



射频电路测量原理

第五讲 示波测试原理

guolinli@tsinghua.edu.cn



参考文献

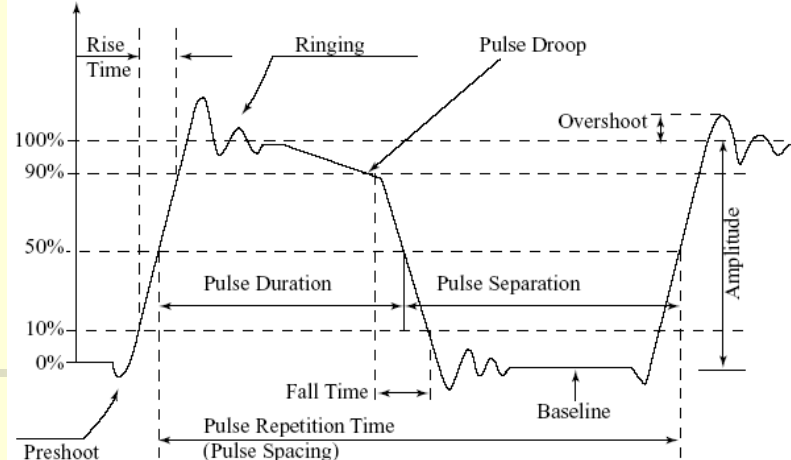
- 刘国林，殷贯西，《电子测量》，机械工业出版社，2003
- Howard Johnson, High Speed Digital Design --- A Handbook of Black Magic, Prentice Hall, 1993
 - 沈力 等译，《高速数字设计》，电子工业出版社，2004
- 孙圣和，刘明亮，施正豪，《现代时域测量》，哈尔滨工业大学出版社，1989
- 陈杰美，古天详，《电子测量仪器原理》，国防工业出版社，1981
- 网上资料：Agilent，Tek



示波测试

- 概述
- 基本原理
- 示波技术
 - 模拟、数字、混合
- 示波测量
- 示波测试中的基本问题探讨
 - 带宽，探头，...

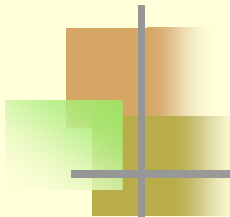
一、概述



- 什么是示波器 oscilloscope
 - 将时域波形显示在阴极射线管上的仪器
 - Oscillum : Latin, swing
 - Skopein: Greek, to look at
- 示波器能够直接观测被测信号的电压-时间波形，例如一个脉冲信号的前后沿、脉宽、上冲、下冲等参数
 - 示波器显示屏上，X轴一般被用来代表时间 t ，Y轴代表信号幅度，显示屏上显示的是时域波形 $f(t)$ ：时域分析仪器

第一台示波器出现于1939年，5MHz带宽

今天，Tek公司的TDS6000系列DSO具有12-15GHz的模拟带宽，双路40GS/s的采样率（25ps采样间隔）



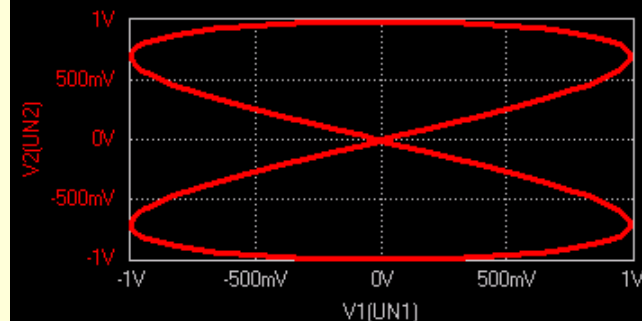
什么是示波器

- 广义地说，示波器是一台XY图示仪
 - 只要把两个有关系的变量转化为电参量分别加至示波器的X、Y通道，就可以在荧光屏上显示这两个变量之间的关系
 - 电子测量的几个基本领域都用到示波测试技术
 - 频域分析：频谱分析仪的X代表频率，Y代表频率分量幅值
 - 数据域分析：逻辑分析仪的Y代表逻辑状态
- 示波测量技术也是各种非电量测量的基本技术，广泛应用于医学、地震等多种学科测量技术中，因而示波测试技术是一种最灵活多用的技术，电子示波器成为一种综合性的多功能测试仪器

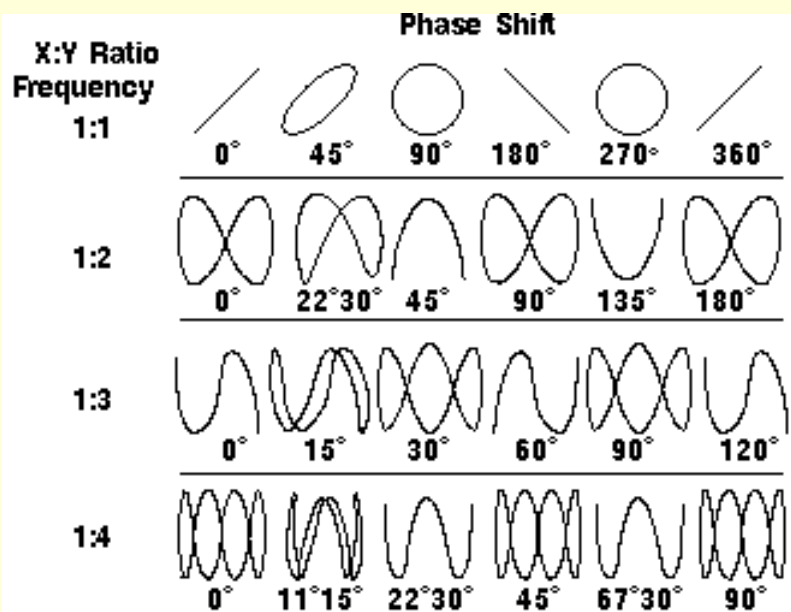
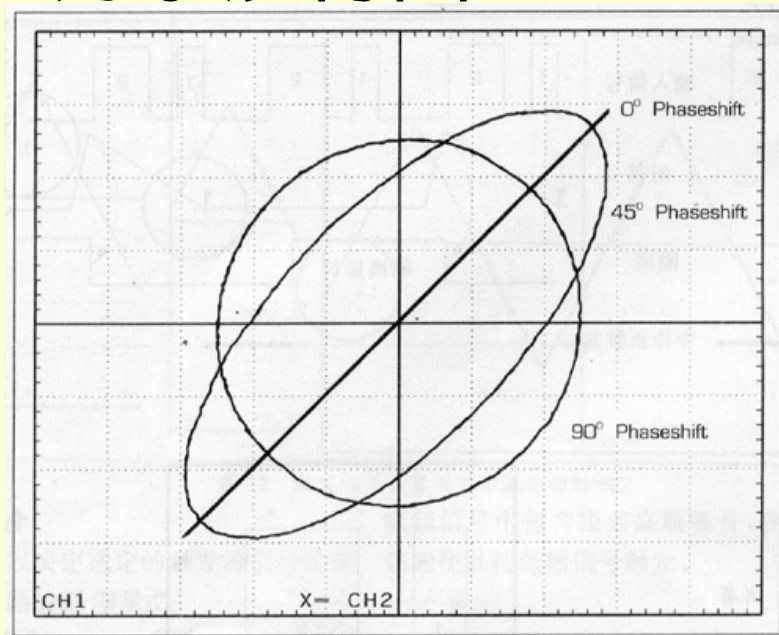
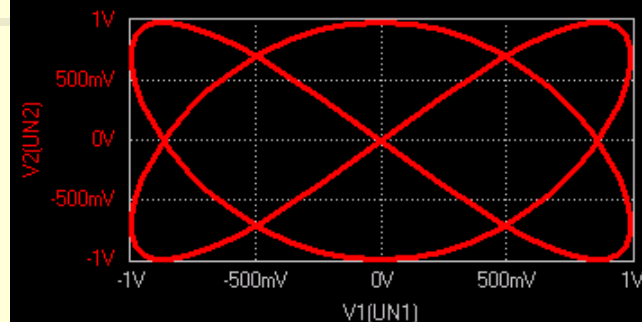
李沙育图

- 示波器两对偏转板上都加正弦电压所显示的图形称为李沙育图

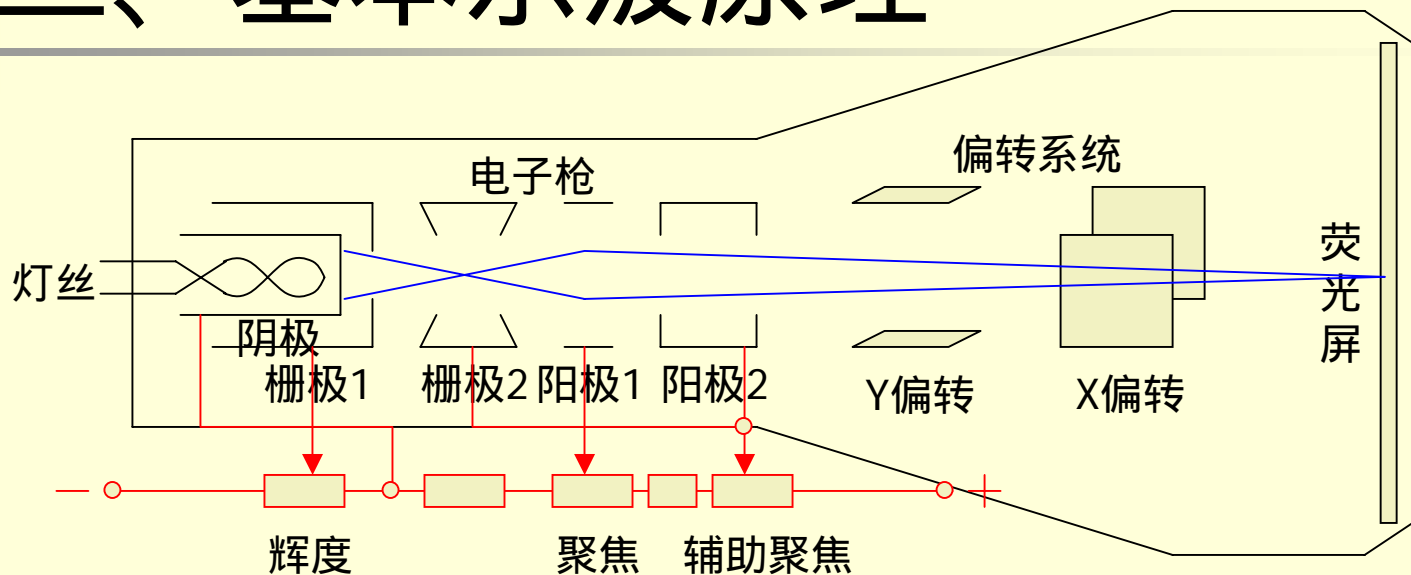
2:1
90°



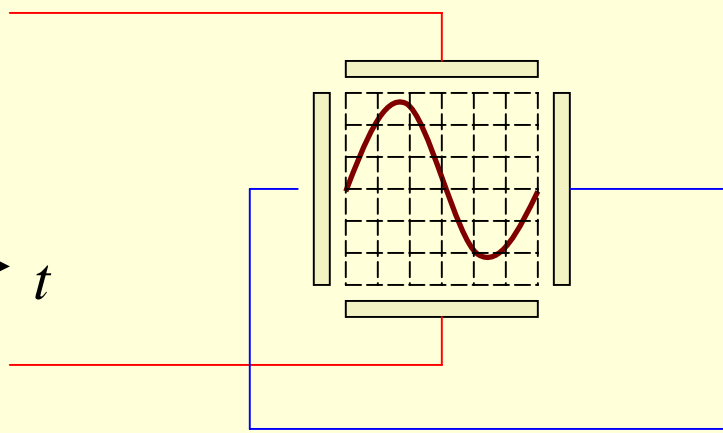
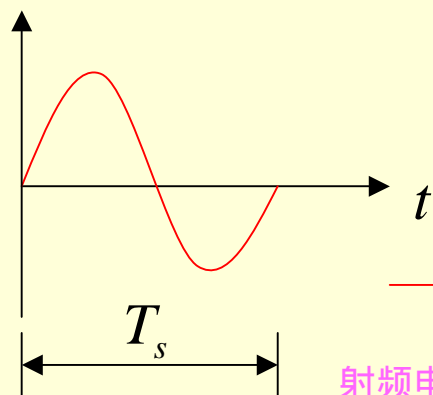
2:3
90°



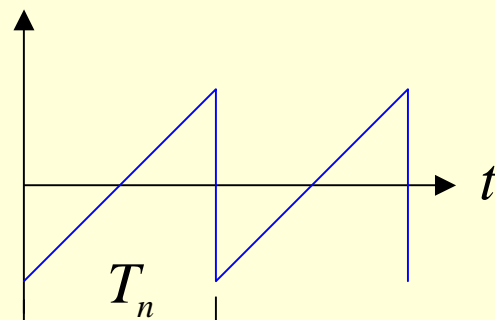
二、基本示波原理



$$v_y(t) = k_1 \cdot f(t)$$



$$v_x(t) = k_2 \cdot t$$



同步

- 当扫描电压周期 T_n 是被观测信号周期 T_s 的整数倍时，扫描的后一个周期描绘的波形与前一周期重合，荧光屏上得到清晰而稳定的波形，称为信号与扫描电压同步
 - 如果不同步，后一次扫描得到的波形和前一次得到的波形不重合，人眼看到的波形将会发生移动，波形不再是稳定的
- 扫描电压是由示波器本身的时基电路产生的，与被测信号无关
 - 可以利用外加和信号有关的同步触发信号控制示波器的时基电路，迫使扫描同步
 - 也可以由被测信号本身产生同步触发信号

三、示波技术

■ 示波器的分类

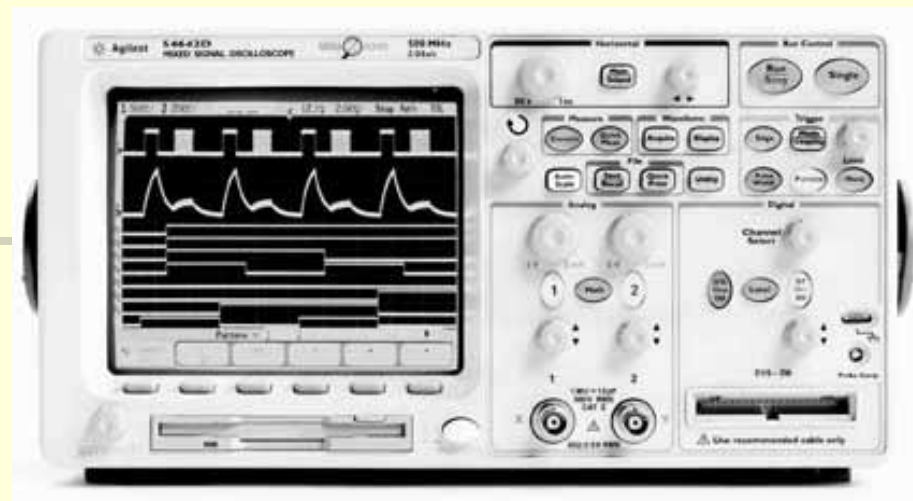
- 模拟示波器
- 数字示波器

- 存储：将信号数字化后再建波形，具有记忆、存储被观测信号的功能，可以用来观测和比较单次过程和非周期现象、低频和慢速信号，以及不同时间不同地点观测到的信号
DSO, Digital Storage Oscilloscope

