

示波器 基础原理

美国力科公司

李海龙

目录

什么是示波器

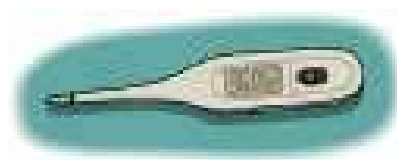
示波器的类型和区别

示波器的各个组成部分

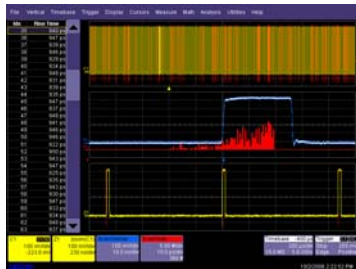
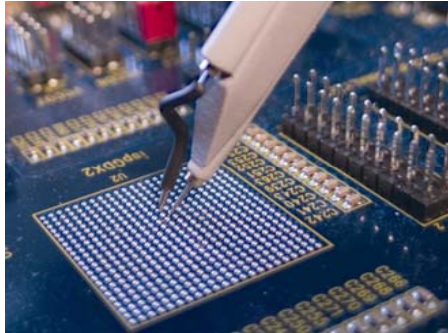
示波器的主要指标及其选择指南

数字示波器技术的发展

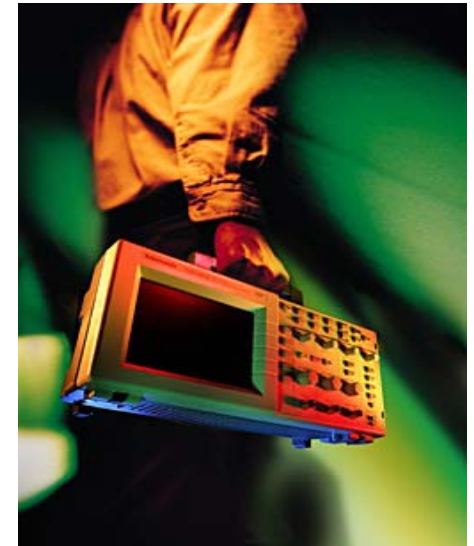
人们为什么需要示波器



世界范围内的示波器市场规模大概在 ~ 10亿美金 每年



- ▶ 设计和调试
- ▶ 制造测试和质量控制
- ▶ 服务和维修
- ▶ 教育和培训



示波器经常被认为是...

