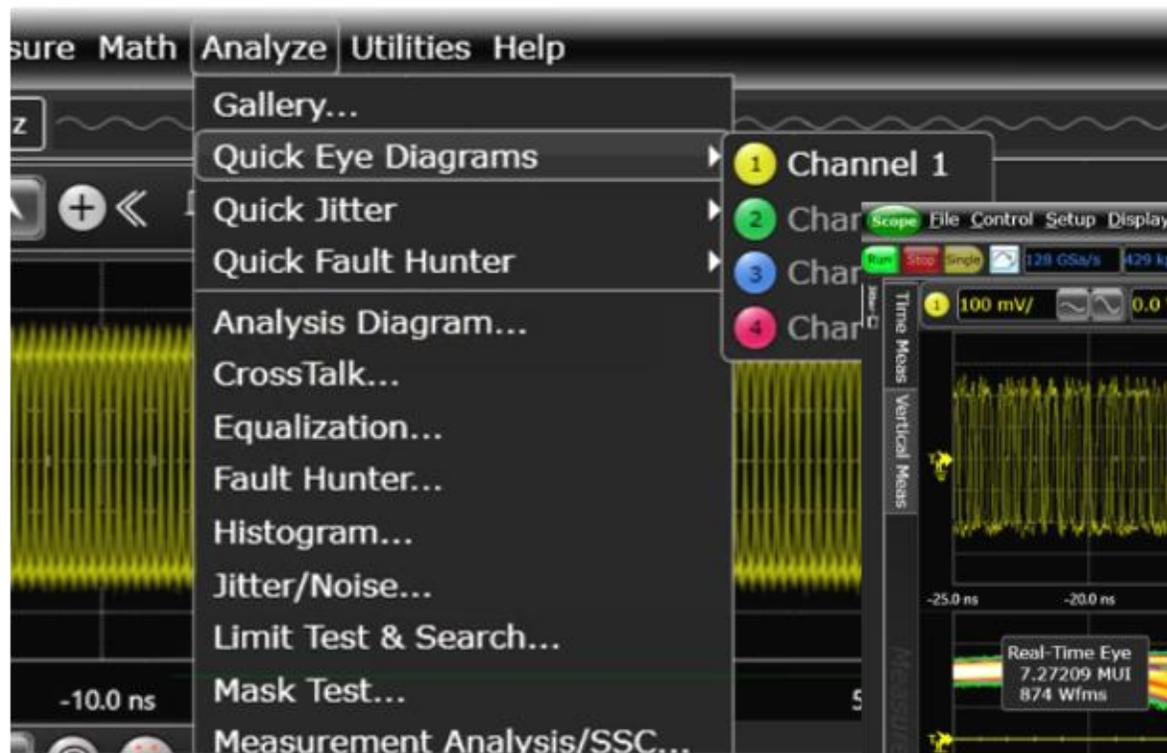


误码率浴盆曲线 (BER Bathtub Curve)