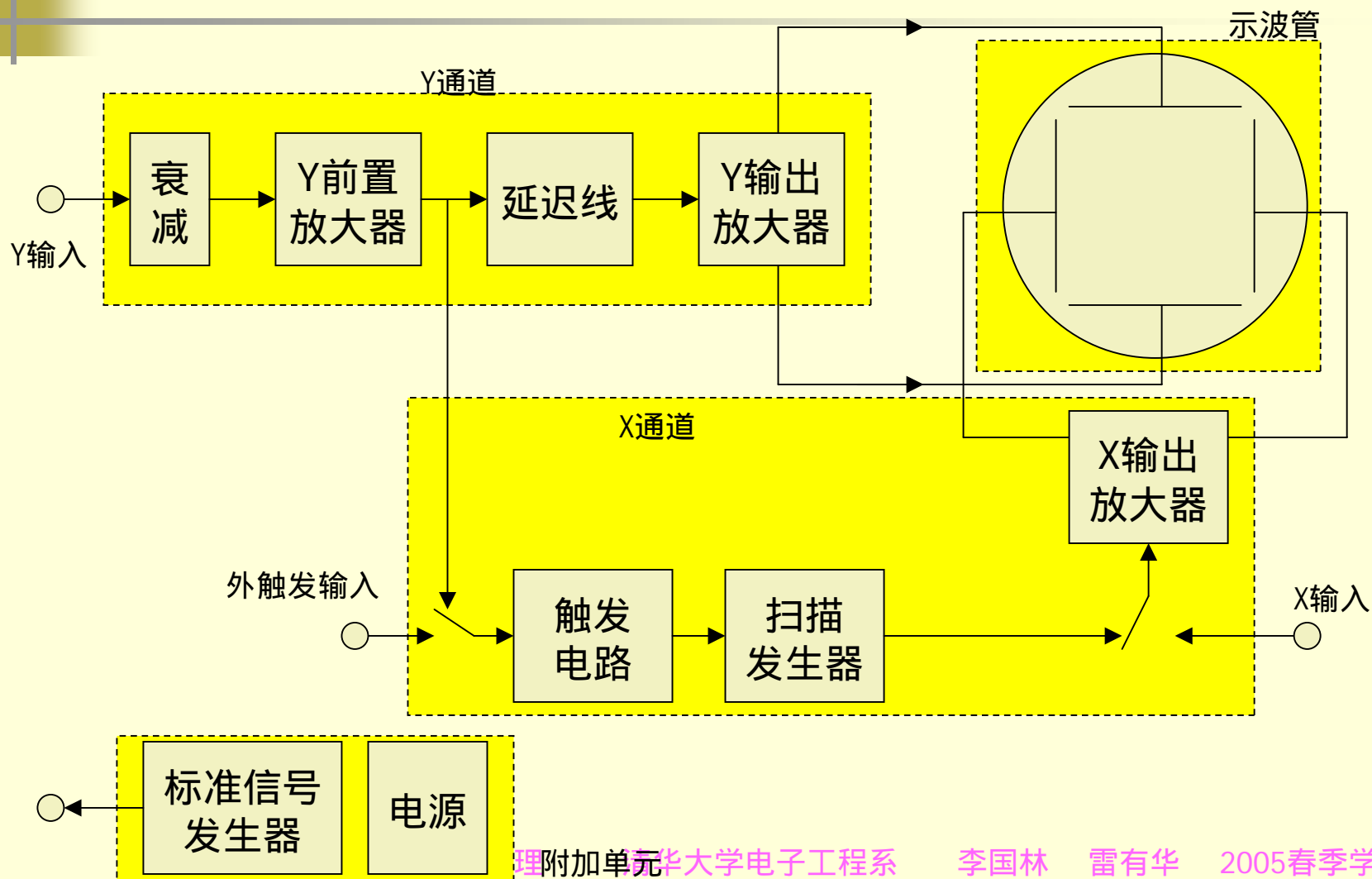
- 荧光：通过多层次辉度或彩色可显示长时间内信号 DPO, Digital Phosphor Oscilloscope

■ 混合信号示波器 MSO, Mixed Signal Oscilloscope

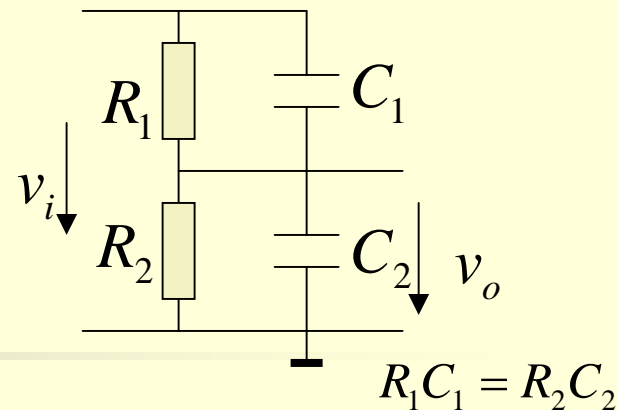
- 把数字示波器对信号细节的分析能力和逻辑分析仪多通道定时测量能力组合在一起，可用于分析数模混合信号交互影响



3.1 模拟示波器

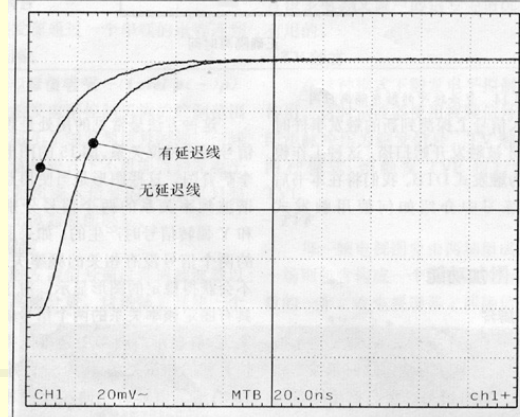


衰减器和放大器

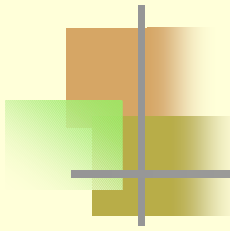


- 示波管的偏转灵敏度是固定的，为了扩大可观测信号的范围，Y通道有衰减器和放大器，以便把信号幅度变换到适于示波管观测的数值
 - 衰减器可保证示波器可观测大信号
 - 衰减器应该是宽带的
 - RC分压网络，减小分布电容影响
 - 放大器可保证示波器可观测微弱信号
 - 放大器应该是宽带的，可差分输出
 - 负反馈提高带宽
 - 差分输出中若有直流分量输出，则可用于改变Y轴位置（‘Y轴位移’旋钮）

延迟线



- 触发扫描发生器只有当被观测信号到来时才工作，也就是说启动触发开始扫描需要一定的电平，因此扫描的开始时间总是滞后于被观测脉冲一段时间，于是脉冲的上升沿就无法被完整地显示出来，因为此时扫描尚未启动
- 延迟线的作用就是把加到Y偏转板上的脉冲信号延迟一段时间，使信号出现的时间滞后于扫描开始时间，这样就可以保证屏幕上可以扫出包括上升沿的全脉冲波形
 - 延迟线应只起到延迟时间的作用，脉冲通过它后不应产生失真
 - 延迟线可采用多节LC延迟网络组成



模拟示波器的多波形显示

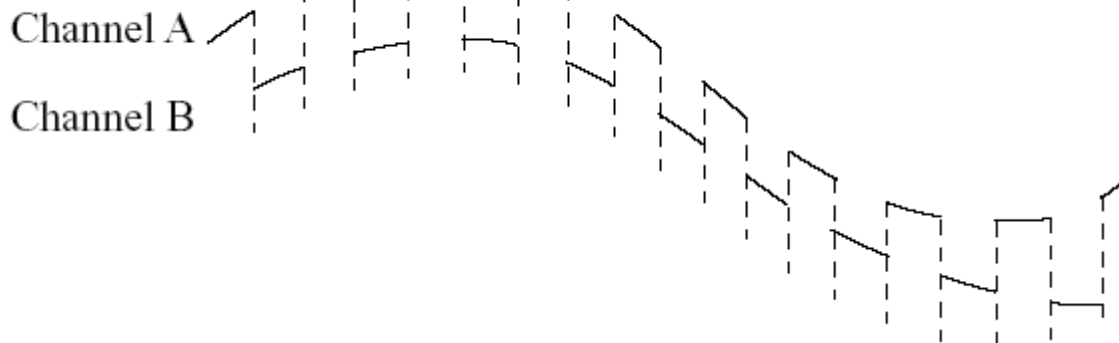
- 在示波测试中，常常需要同时观测比较电路中若干点间信号的幅度、相位和时间通过网络后的相移和失真情况
- 有时即使只观察一个脉冲序列，也希望把其中某一部分拿出来，在时间轴上予以扩展，在荧光屏的另一位置同时显示，以便在观测如脉冲序列的同时，还能观测其细节部分
- 这些都需要在一个荧光屏上能同时显示几个波形
 - 常见的方法有多线显示、多踪显示及双扫描显示



多线显示

- 多线示波器有多个相互独立的电子束
- 常见的双线示波器，其示波管内的电子枪可产生两个电子束（两个电子枪或一个电子枪），并有两套X、Y偏转系统
 - 其中对X偏转往往采用相同的扫描电压，对Y通道常接入不同的信号，并可分别调整灵敏度、位移、聚焦、辉度等
- 示波器工艺要求高，价格贵

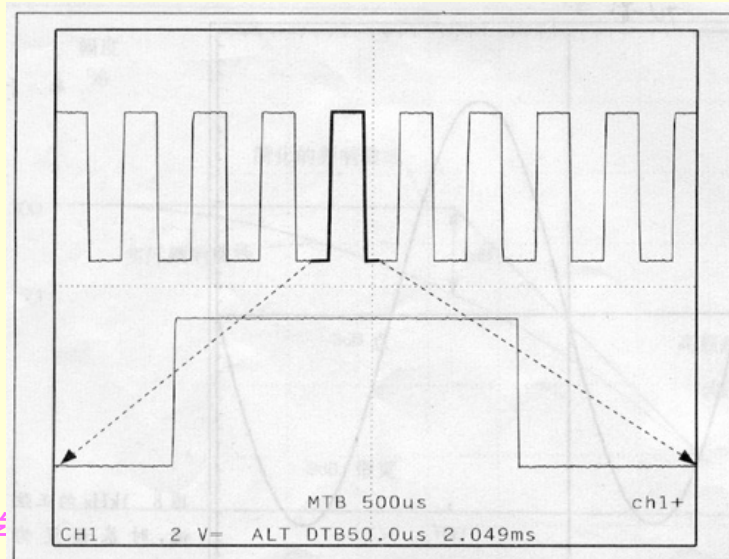
多踪显示

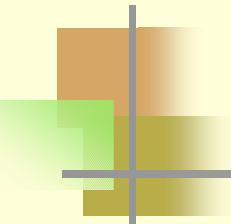


- 与普通示波器类似，在电路中多了电子开关并具有多个垂直通道。电子开关在不同时间里，分别把两个垂直通道的信号轮流接至Y偏转板，从而在荧光屏上显示多路波形
 - 交替方式 ALT
 - 第一个扫描周期令A路接通，第二个周期令B路接通，周而复始，交替显示
 - 断续方式 CHOP
 - 开关信号分别对两个被测信号波形轮流实时采样，每个扫描周期同时显示两个信号波形，利于观测低频信号

双扫描显示

- 双扫描示波器具有两个独立的触发和扫描电路，两个扫描电路的扫描速度可以相差很多倍，适合与观察一个脉冲序列的同时，对其中部分脉冲细节进行考察
- 双时基工作
 - 主时基MTB
 - 延迟时基DTB





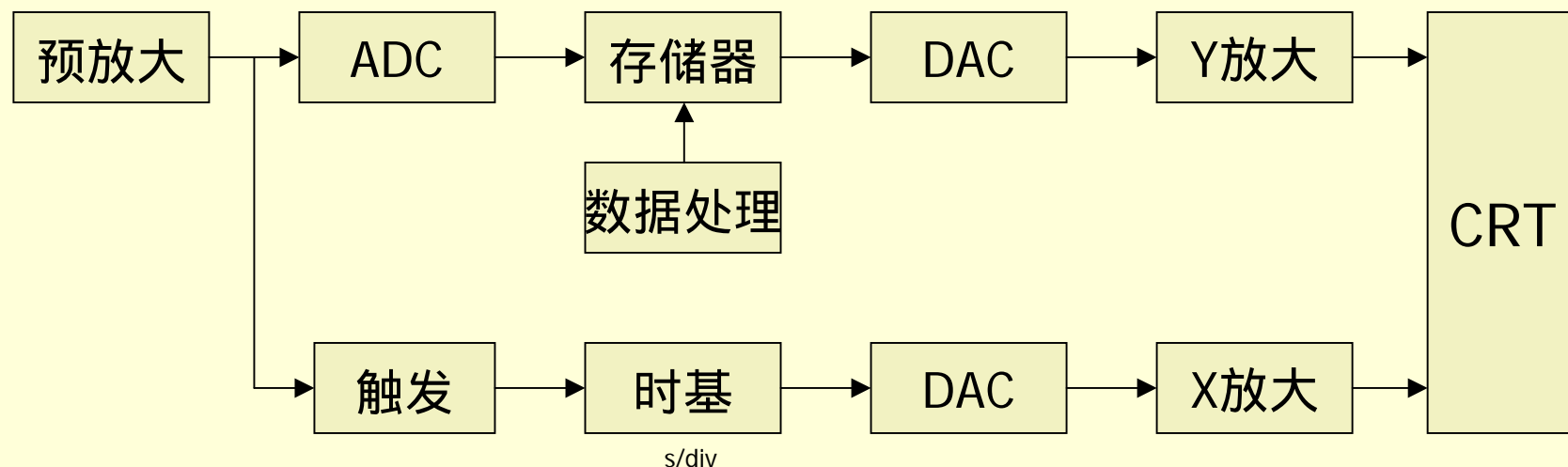
模拟示波器的缺点

- 通道一般受限为2路
- 没有波形保持保存功能
- 波形记录需要照相机
- 触发能力有限
- 几乎没有数学处理能力

- 永久存储，反复读出，迹线不会模糊
- 波形记录、显示、分析和更新，自动测量脉冲宽度、上升时间、及统计参数等
- 触发点为参考点，可观察触发前后的数据

3.2 数字存储示波器

■ Digital Storage Oscilloscope : DSO



- DSO能截获、观察短暂而单一的事件，将重复率低抖动现象固定下来，对不同波形进行比较，对偶发事件进行监测、记录和保留，可分析复杂的瞬变过程

信号采样

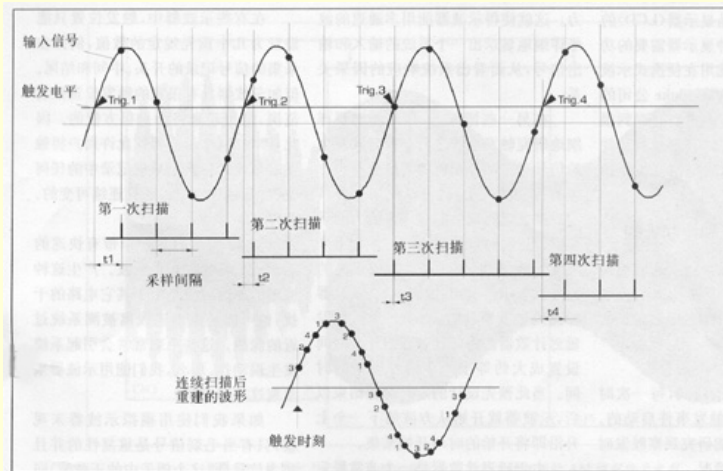
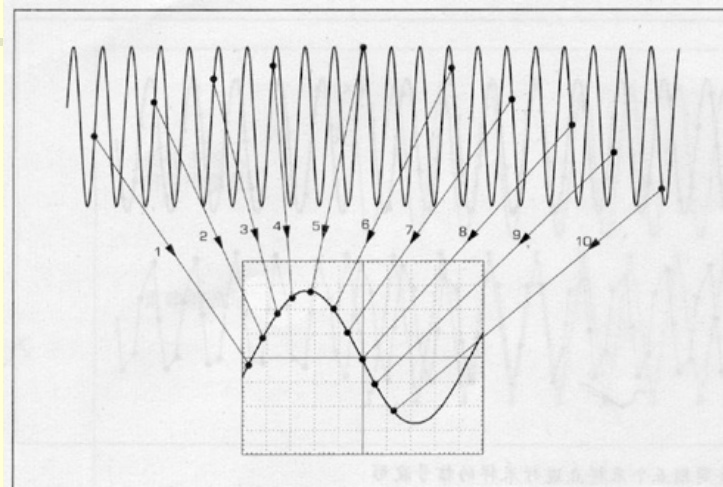
■ ADC之前需要采样

■ 实时采样：real-time sampling

- 采样速率足够高，保证足够多的数据以正确恢复波形
 - 多用于获取非周期性信号或单一短暂发生的信号

■ 等效时间采样：equivalent-time sampling

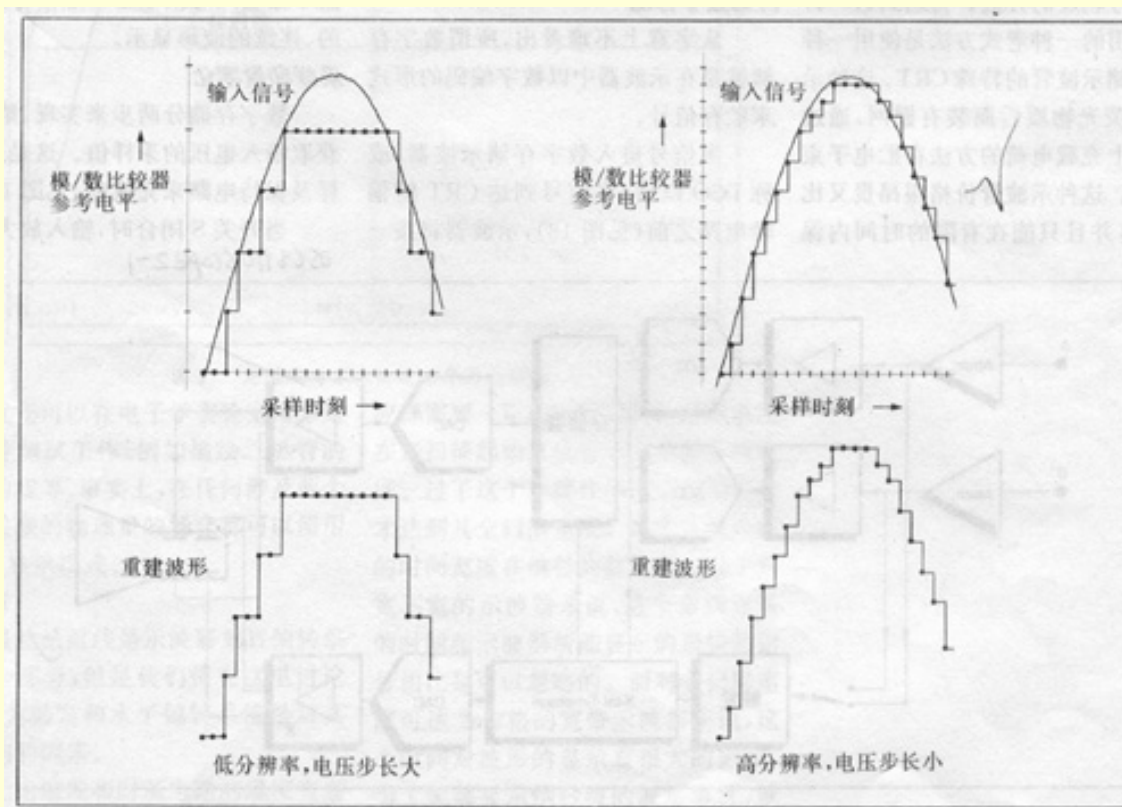
- 对于周期性信号，可在多个周期内获取一个周期信号，只要采样点不重复，就可以重构一个完整的时域波形
 - 虚拟的等效的高采样速率