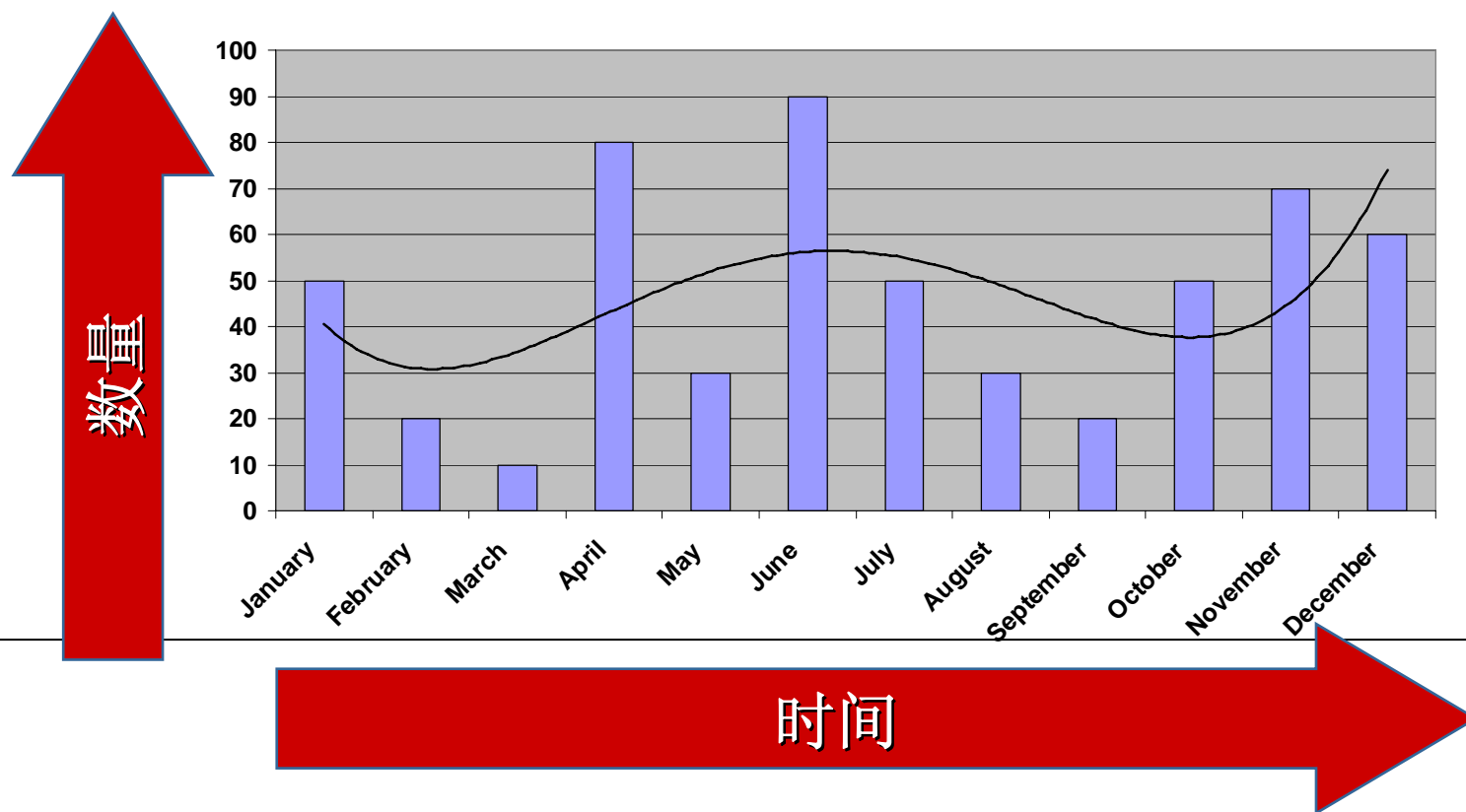
一扇窗户...