RJ、PJ 趋势图，表现抖动在频域分布

Part 2. 示波器对信号的测量及分析

快速眼图功能



快速自动分析信号的眼图，可以让工程师在短短几秒钟内即可把信号的眼图分析出来，避免了传统复杂的操作设置，节约测试时间

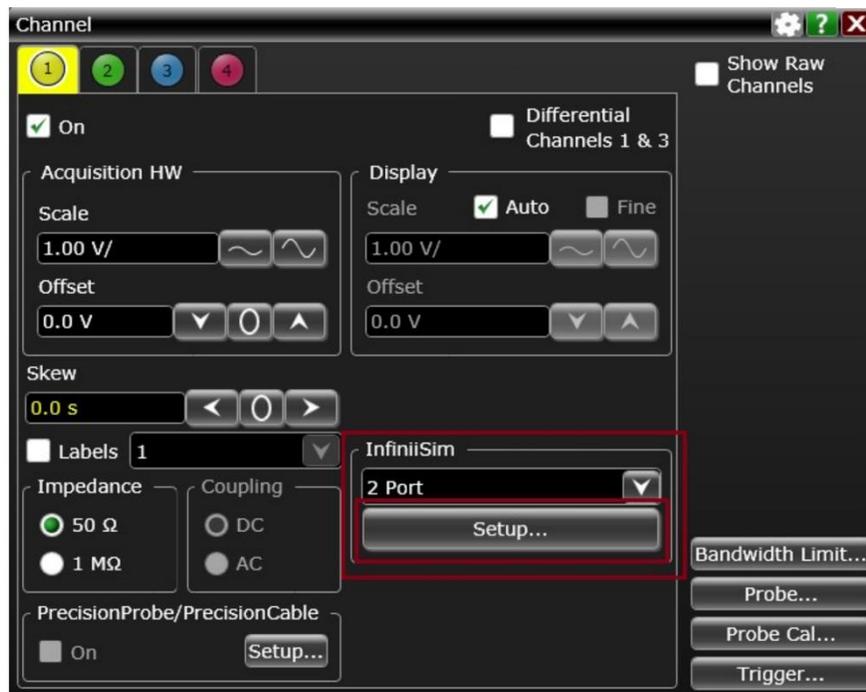
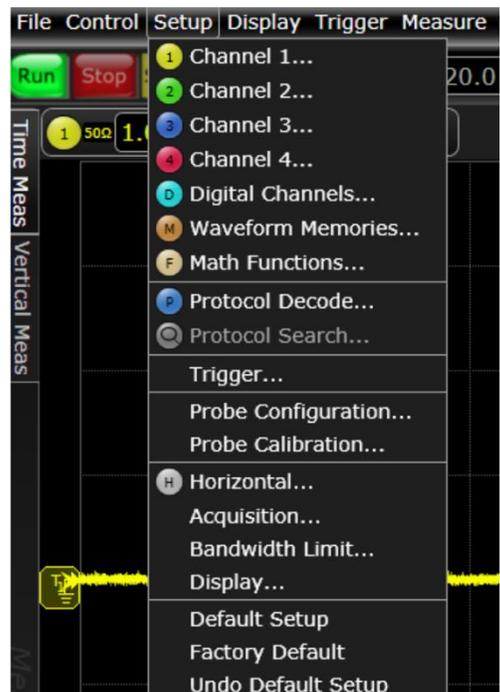
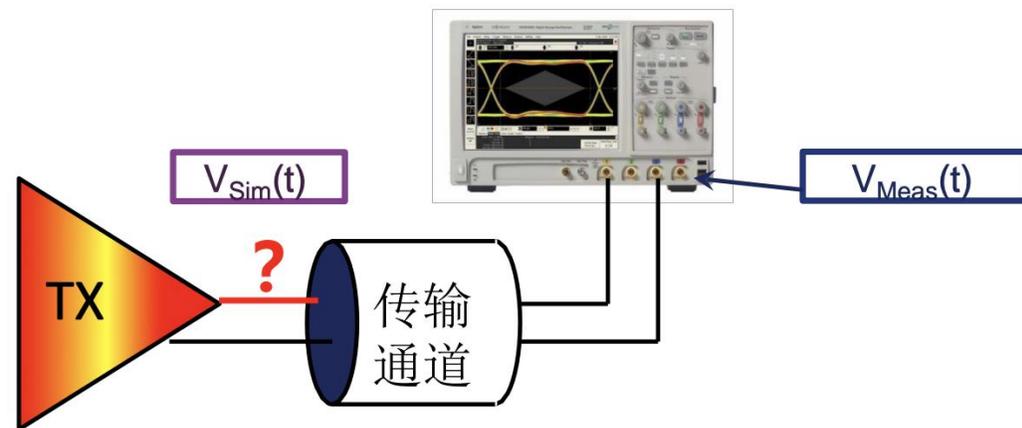