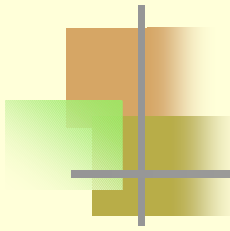


垂直分辨率

- 垂直分辨率指的是ADC对电压的分辨率，ADC位数越高，垂直分辨率就越大，示波器上波形显示的信号细节就越小

- 增加垂直分辨率的限制因素是成本问题





水平分辨率/时基

- 数字存储示波器中，水平系统的作用是确保输入信号采集足够数量的采样值，且采样点取自正确的时刻
- 构成一个波形全部的采样称为一个记录，用一个记录可以重建一个波形，示波器可以贮存的采样点数称为记录长度
- 例如：时基设置为 1ms/div ，每格有50个样点，则采样间隔为 $(1\text{ms/div}) / (50\text{S/div}) = 20\mu\text{s/S}$ ，采样速率为 $(20\mu\text{s/S})^{-1} = 50\text{kS/s}$



采样速率

- 单位时间的采样次数：20MS/s
- 采样频率：20MHz
- 信息率，每秒存储的bit位数：160Mb/s

- 例：某DSO有1024个波形记录存储单元，扫描长度为10个单位刻度，而时基设置为10us/div，于是采样速率为
 - $1024 \text{ 个采样点} / (10 \text{ 格} \times 10 \mu\text{s 每格}) = 10.24 \text{ MS/s}$



波形显示

- 信号波形被采样数字化存储和处理后，如何复现？
 - 点显示法
 - 一个周期需要20 - 25个点
 - 数据点插入法
 - 点线连接法（线性插入法）
 - 正弦波信号至少10个点波形
 - 正弦内插
 - 给出最佳拟合正弦（幅度频率可变）曲线
 - Sinx/x 插入法



DSO的触发模式

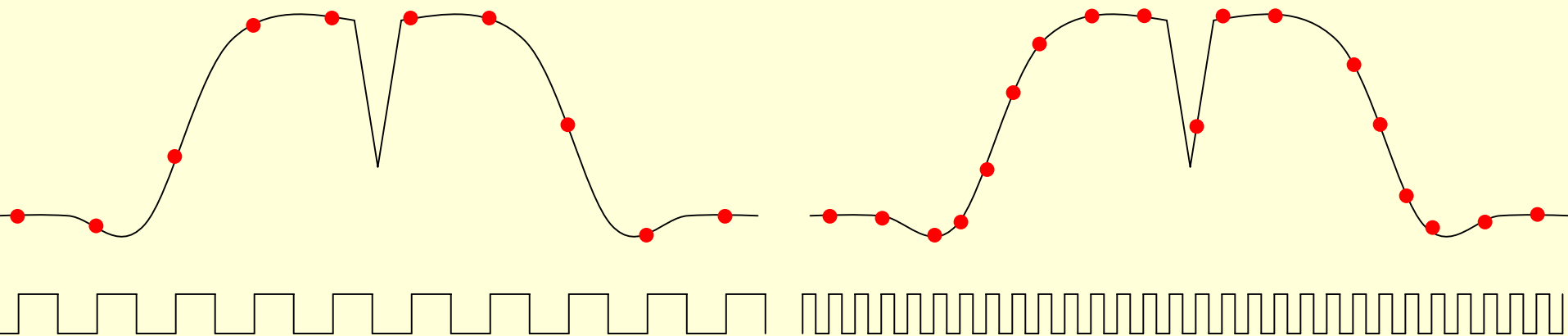
- DSO有模拟示波器所没有的触发控制模式
 - 预触发和后触发
 - 毛刺捕捉
 - 特殊触发
 - 图样触发：特殊图样出现则触发：HHLH
 - N次周期触发：观测第N个周期的脉冲的细节
 - ...



毛刺捕捉

- 用模拟示波器观察叠加了毛刺的波形时，只有当毛刺信号是重复的并且和主信号同步，才可能看到，或者有可能出现很多毛刺的朦胧形象
 - 毛刺多偶尔发生，且一般和主信号不同步
- DSO的采样间隔比毛刺宽度大，就不一定能够捕捉到毛刺
 - 峰值检测

毛刺捕捉



■ 正常模式下难以捕捉的尖峰可以采用峰值检测模式来捕捉到

■ 峰值检测：连续检测，一段时间内的最大最小值存储起来



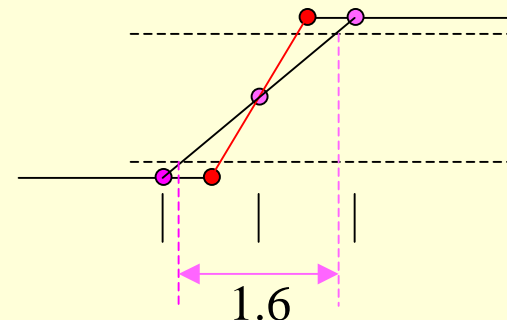
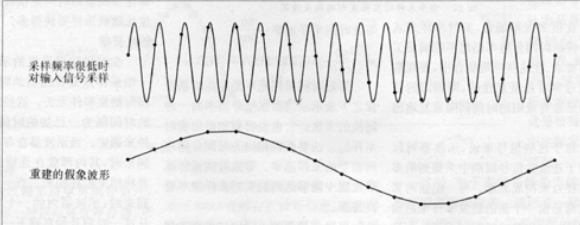
数据处理

- 数据处理往往由计算机完成，但新的示波器内部附加了DSP可以实现部分处理功能
 - 平均：多次扫描平均，提高分辨率
 - 数字滤波：一次扫描临近点平均
 - 样板测试：是否和样板一致，pass/fail
 - FFT
 - 波形相乘：电压*电流=功率
 - 积分：求面积
 - 微分：摆率



接口

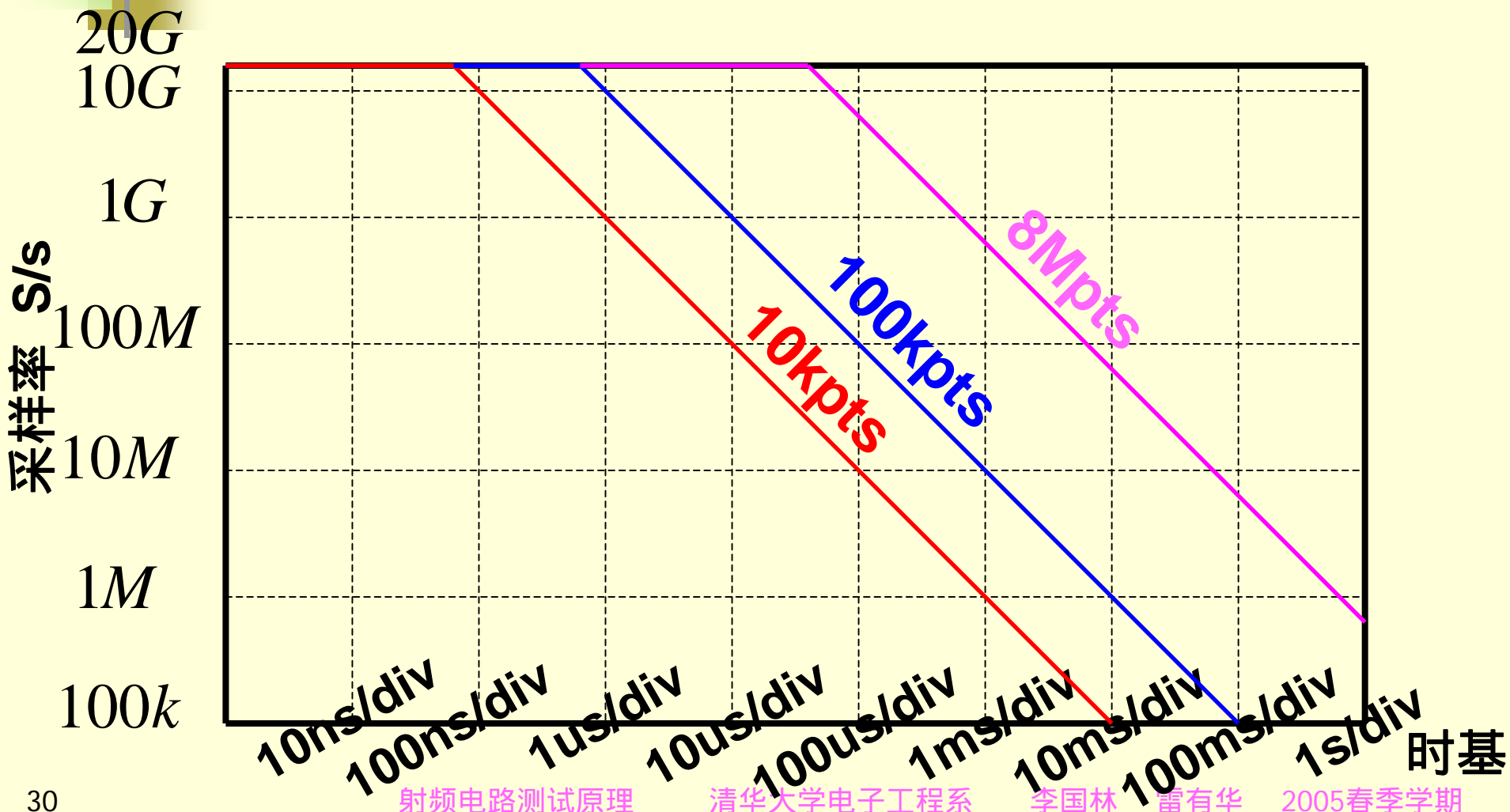
- 在很多情况下，需要把示波器中存储的信号传送到PC机中，或者希望用PC机控制示波器，这需要示波器具有通信能力
- 常用的接口有两种，RS232和GPIB，选件
- RS232
 - 串口，一台PC机连接有限台仪器
- GPIB
 - IEEE488，并行总线，多台仪器同时连接到一条总线上，GPIB插卡，组成测试系统



数字示波器的问题

- 采样速率
 - 如果小于信号带宽的2倍，则会出现混迭现象
- 上升时间
 - 和采样速率（采样间隔）有关，和采样点位置有关
- 存储深度
 - 如果存储器深度不够，则必须降低ADC采样率以捕捉整个信号，或者保持最高采样率而不能记录完整的信号

采样率*观测时间≤存储深度



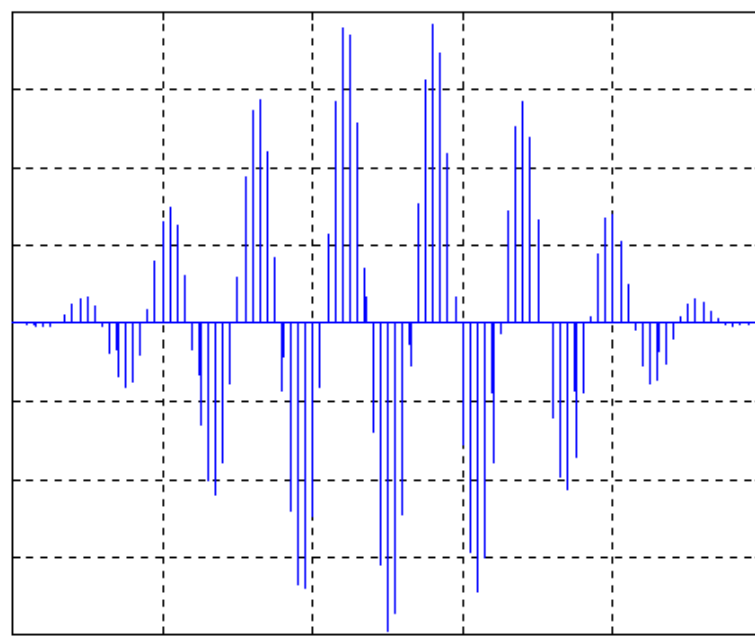
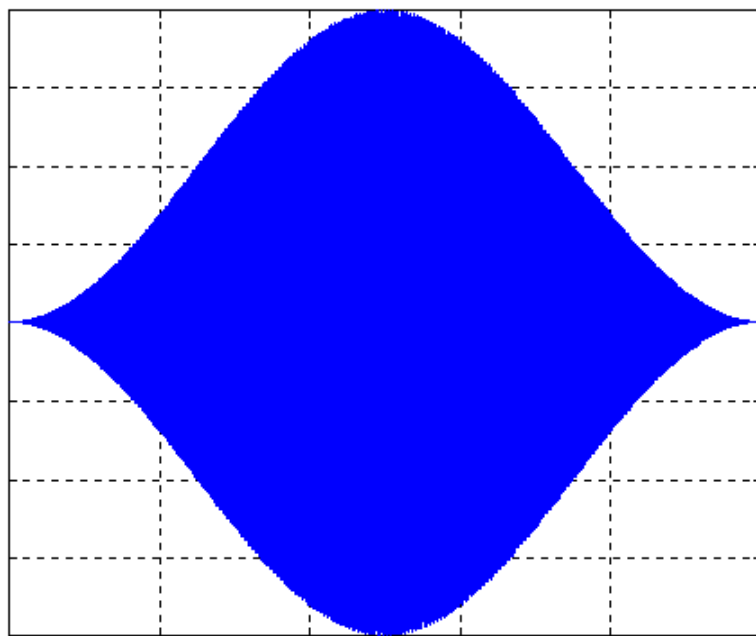


模拟示波器，还是数字示波器

- 模拟示波器和DSO都能很好地观察简单重复性信号
 - 模拟示波器：CRT余辉时间短，难以显示低频信号；扫迹亮度和扫描速度成反比，快速上升下降时间的低重复率信号难以看到。而DSO扫迹亮度和扫描速度与信号重复率无关
 - 信号参量测量时，DSO具有自动测量的能力，模拟示波器必须手动设置光标，人工读数并对波形进行人工分析
 - 模拟示波器实时更新显示，而DSO是数据的重建波形，不利于系统调整时测试

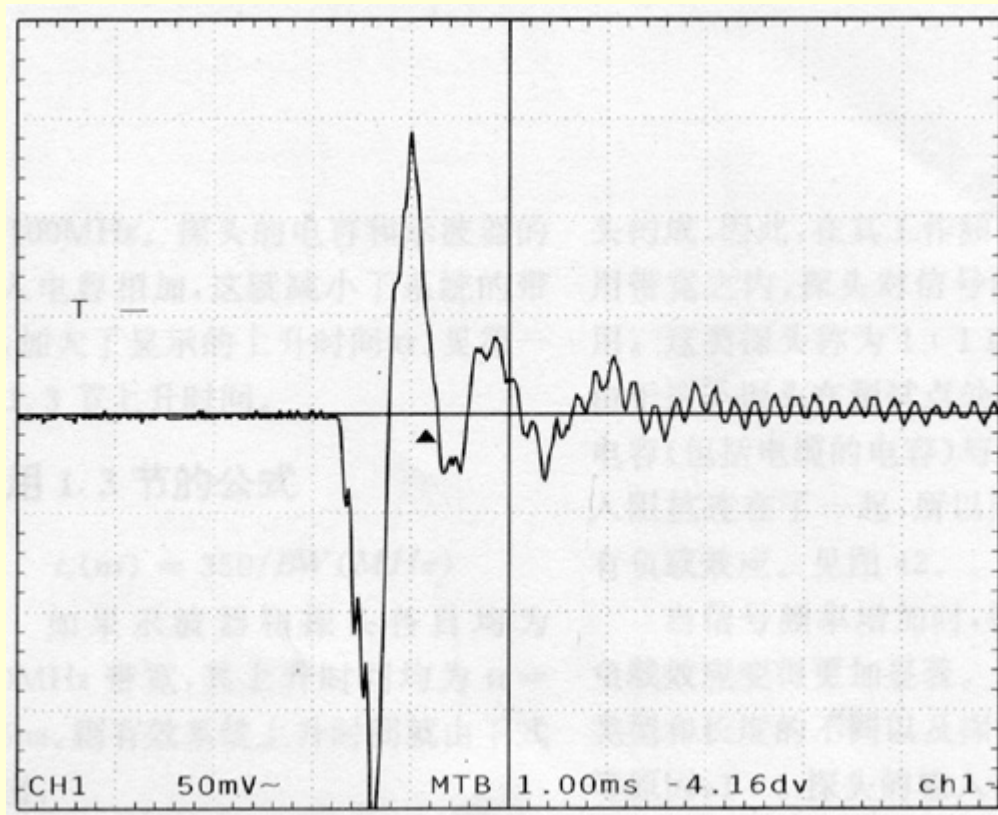
模拟示波器，还是数字示波器

- 对于复杂的重复性信号，如调制信号，由于模拟示波器具有很高的扫描次数，亮度正比于信号持续时间，因而可以很好地显示出调制情况，而且可以立即显示系统调整情况，而DSO可能显示出不符合实际调制情况的波形来