...进入微观电子世界

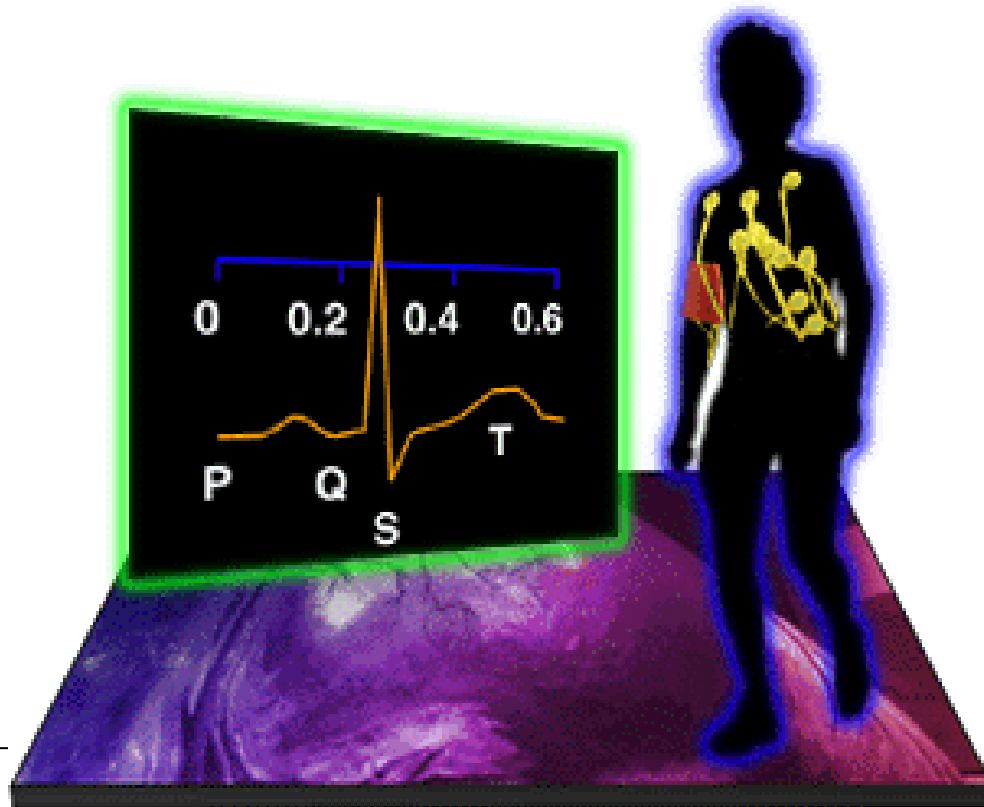
所有示波器都能绘制信号幅度随时间变化的图形

- ▶ 与图表类似, 示波器能帮助你看清在一段时间内究竟发生了什么。



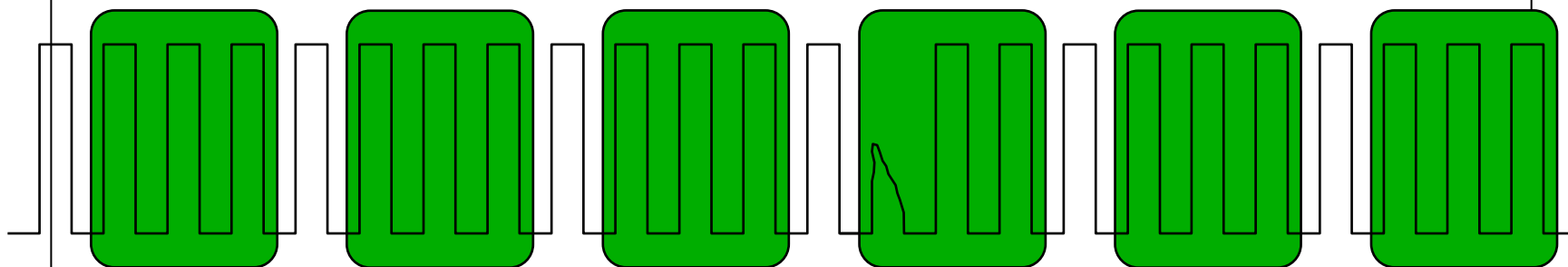
特殊用途示波器

- 心脏监视器是一种示波器 被优化以监视人体心脏跳动的“波形”.