Part 2. 示波器对信号的测量及分析

示波器的嵌入/去嵌入分析功能

去嵌入技术用于在测量中移除传输通道如电缆、夹具或PCB等对信号的影响，从而模拟出信号通过传输通道之前的波形。

嵌入技术用于加入传输通道如测量电缆、测量夹具或PCB等的影响，从而模拟出信号经传输通道之后的波形。



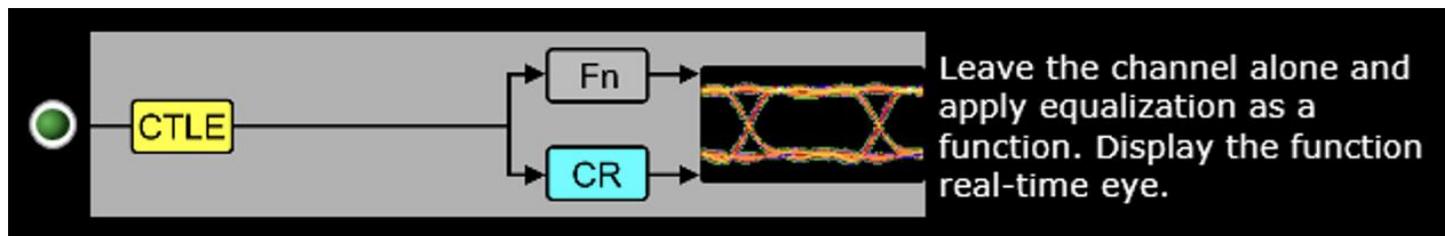
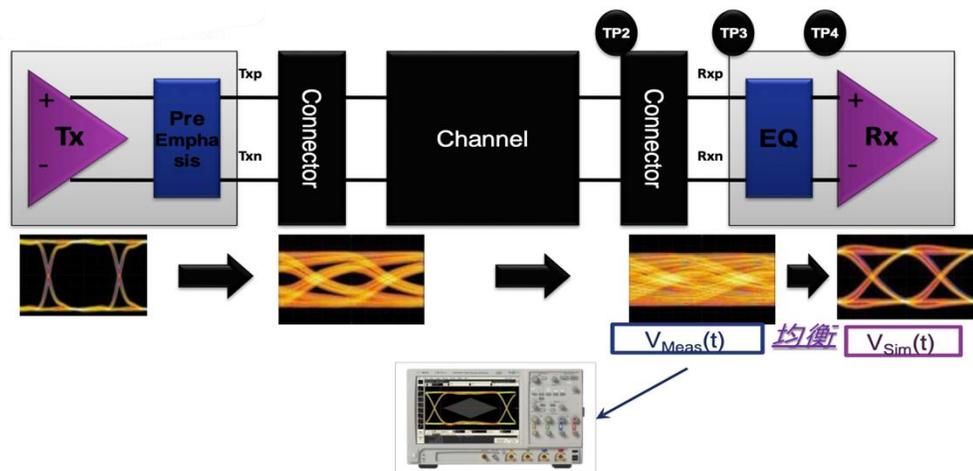
一般我们只能测到 $V_{Meas}(t)$ ，这个信号已经经过了长长的“传输通道”（电缆、治具、PCB走线）。信号在传输过程中会有损耗、反射，导致波形变差。所以， V_{Meas} 并不是TX芯片真正发出来的样貌。

而软件（如 InfiniiSim）如果知道了“传输通道”的S参数，就可以反推出信号在进入通道之前（也就是红色问号处）的样子。

Part 2. 示波器对信号的测量及分析

均衡技术用于在高速数字总线的接收端对传输通道中信号的高频损耗进行补偿。

类似的，示波器里的均衡软件用于模拟均衡电路对接收端信号的改善情况。



均衡功能使用注意事项

1. 均衡是用于在接收端补偿传统通道对信号的恶化。如果原始信号质量很好，均衡算法不一定会把信号变得更好，设置不当反而会把信号恶化。
2. 如果原始信号特别恶劣以至于不做均衡无法进行时钟恢复，则需要选择先做FFE/CTLE再进行时钟恢复的测量方法。
3. 如果原始信号特别恶劣，不建议直接进行DFE均衡。一般采用先做FFE/CTLE改善信号质量再做DFE均衡。
4. 如果由于信号质量的原因无法进行自动均衡系数设置，则可以在所有设置完成后在Tap Setup下进行手动的均衡系数设置。

THE END

Part 1. 示波器概述

Part 2. 示波器对信号的测量及分析

汇报人：王正禹

地点：会议室

日期：2026年2月