模拟示波器，还是数字示波器

- 非重复性信号和瞬变信号，是DSO展示其强大能力的时机，DSO可以捕捉罕见的一次性事件，并可永久显示
 - 罕见事件可以是干扰引发的，DSO的预触发能力可以显示干扰的前因





模拟 / 数字示波器

- 把模拟示波器和数字存储示波器两者的能力和优点结合于一台仪器
- 两个模式之间可以转换
 - 设置为数字存储示波器时，可以进行自动参数测量，存储采样波形
 - 设置为模拟示波器时，可进行无限分辨率的波形显示

3.3 混合信号示波器

■ 多通道

- 2/4个模拟通道（数字存储示波器），16/32个数字通道（逻辑分析仪）



■ Agilent MegaZoom

- 在示波器内部数据处理中增加一个专用ASIC芯片，可以进行并行数据处理，将显示数据传至屏幕同时存储其他数据，这样便大大提高了响应速度，即便在最深存储条件下也可无延时地快速工作

■ 高的采样率

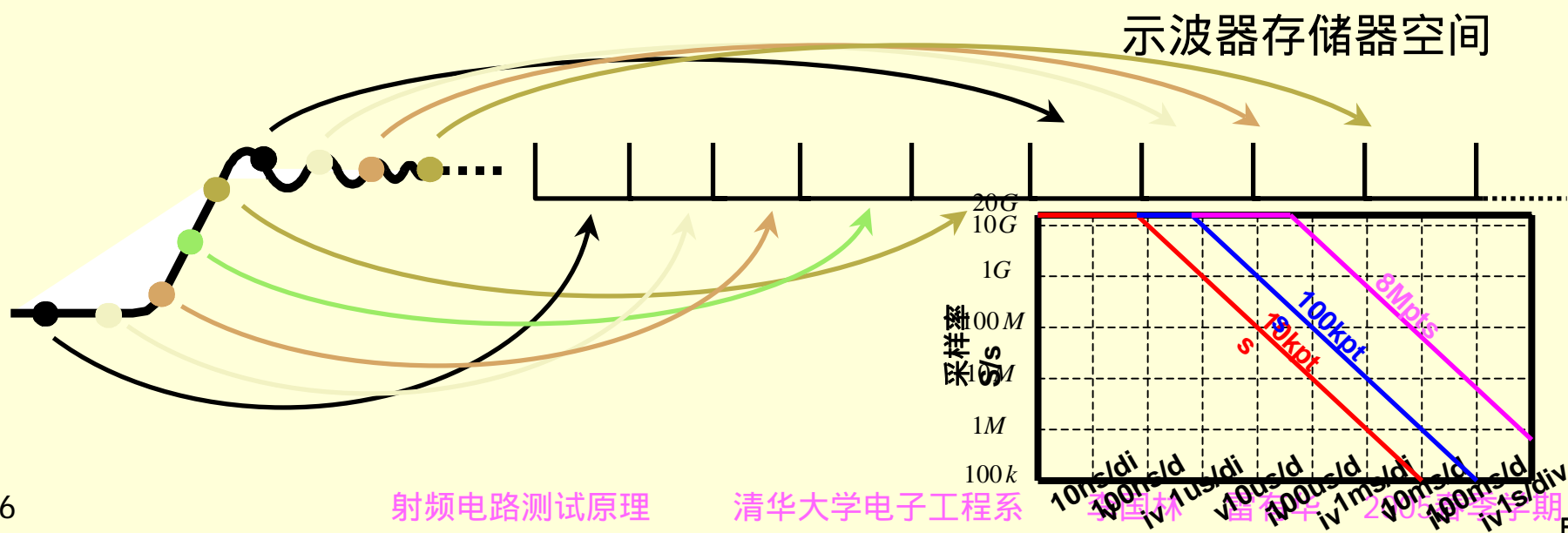
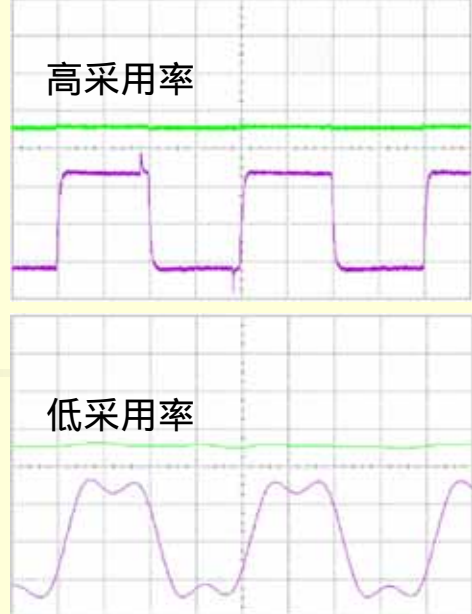
- 准确的信号重建
- 对毛刺和非正常波形的捕捉

■ 长的观测时间

- 波形全局的观测
- 细节的捕捉

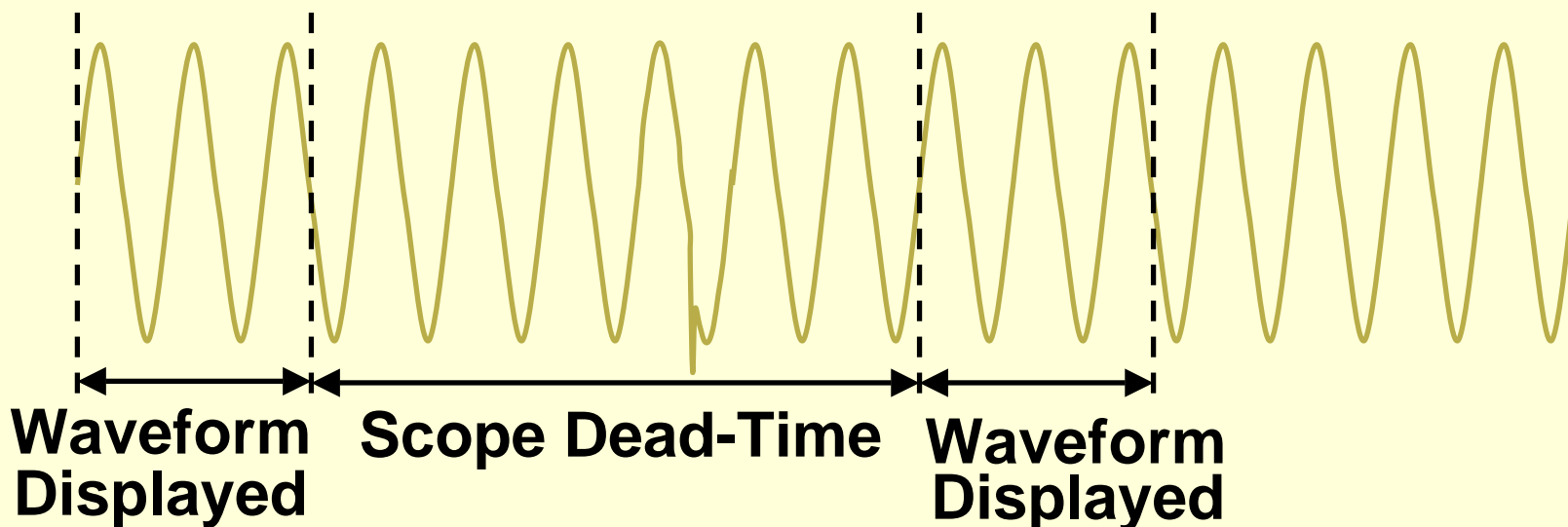
为什么要深度存储器

- 每个样点都必须都存储于内存之中
- 深存储器可以存储更多的样点
- 长的观测时间意味着更多的样点需要存储



深度存储的问题

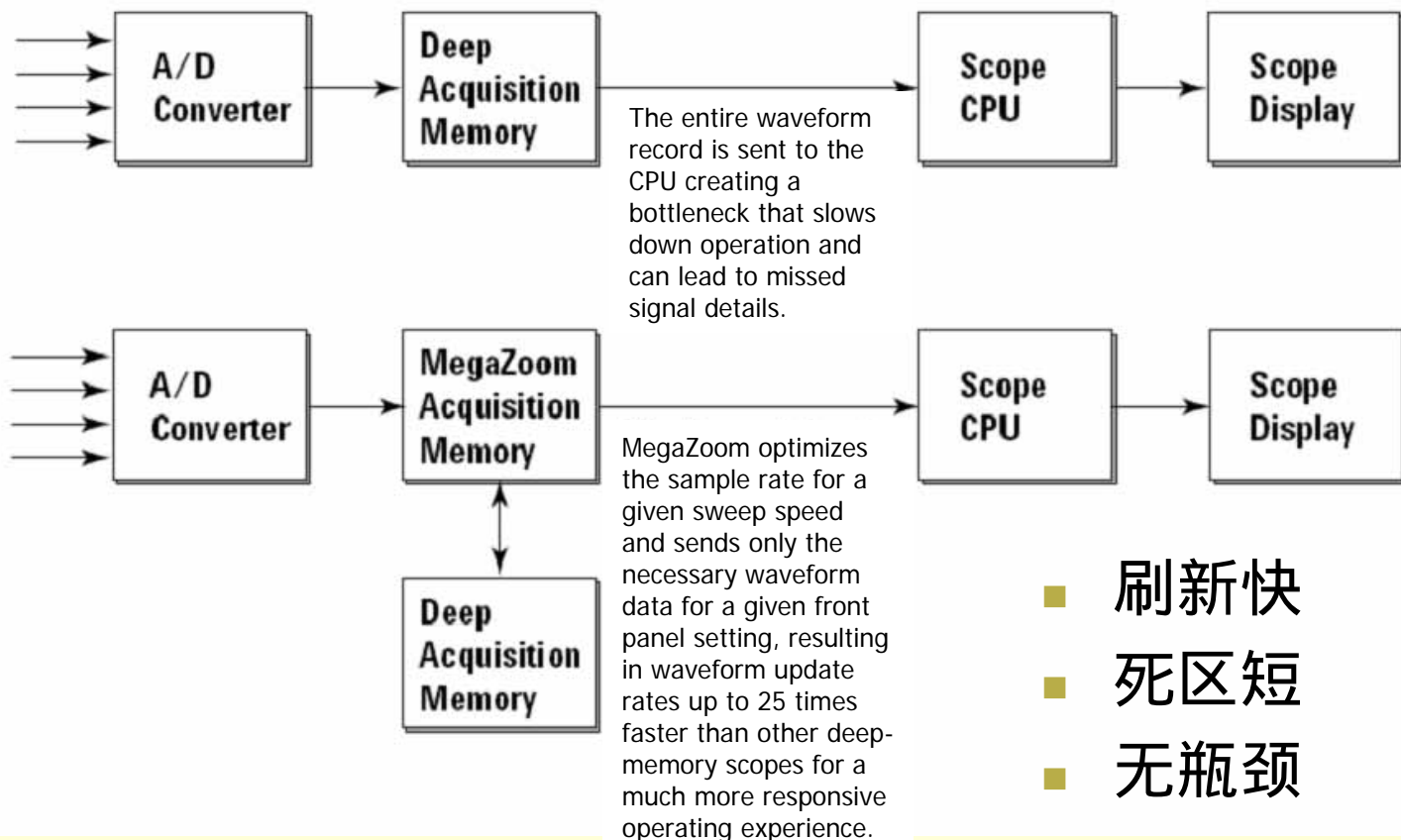
- 波形刷新慢
- 对用户调整反应慢
- 两次采集之间的死区长
- 可能丢失细节



MegaZoom

MegaZoom是一个内存管理方式

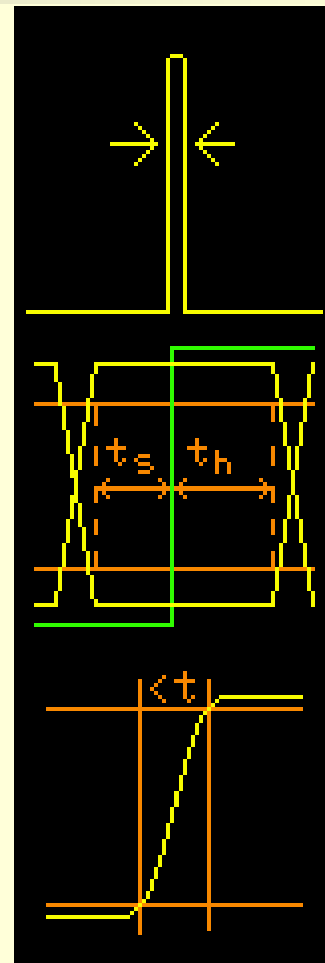
- 内存乒乓使用
- 智能择点显示
- 一直处于高速采样状态



- 刷新快
- 死区短
- 无瓶颈

MSO的触发模式

- Edge Triggering
- Signal Integrity Triggering
 - Pulse Width
 - Setup and Hold
 - Transition
- Parallel Logic Triggering
 - Pattern/State
 - Sequence
- Serial Triggering
 - SPI
 - I²C
 - CAN
 - USB