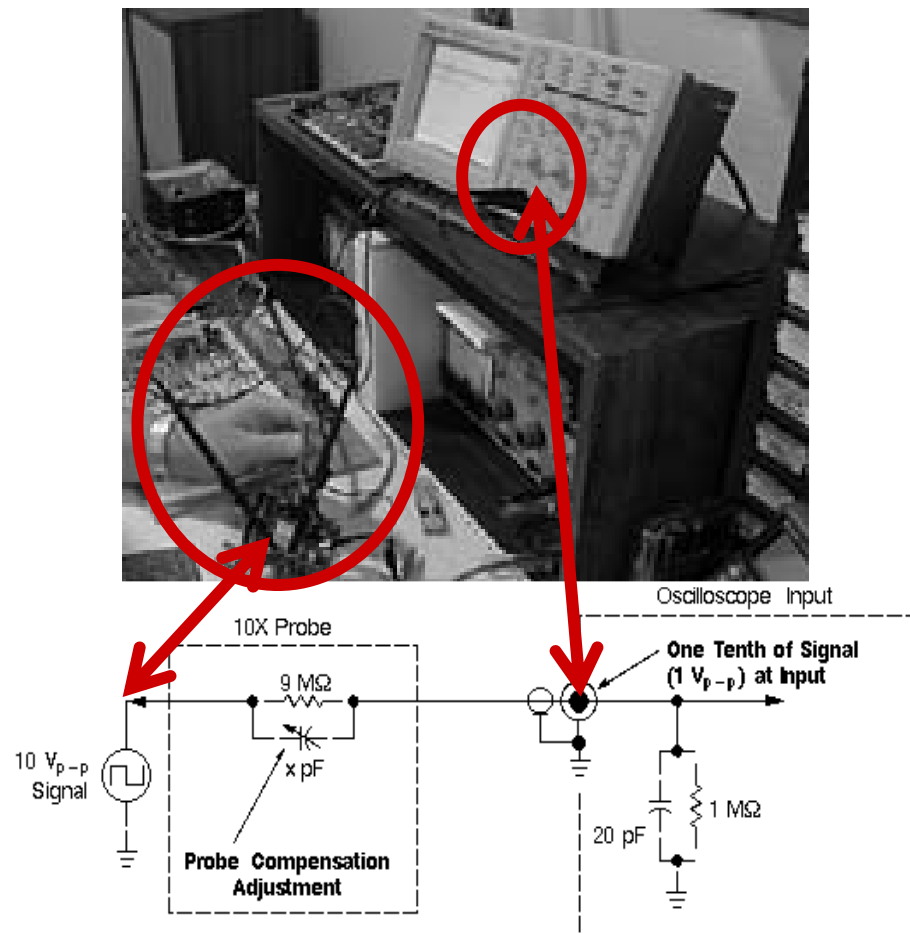


示波器获取波形图像

- ▶ 示波器获取连续信号的片断图形, 然后创造波形显示.
- ▶ 示波器的基本功能就是将肉眼无法识别的电子信号转换成可观测的波形图形



所有示波器都需要探头



示波器能测量随时间变化的电压

将电压想象成水管的压强

压强等于“单位面积上的压力”

压强也可以等价于
“势能/单位容量”