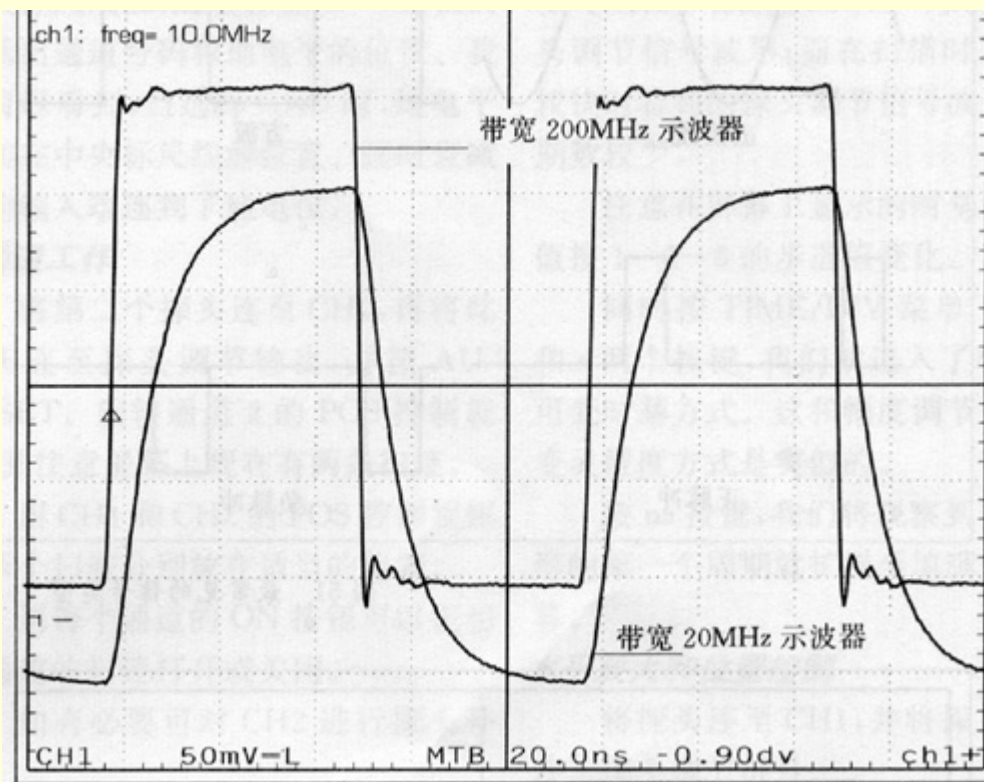


四、示波测量

- 示波器可以测量的两个基本量是电压和时间，从这两个量出发，用手工的方法使用光标或者用自动的方法进行所有其他波形参数的测量
 - 电压
 - 时间
 - 相位

带宽的选择影响波形的显示

- 如果用一台上升时间比被测信号上升时间快10倍的示波器进行测量，示波器本身的上升时间对测量的影响几乎可以忽略，如果两者相当，测量误差可高达41%



电压测量

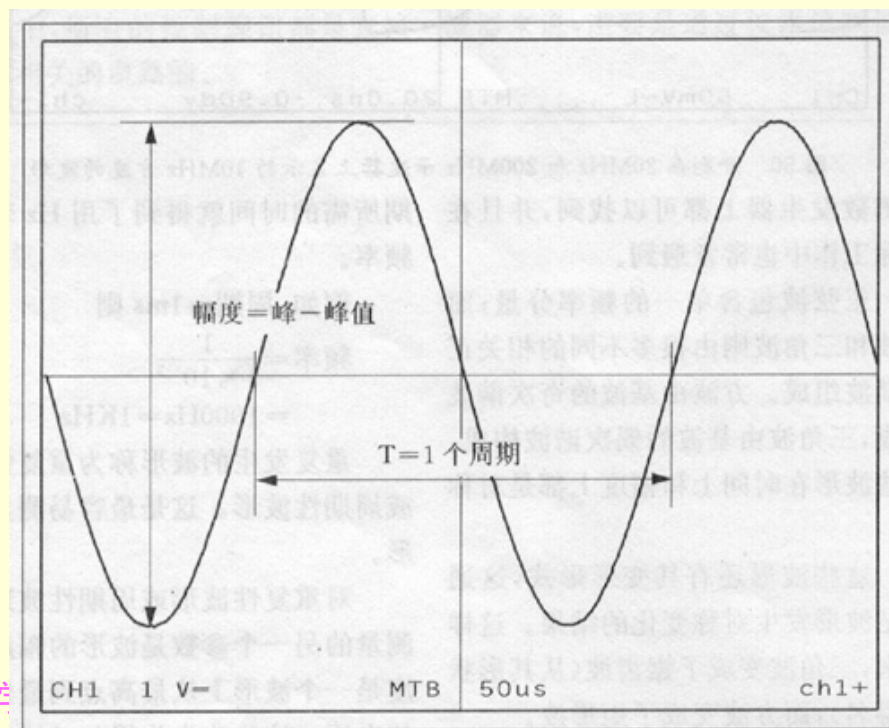
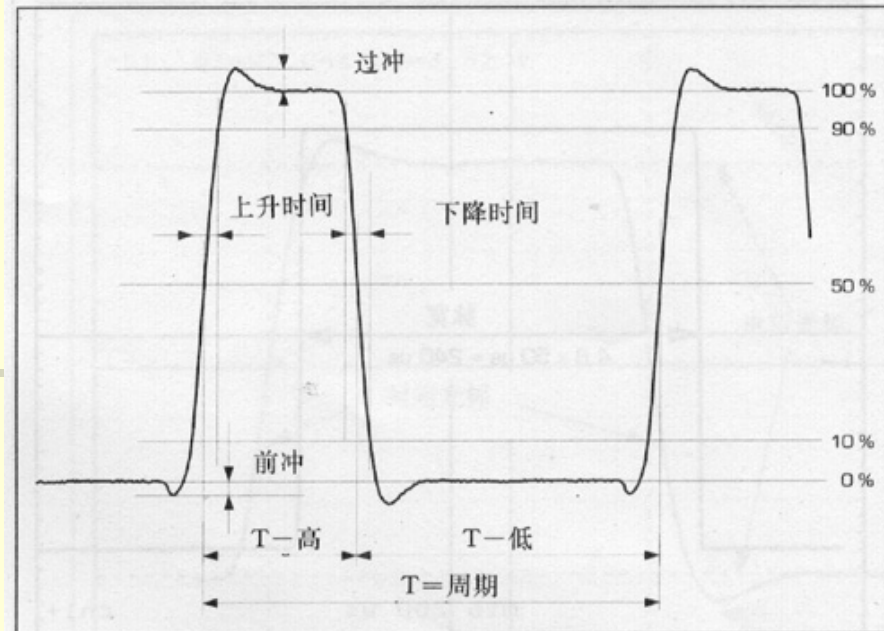
- 可以测量各种波形的电压幅值，脉冲波形的上冲、下冲等

- 直接测量

- 直接从示波器屏幕上读出被测电压波形的高度，换算为电压值

- 比较测量

- 用已知电压值的信号波形与被测信号电压波形比较，估算测量值



时间测量

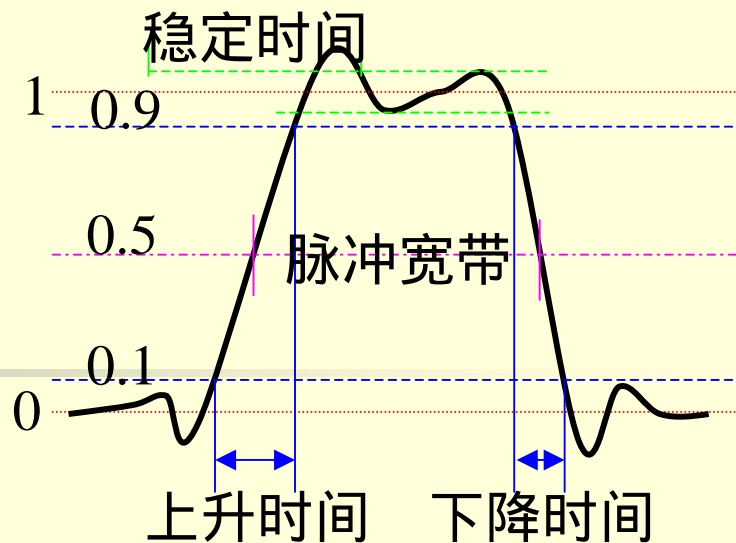
■ 直接测量

■ 水平轴为时间轴

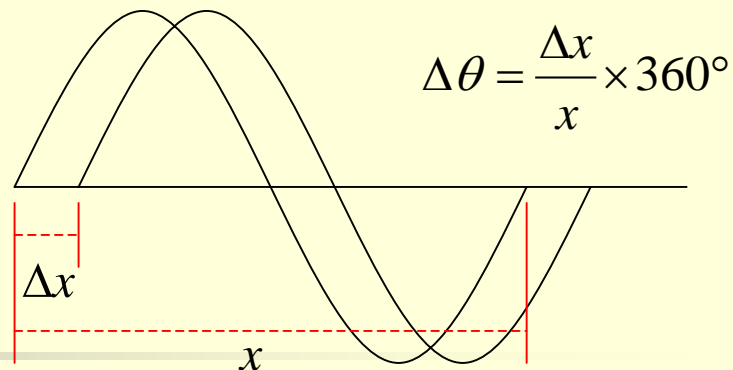
- 精度取决于扫描电压的线性度

■ 时标法

- 将时标发生器产生的周期方波或正弦波信号加到示波管的控制栅极和阴极之间进行辉度调制，只要时标信号周期远小于被测信号周期，那么屏幕上的光辉出现明暗间隔的时间标记，两个亮点之间的间隔为时标周期



相位差测试



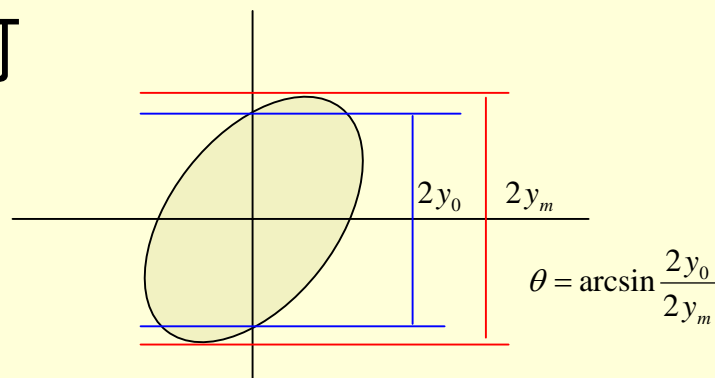
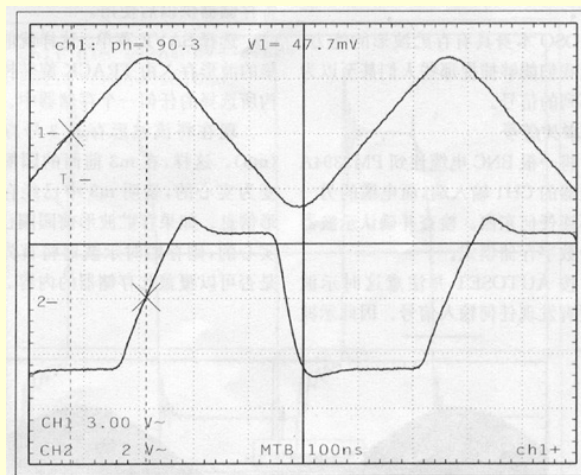
■ 线性扫描法

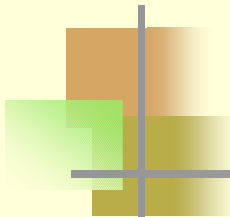
- 双踪示波器，触发信号统一保证统一的参考点

■ 李沙育图法

- 把两个正弦波分别加到示波器的X和Y通道，可得到椭圆

- 椭圆





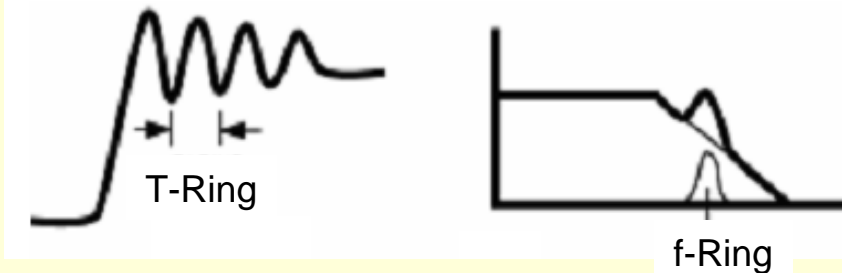
自动测量

- 模拟示波器用户只能手动测量，使用DSO时，可进行自动测试
 - 脉冲：上升时间，频率，幅度
 - 信号比较：放大器输入输出信号两个信道信号比较；存贮波形和新采集波形间比较
 - 统计测量：最小值，最大值，平均值，直方图



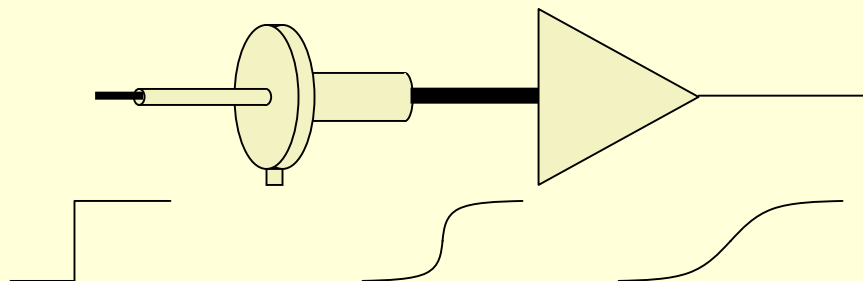
五、示波测试的基本问题

- 示波器的频响特性
 - 频响特性、带宽、采样率
- 探头
 - 带宽、地线、负载效应
- 示波器选择
 - 多方面考察



5.1 频响特性

- 线性系统的频响特性直接决定了系统的输出波形特征
- 示波测量中，信号首先通过探头，再进入示波器（垂直放大器）中，每通过一个非理想线性系统，信号都会产生线性失真
 - 对阶跃信号而言，上升沿上升速率将会逐级降低，并有可能产生振铃等严重失真现象



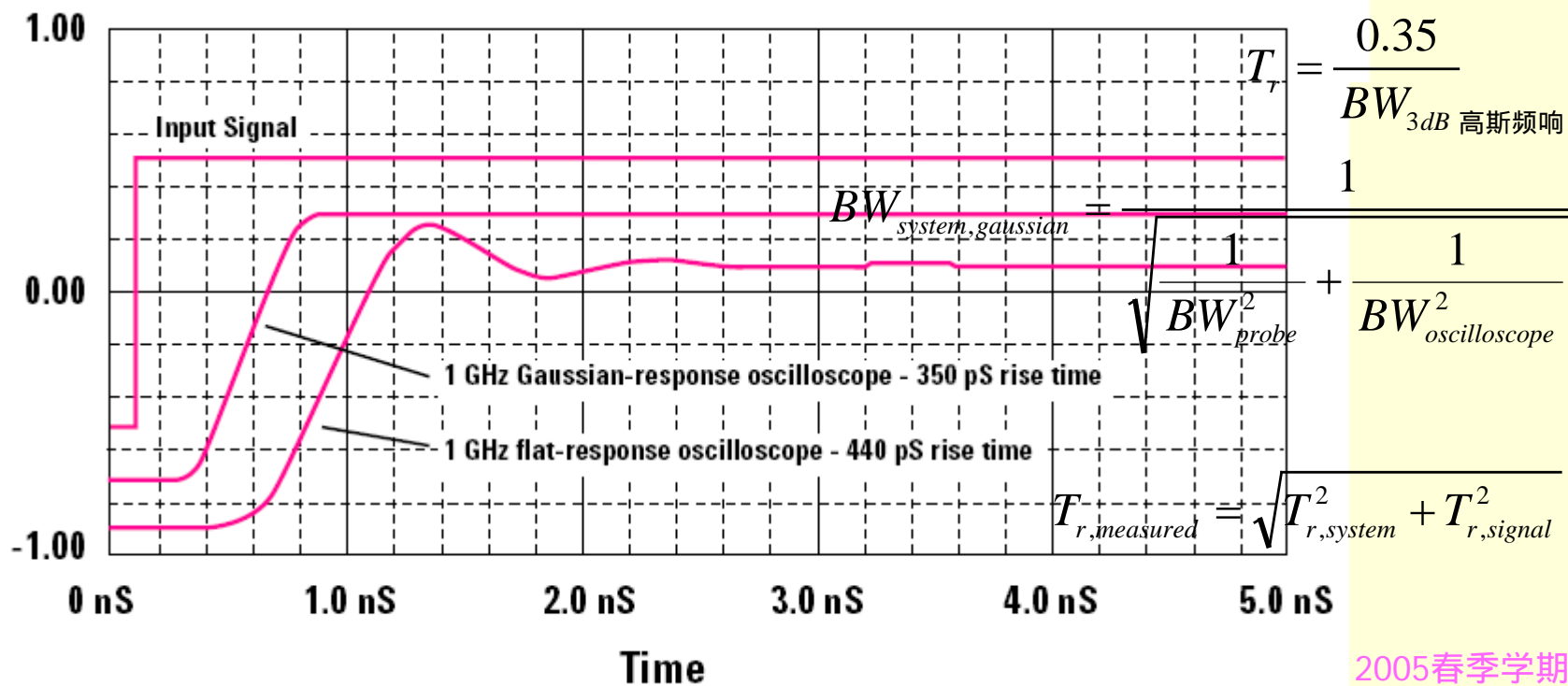
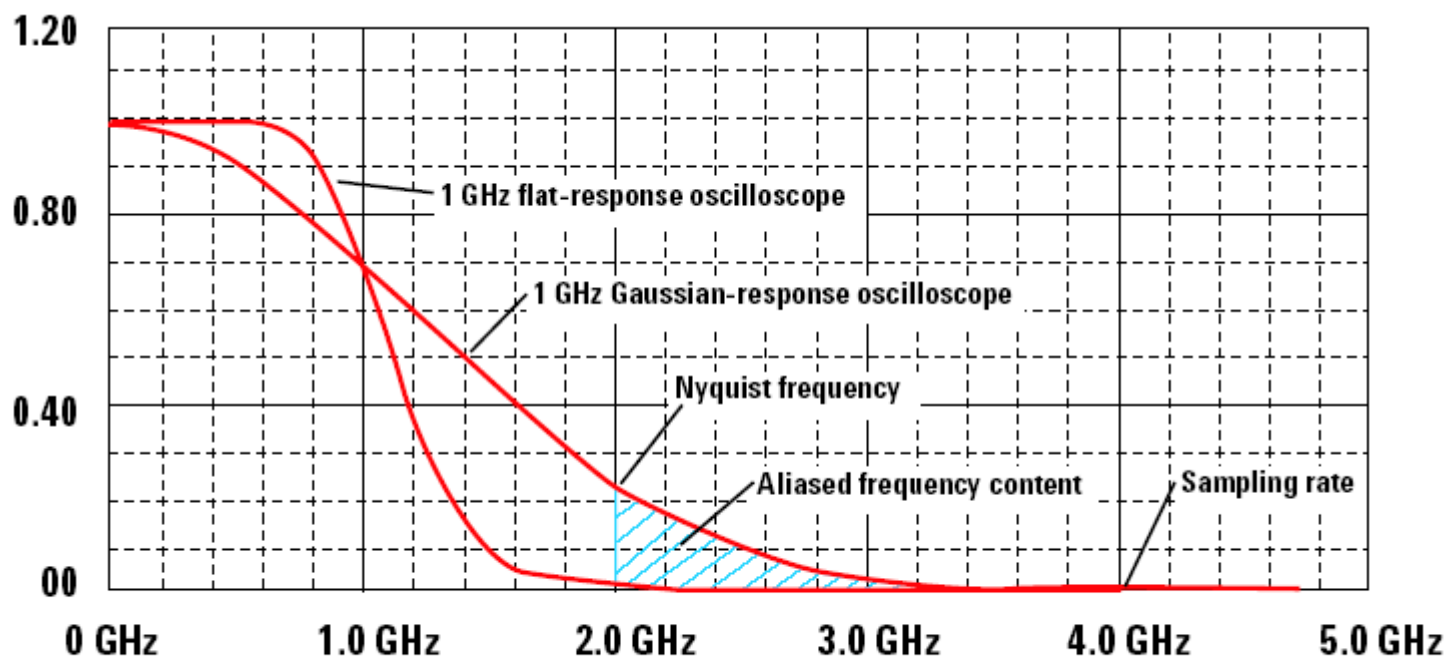


示波器的频响特性

- 当多个具有相同频率响应的电路级联时，你将得到Gaussian频响特性
 - 传统的模拟示波器从输入放大器开始，需要近千倍的放大倍数，级联数个电路直至CRT，整个频响特性具有高斯频响特性
- 对现在目前常见的数字示波器而言，其频响特性是最大平坦频响特性
 - 数字示波器模拟电路的级联级数少
 - 数字示波器采用采样数字化技术，将可能产生模拟示波器不存在的混迭问题，而最大平坦响应可以减小这种混迭

频响特性和阶跃响应上升时间

高斯频响具有良好的阶跃响应特性，不存在过冲



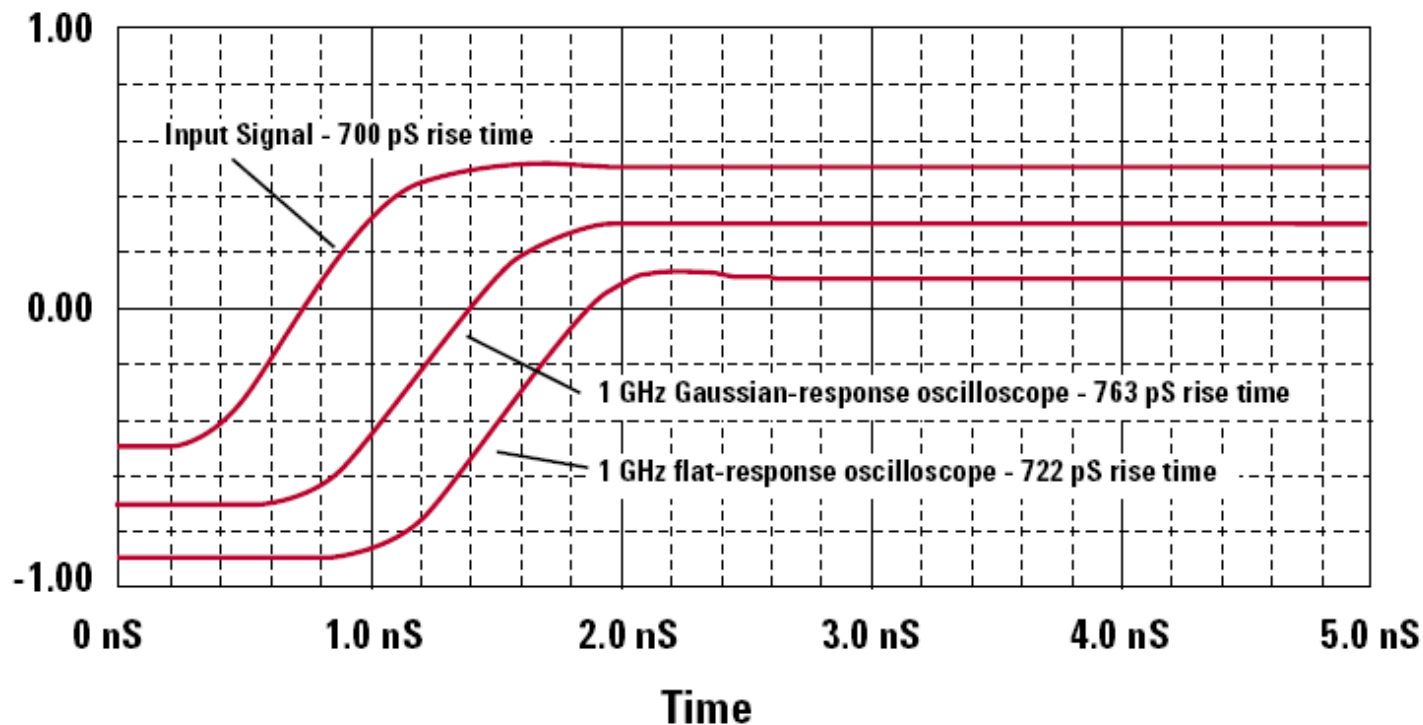
$$T_r = \frac{0.4 \sim 0.5}{BW_{3dB}} \quad \text{最大平坦频响}$$

最大平坦响应示波器特性

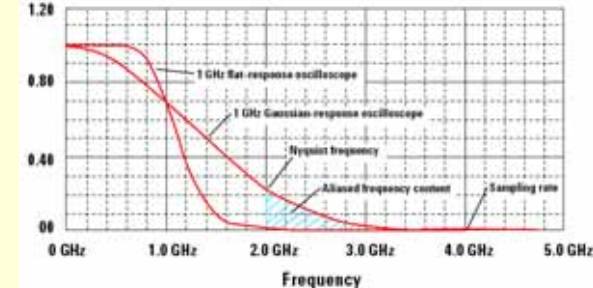
最大平坦响应的好处

- 3dB带宽以内的信号几乎无衰减地通过，可以更精确地测量
- 快速的下降有助于减小采样混迭误差

最大平坦响应系统的阶跃响应将会产生过冲和振铃，但如果输入信号不是理想阶跃信号，输入信号上升沿对应的转折频率低于3dB带宽，则不会产生振铃现象



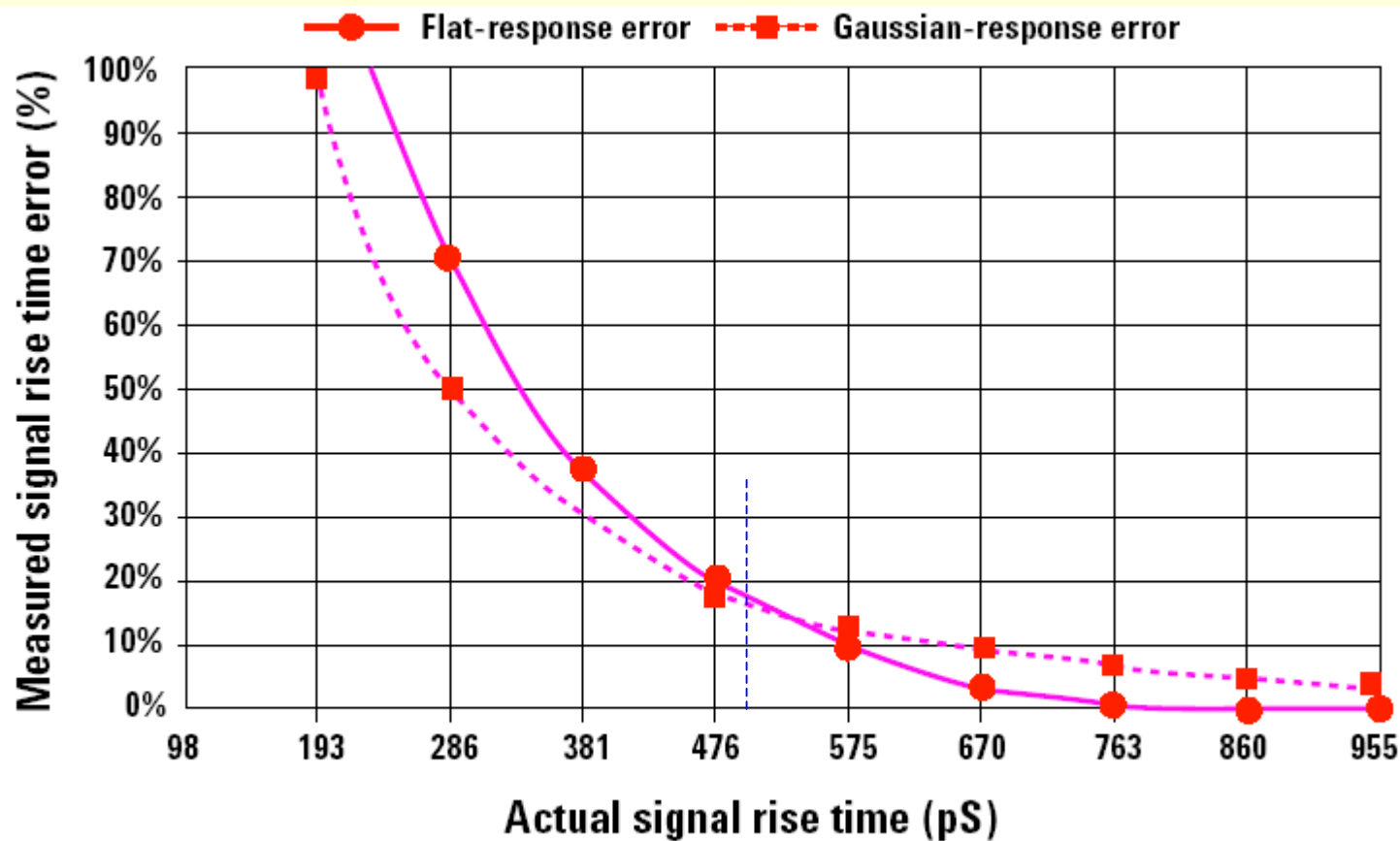
对于上升时间精确的测量 (<15%) , 最大平坦
响应示波器优于高斯响应示波器



可测的最大信号频率

$$T_{r,signal} = 700 \text{ ps}, f_{knee} = \frac{0.5}{T_r} = 714 \text{ MHz} < 1 \text{ GHz}$$

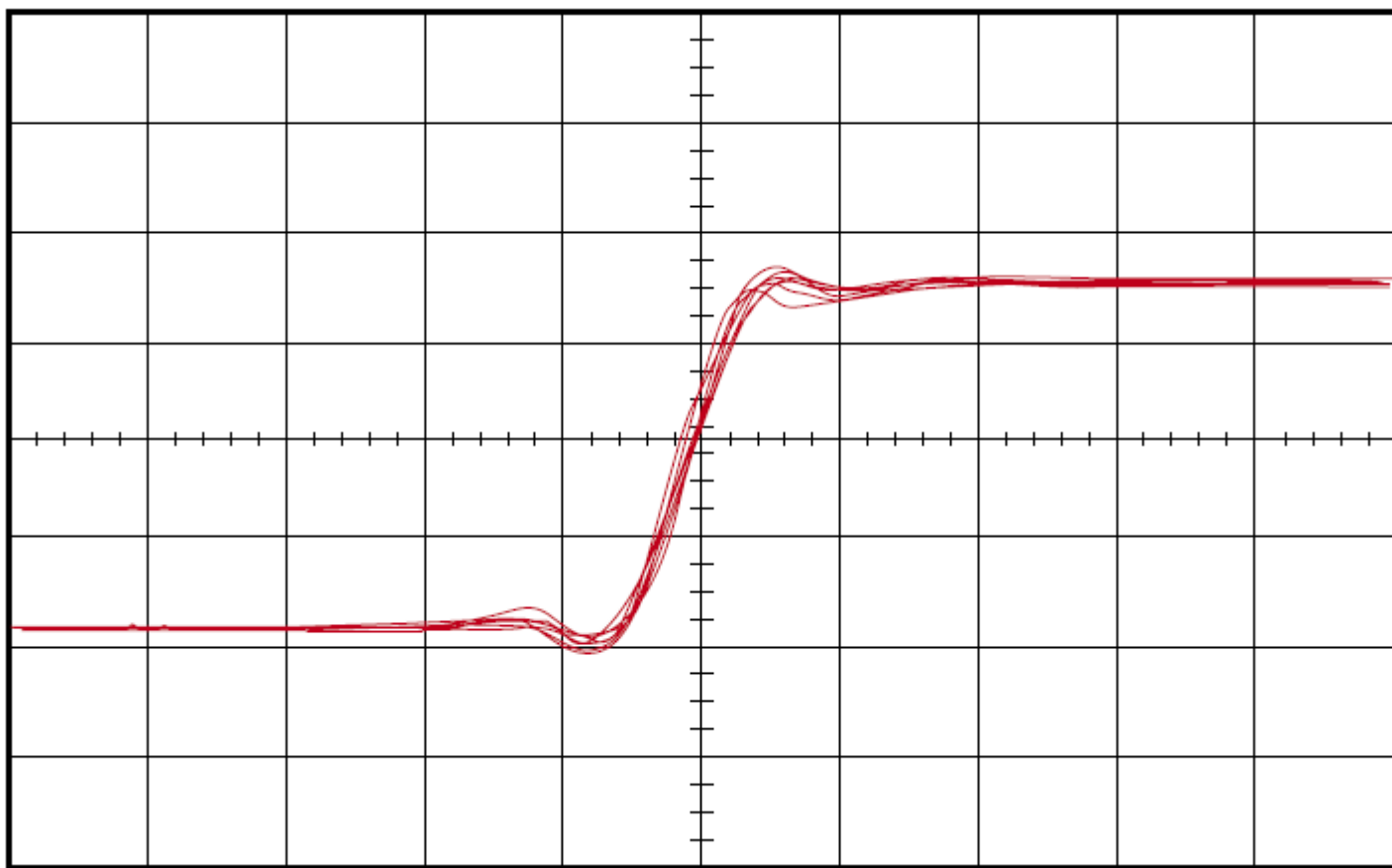
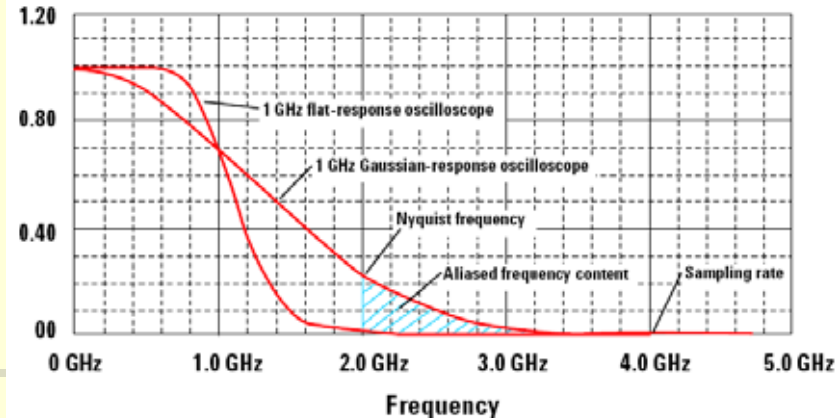
如果转折
频率在
3dB带宽
以内, 那
么最大平
坦响应系
统可以或
得更优的
测量



Rise time measurement accuracy for a 1-GHz bandwidth oscilloscope

采样混迭误差

■ 如果是等效时间采样，不存在混迭，但如果是实时采样，也就是在一个周期内把信号采集完毕，必须考虑混迭误差



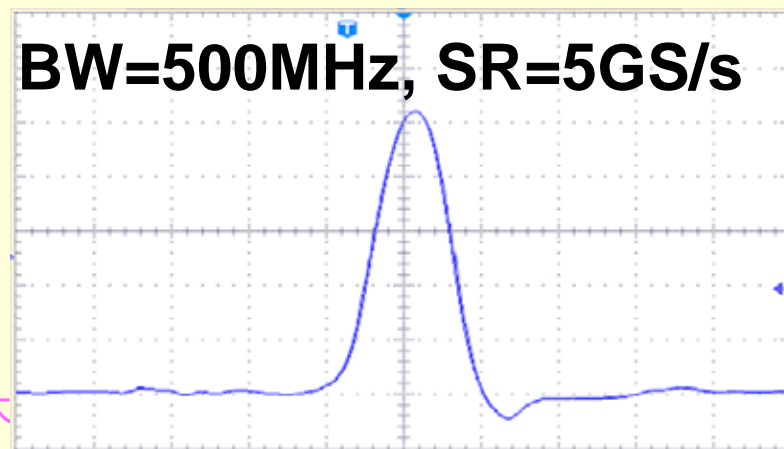
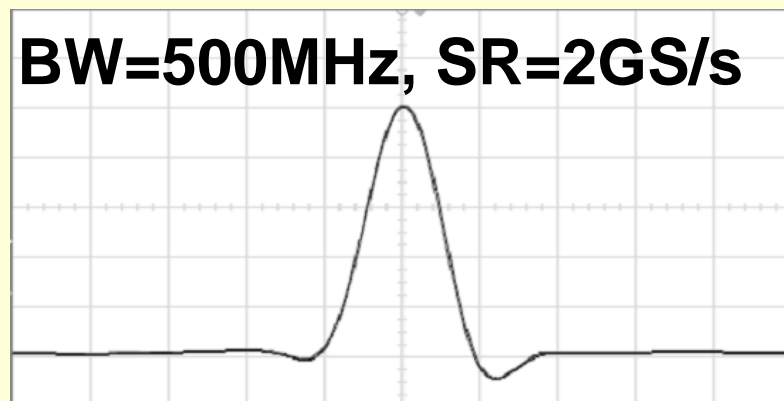
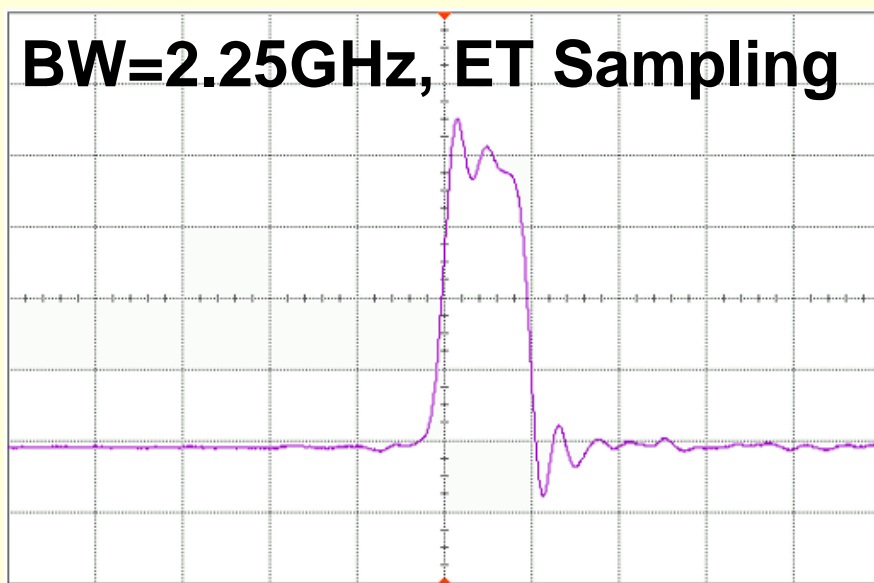
两种响应的总结