电压 = 势能/单位电量

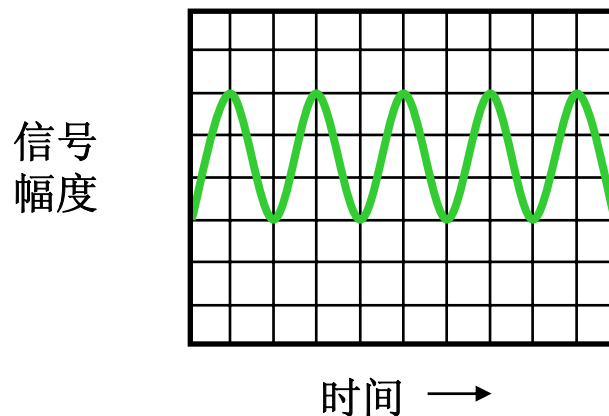


示波器也能测量信号的频率

频率简单定义成时间重复出现的概率

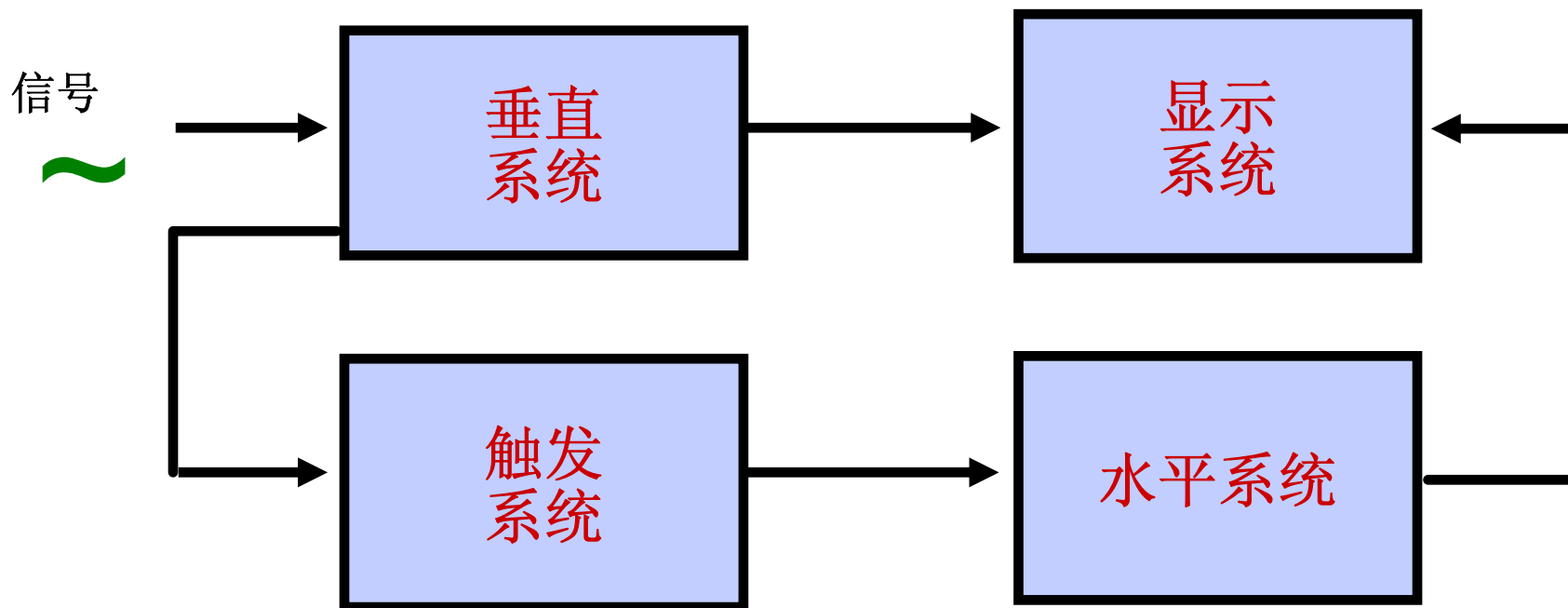
频率代表着重复出现的事件

频率 = 每秒时间周期数
= 赫兹 (Hz)