- 为了测试一个100ps上升时间（20%-80%）的信号，采用最大平坦响应示波器，允许有10%的测试误差，则示波器带宽需要 $1.2f_{\text{knee}}=4.8\text{GHz}$ ，最小采样率为12GS/s

Determine maximum signal frequency (F_{max})	0.5/Signal rise time (10%~90%) OR 0.4/Signal rise time (20%~80%)	
Determine oscilloscope response type	Gaussian-response	Flat-response
Rise time/bandwidth relationship	0.35/bandwidth	(0.4~0.5)/bandwidth
Rise time measurement error	Oscilloscope bandwidth	
20 %	1.0 F_{max}	1.0 F_{max}
10 %	1.3 F_{max}	1.2 F_{max}
3 %	1.9 F_{max}	1.4 F_{max}
Minimum sample rate	4 x bandwidth	2.5 x bandwidth

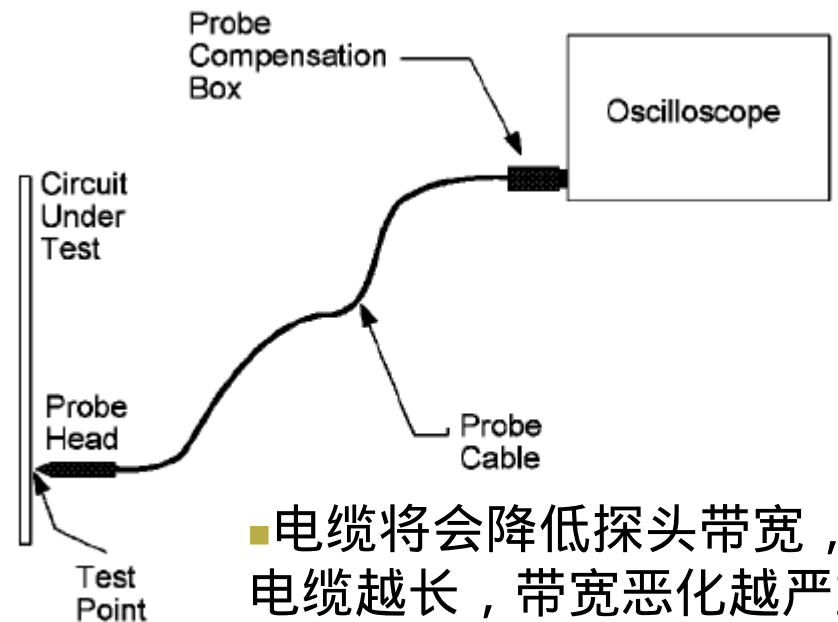
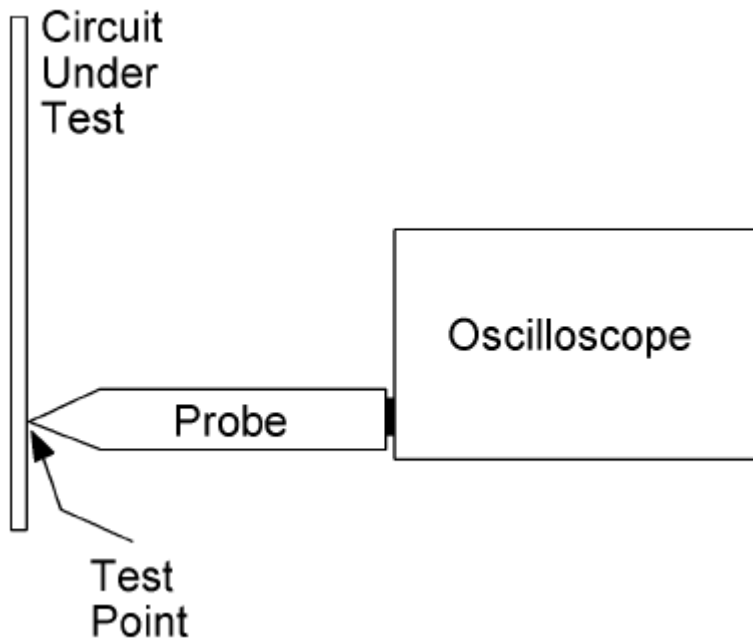
采样率=4倍示波器带宽

- 采样率超过4倍的示波器带宽对波形重构没有改善



5.2 探头

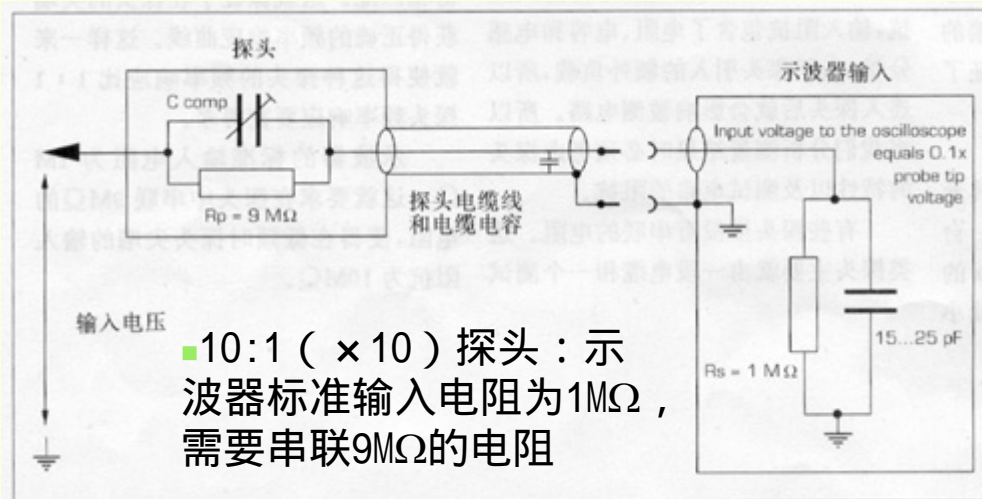
- To extract minimal energy from the circuit under test and transfer it to a measuring instrument with maximum fidelity



- 电缆将会降低探头带宽，
电缆越长，带宽恶化越严重

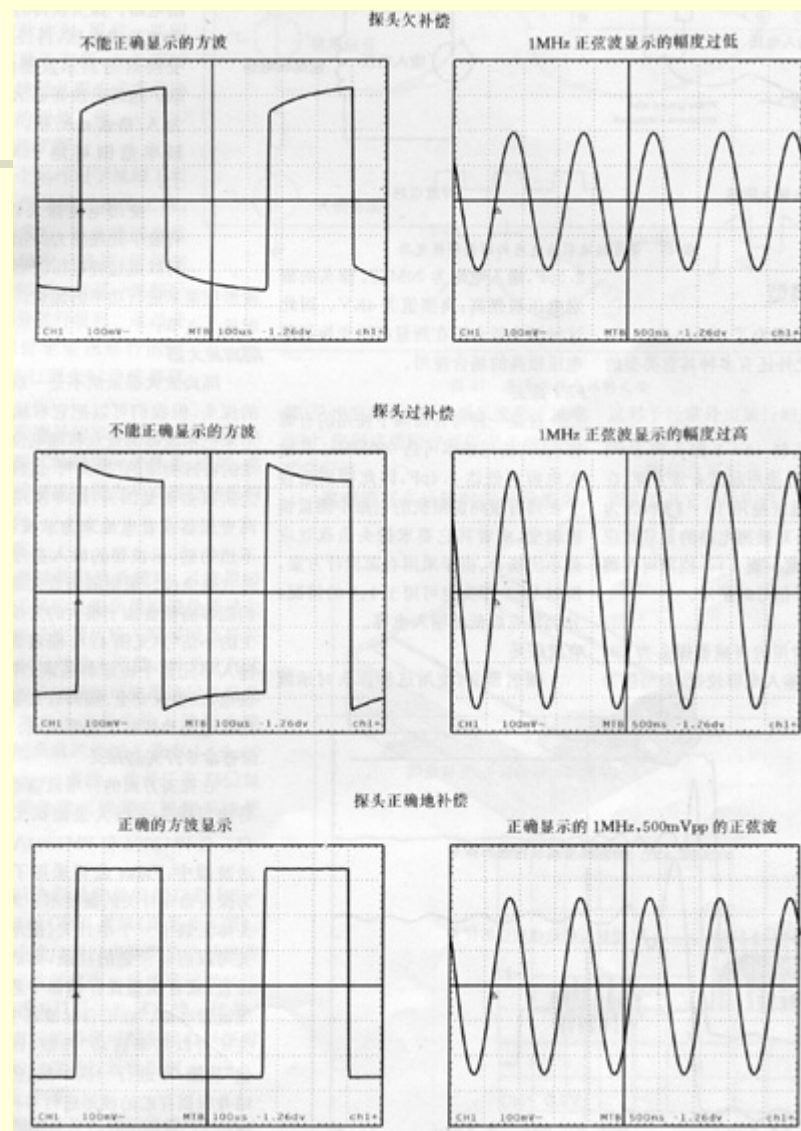
构造

- 简单探头不适合，裸线对测试仪器输入放大器而言，相当于大的电感和电容，而且容易导致短路；而万用表式探头和裸线一样，都没有屏蔽措施，可能会引入大的干扰
 - 探头应确保只有希望观察的信号才出现在示波器显示屏上，如果仅有一根导线作为探头，那么探头的作用就犹如天线，会接收到众多干扰信号（无线电台、荧光灯、电机、...），干扰信号有可能阻塞被测信号
- 因而探头需要良好的屏蔽措施，探头和示波器间的电缆应该是屏蔽电缆，探头地线应和电缆外皮连接后再接到被测电路的地上
 - 但末端接的同轴电缆是大的电容负载，而且可能因反射导致谐振



探头补偿

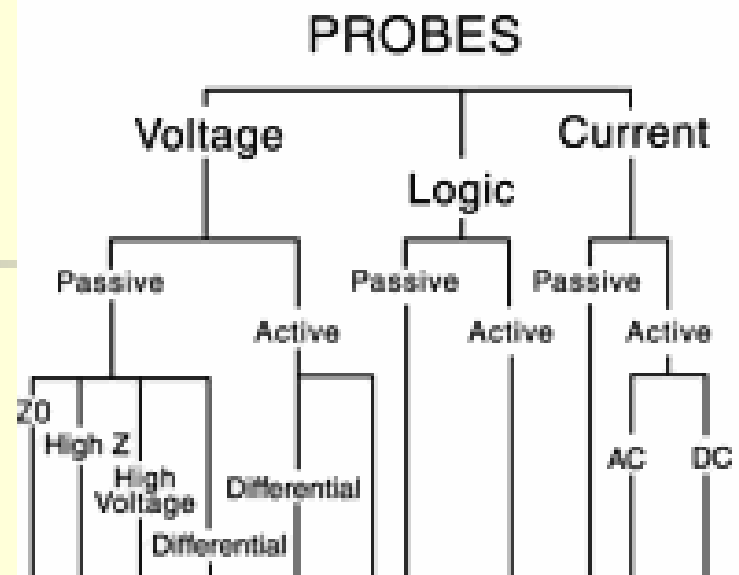
- 补偿电容使得探头和示波器相匹配
 - 示波器前面板上有‘探头校准’方波信号输出端口，用于探头的校准
 - 欠补充和过补充下，信号幅度不再准确



分类

- 10:1/1:1可切换探头
 - 一般情况使用10:1档，负载效应小，带宽大
 - 1:1档可用于测量低频低电平信号
- 衰减探头
 - 100:1探头，输入电容小（2.5pF），输入电阻大（20M Ω ），额定电压值高（4kV）
- FET探头
 - 高频有源探头，GHz，输入电容小（1pF），适于测试高阻抗电路的瞬变过程

BASIC PROBE TYPES



- 差分探头
 - 必须有高的共模抑制比，10000：1
- 电流探头
 - 示波器上显示的是电流而非电压：探头顶端装有一个电流感应变压器，探头卡到导线上，就可将导线上的电流感应下来转换为电压显示

$$BW_{system, gaussian} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{BW_{probe}^2} + \frac{1}{BW_{oscilloscope}^2}}}$$

探头带宽

- 探头和示波器一样，具有有限带宽，如果我们用一台100MHz的示波器和100MHz的探头，组合响应就仅有70MHz，为了最大地利用示波器带宽，探头的带宽应远大于示波器带宽
- 例：某标称300MHz的示波器，配合标称300MHz的探头，测量得到某信号的上升时间为2.5ns，该信号的实际上升时间为多少？

$$T_{r\text{示波器}} = \frac{0.35}{300\text{MHz}} = 1.17\text{ns}, \quad T_{r\text{探头}} = \frac{0.35}{300\text{MHz}} = 1.17\text{ns}, \quad T_{r\text{总}} = 2.5\text{ns}$$

$$T_{r\text{信号}} = \sqrt{T_{r\text{总}}^2 - T_{r\text{示波器}}^2 - T_{r\text{探头}}^2} = \sqrt{2.5^2 - 1.17^2 - 1.17^2} = 1.88\text{ns}$$

LR低通滤波器： $T_r = 2.2 \frac{L}{R}$

RC低通滤波器： $T_r = 2.2RC$

临界阻尼RLC低通滤波器： $T_r = 3.4\sqrt{LC}$

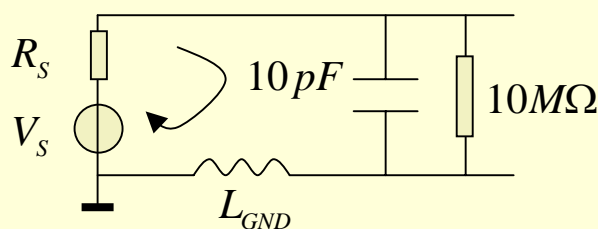
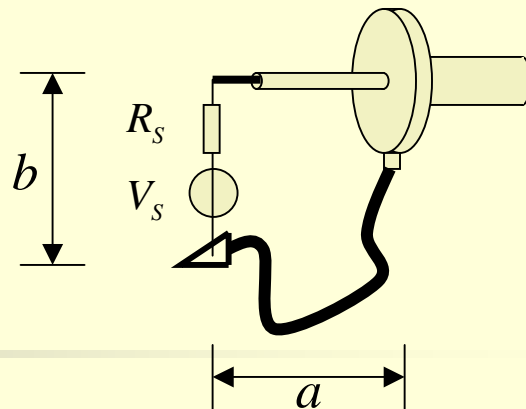
探头接地环路

- 当采样常规10:1示波器探头测量时，性能劣化的主要因素来源于接地导线的自感

- 厂商提供的探头性能指标，是将测试夹具直接连接到探头顶端和探头外屏蔽层测量得到的数据
- 探头带宽的测量是在没有使用接地引线情况下得到到

- 实际应用的探头顶部有一个塑料外壳的金属夹子，探头套管中间引出一根导线作为接地引线

- 流入探头的电流必须经过地回路回到源端，接地引线的自感成为回路的一部分



$$L = 4 \left(a \ln \frac{2b}{d} + b \ln \frac{2a}{d} \right)$$

$$a = 8\text{cm}, b = 3\text{cm}, d = 0.05\text{cm}$$

$$L = 4 \left(3 \ln \frac{16}{0.05} + 8 \ln \frac{6}{0.05} \right)$$

$$= 222\text{nH}$$

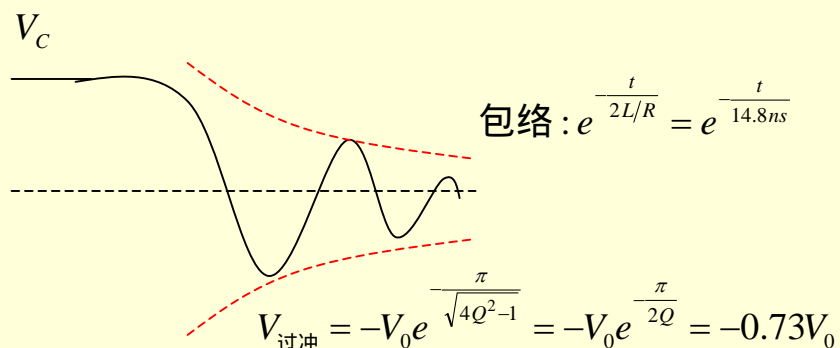
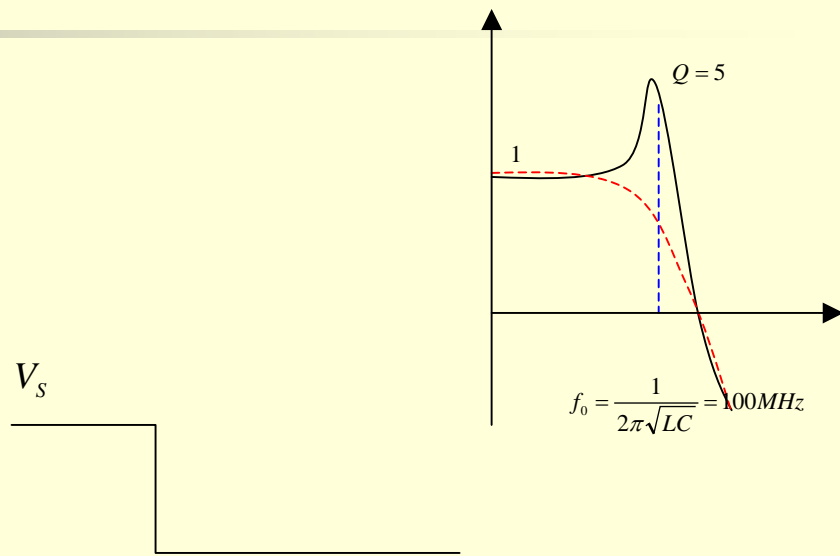
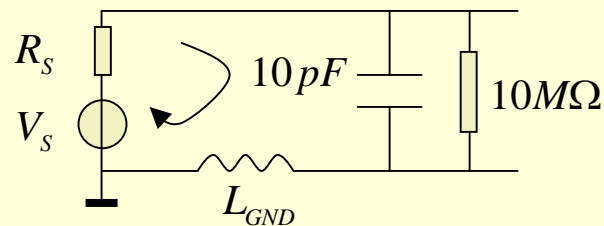
$$T_{LC} = \sqrt{LC} = 1.49\text{ns}$$

$$T_r = 3.4 T_{LC} = 5.07\text{ns}$$

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R_s} = \frac{\sqrt{\frac{222n}{10p}}}{30} = 5$$

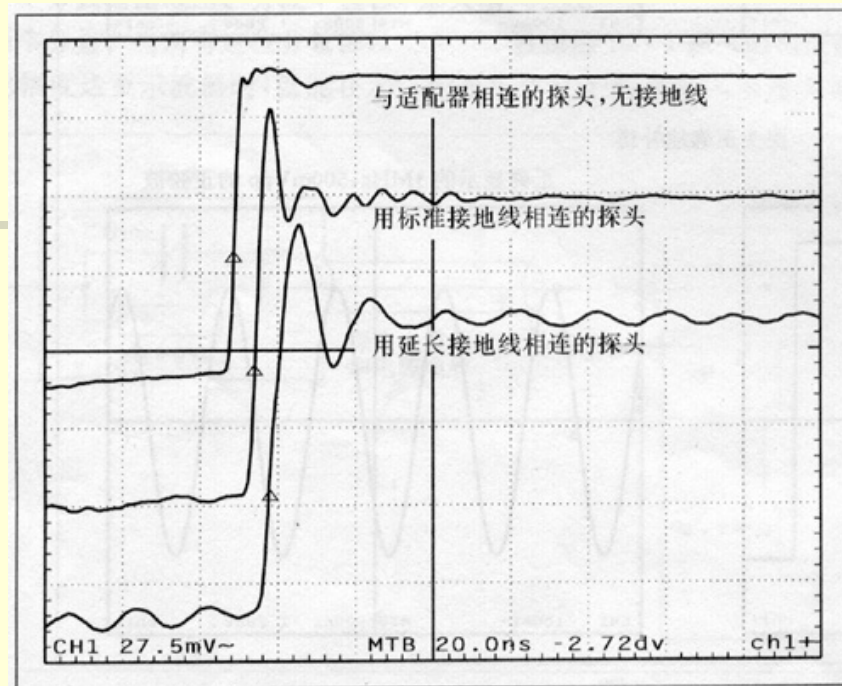
Q值与过冲

- 信源内阻为门电路驱动被测信号的输出电阻，对于TTL和CMOS电路大约为 30Ω ，对于ECL，输出阻抗为 10Ω
- 回路Q值较大，频率响应在100MHz处有大的尖峰，从而造成振铃现象



探头接地点

- 探头接地点离信源越近越好，接地导线越短越好，主要原因就是减小了自感，同时降低了Q值



接地环路 自感 nH	10pF 无源探头			2pF FET 有源探头		
	T_r ns	Q_{TTL}	Q_{ECL}	T_r ns	Q_{TTL}	Q_{ECL}
200	4.8	4.7	14.1	2.2	10.5	32.0
100	3.4	3.3	9.9	1.5	7.4	22.0
30	1.9	1.8	5.4	0.8	4.1	12.0
10	1.1	1.1	3.2	0.5	2.4	7.1
3	0.6	0.6	1.7	0.3	1.3	3.9
1	0.3	0.3	1.0	0.2	0.7	2.2

如何减小自感

- 增加线径是得不偿失
 - 自感随线径增加降低太慢
 - 线径增加使得线的硬度增加
- 减小线长，降低环路面积

$$L = 4 \left(a \ln \frac{2b}{d} + b \ln \frac{2a}{d} \right)$$

$$a = 8\text{cm}, b = 3\text{cm}, d = 0.05\text{cm}$$

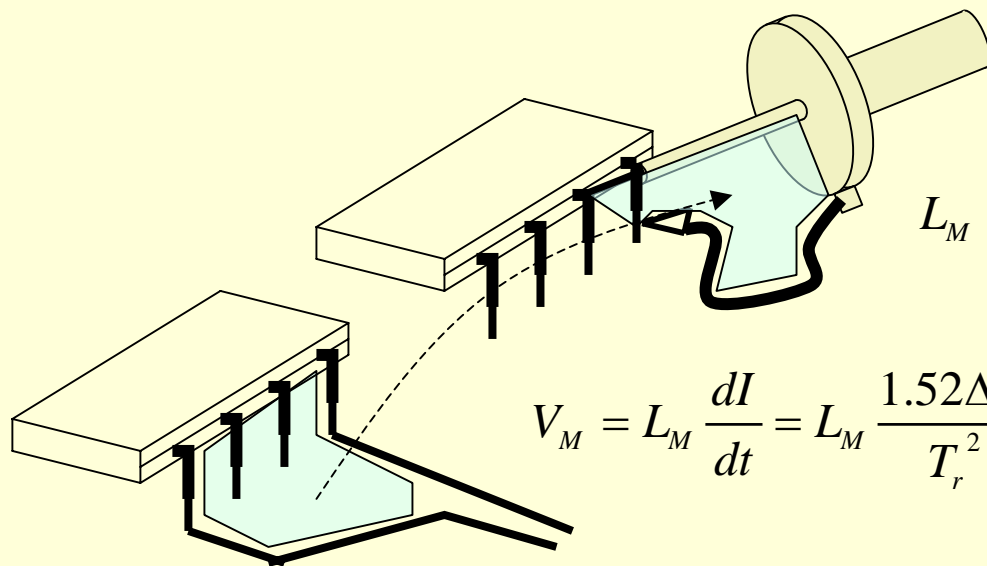
$$L = 4 \left(3 \ln \frac{16}{0.05} + 8 \ln \frac{6}{0.05} \right)$$

$$= 222\text{nH}$$

$$L = 4 \left(3 \ln \frac{16}{0.1} + 8 \ln \frac{6}{0.1} \right)$$

$$= 192\text{nH} = 0.86 * 222\text{nH}$$

探头接地环路上的假信号



$$L_M = 2 \frac{A_1 A_2}{r^3} = 2 \frac{(0.8 * 0.8)(3 * 8)}{5^3} = 0.25 nH$$

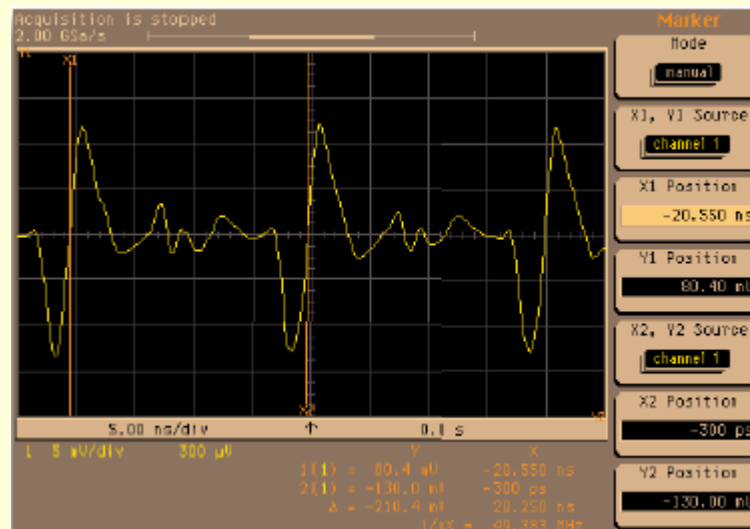
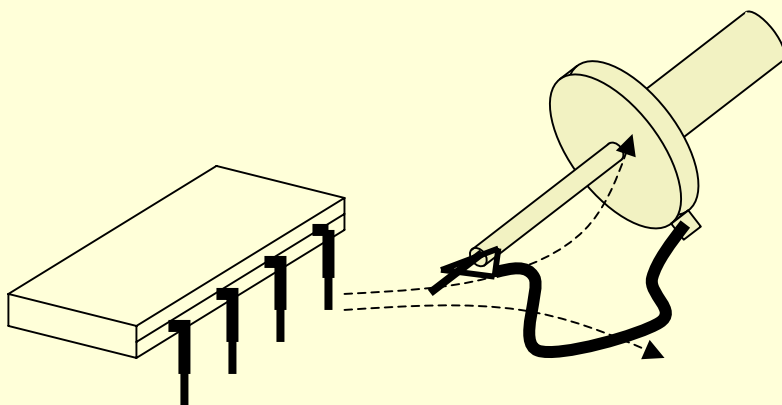
$$V_M = L_M \frac{dI}{dt} = L_M \frac{1.52 \Delta V}{T_r^2} C_L = 0.25 n \times \frac{1.52 \times 4}{1 n^2} \times 10 p = 15.2 mV$$

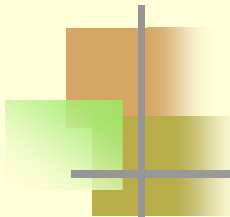
$$32 V_M = 15.2 mV * 32 = 0.486 V$$

- 如果旁边有一个总线，最坏的情况是每条线的噪声电压相互叠加，产生的伏特级的干扰电压将不可忽视

用探头进行噪声检测

- 把探头的地和探头顶端短接，可以构成一个磁场探测器，以此来观察高速数字电路PCB板的电磁辐射源



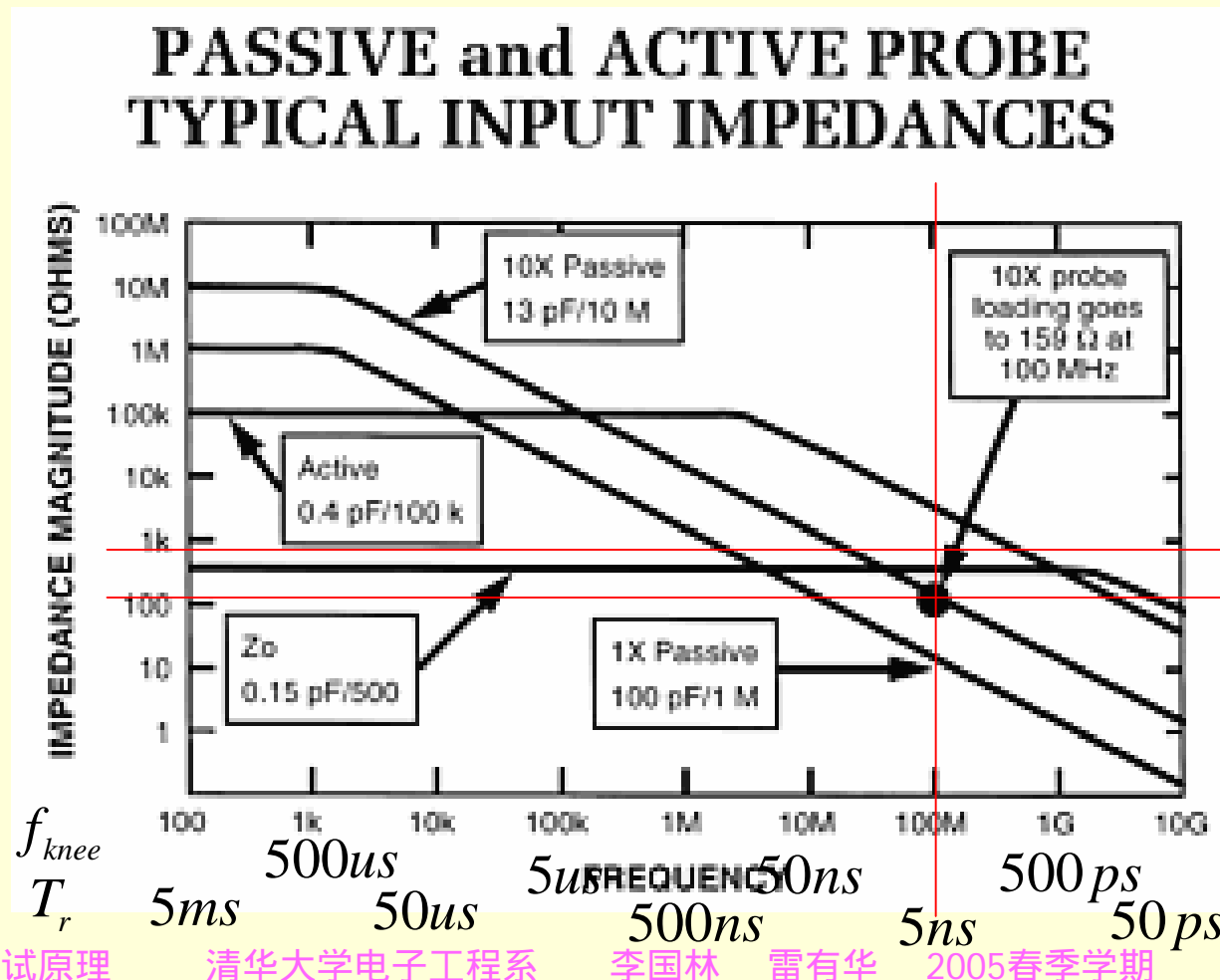


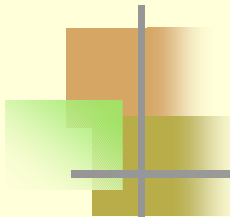
探头负载效应

- 当我们进行测量时，通常认为测得的电压就是实际电路电压
 - 实际上，每个探头都有其输入阻抗，包括电阻、电容和电感分量，探头接入电路后，会引入负载效应
- 示波器探头的使用往往会改变被测电路的工作状态，这是探头负载效应的一个具体表现
 - 用探头测试电路，发现电路工作正常，把探头移开，电路功能紊乱
- 探头负载效应的考察
 - 被测数字信号的转折频率
 - 被测电路在转折频率点的源端阻抗
 - 示波器探头在转折频率点的输入阻抗

探头的电容越小，负载效应越小

- 如果我们希望对被测电路的影响不大于10%，探头的阻抗应该至少是被测电路源端阻抗的10倍
 - 典型的数字电路源端阻抗范围为10-75Ω
 - 探头阻抗应该为100-1kΩ





探头总结

- 根据测试具体要求选用探头类型
- 探头和示波器一般是配套使用的，不可随便互换
 - 50欧姆示波器对应50欧姆的探头，1M欧姆示波器对应1M欧姆的探头
 - 探头的带宽应和示波器匹配
- 测试时，尽量把探头放置于低阻抗结点以减小探头的负载效应
- 选择尽量小电容和尽量大电阻的探头
- 探头应定期校准

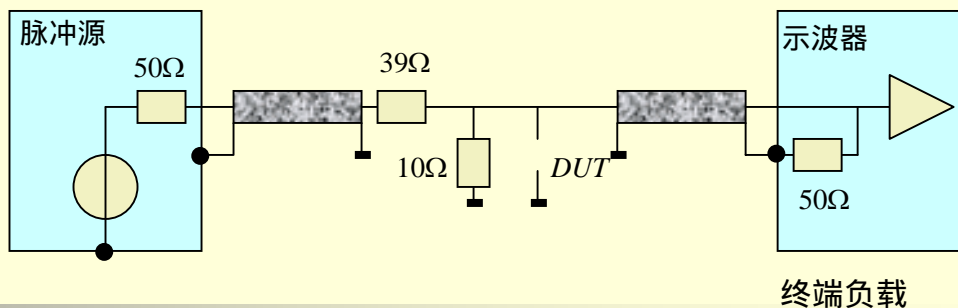
5.3 示波器选择需要考虑的问题

■ Ten Things to Consider When Selecting Your Oscilloscope:

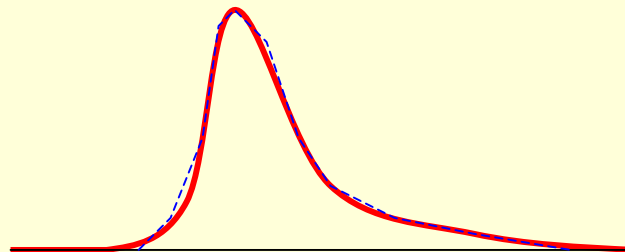


- How much bandwidth do you need?
- How many channels do you need?
- What are your sample rate requirements?
- How much memory depth do you need?
- What display capability do you need?
- What triggering capabilities do you need?
- What is the best way to probe your signal?
- What documentation and connectivity features do you need?
- How will you analyze your waveforms?
- Ease of use and quick display responsiveness!

练习题1



- 用示波器测量电感：测量装置由两个 50Ω 同轴电缆组成，分别用于信号的输入和输出。电缆有 50Ω 电阻端接。输入电缆接脉冲发生器，输出电缆接示波器。
 - 连接脉冲源，DUT断开，示波器测得阶跃信号的峰峰值为 418mV ，上升时间为 790ps 。
 - 接上DUT（电感），测得脉冲信号的面积为 500pVs
 - DUT电感为多少 nH ？





练习题2

- 假设一台DSO的存储深度为10kpts，最大采样速率为100MS/s，如果希望工作在最大采样速率上，时基设置应该为多少us/div?