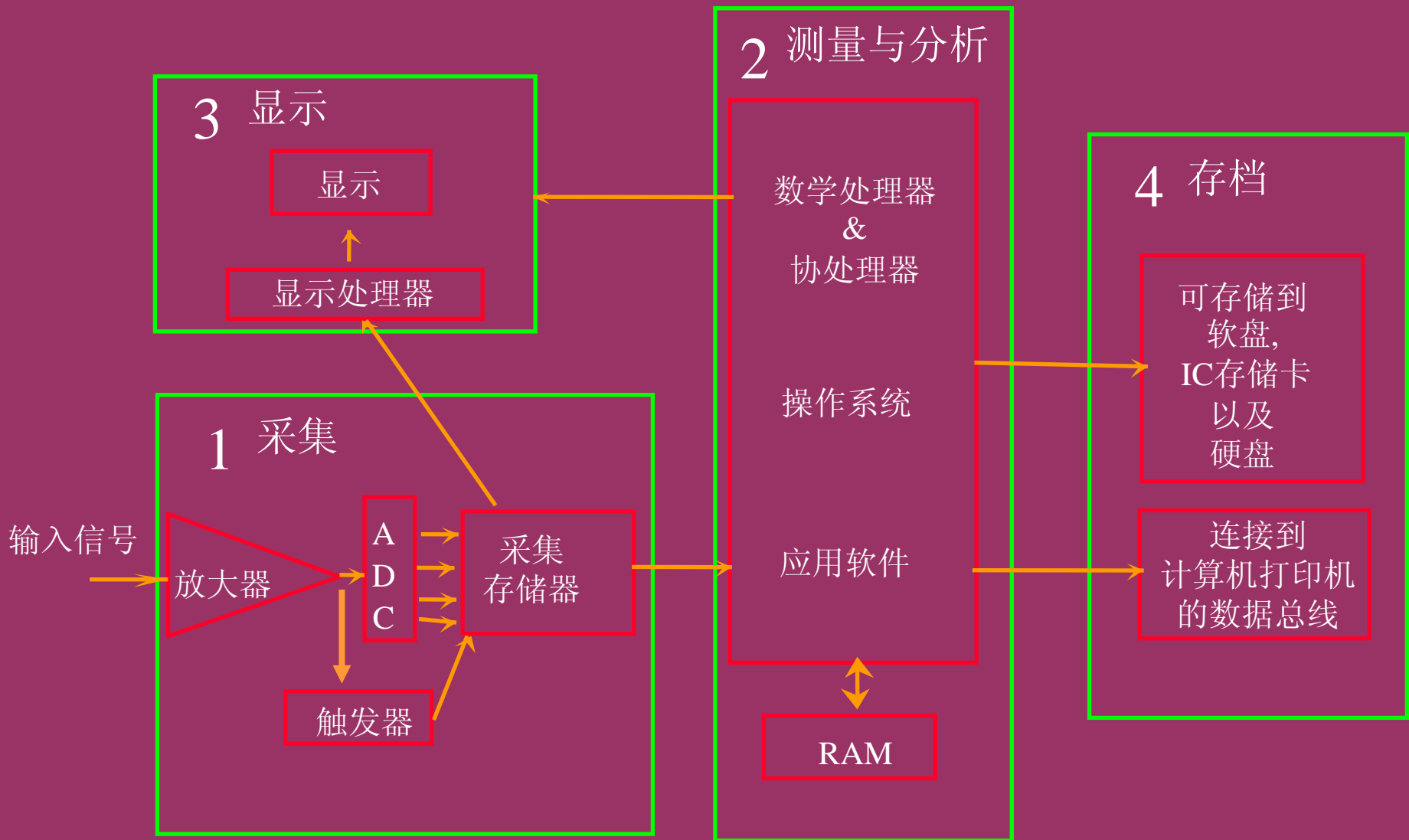


1 GHz = 每秒10亿次事件

数字示波器内部是怎么一种结构？



典型的示波器结构

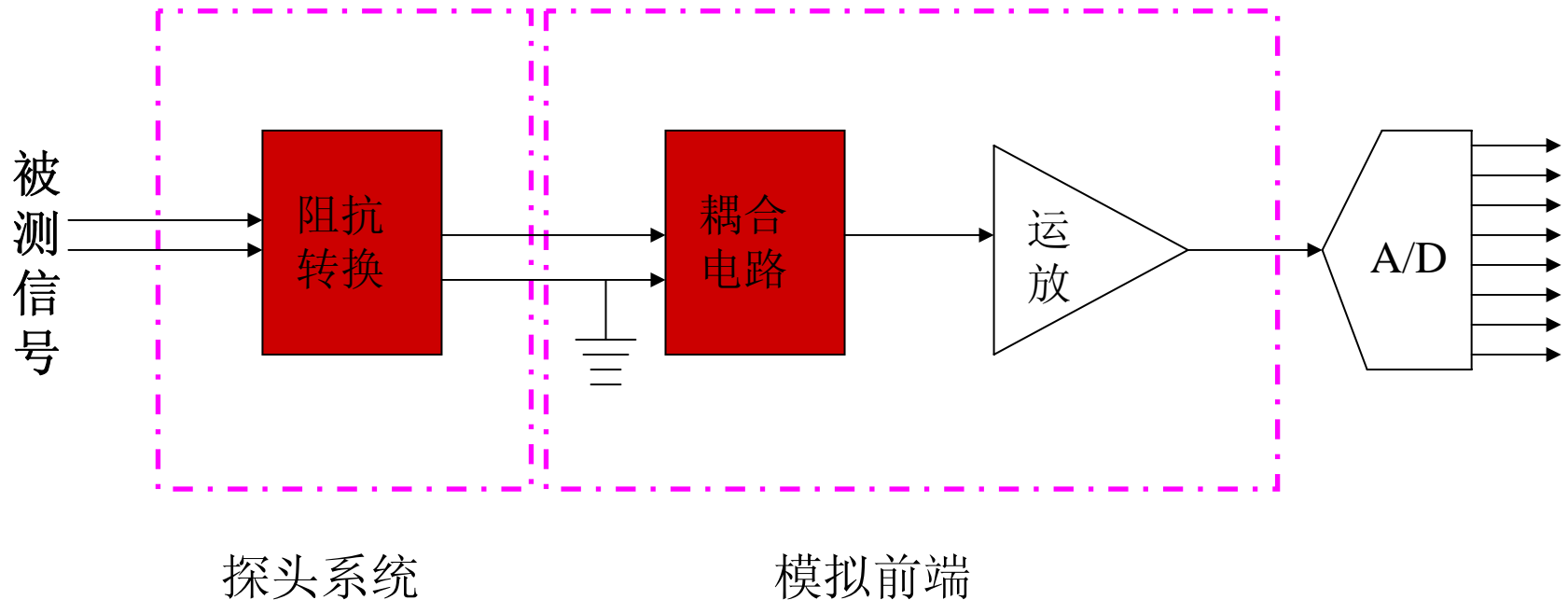


示波器的基本技术指标

- ▶ 模拟带宽
- ▶ 实时采样率
- ▶ 存储深度
- ▶ 触发能力
- ▶ 波形捕获和显示

信号输入系统

被测信号通过探头前端到达探头主体，进入阻抗转换电路，以衰减成合适比例的输入信号，送入示波器前端，通过耦合电路，到达前置放大器。

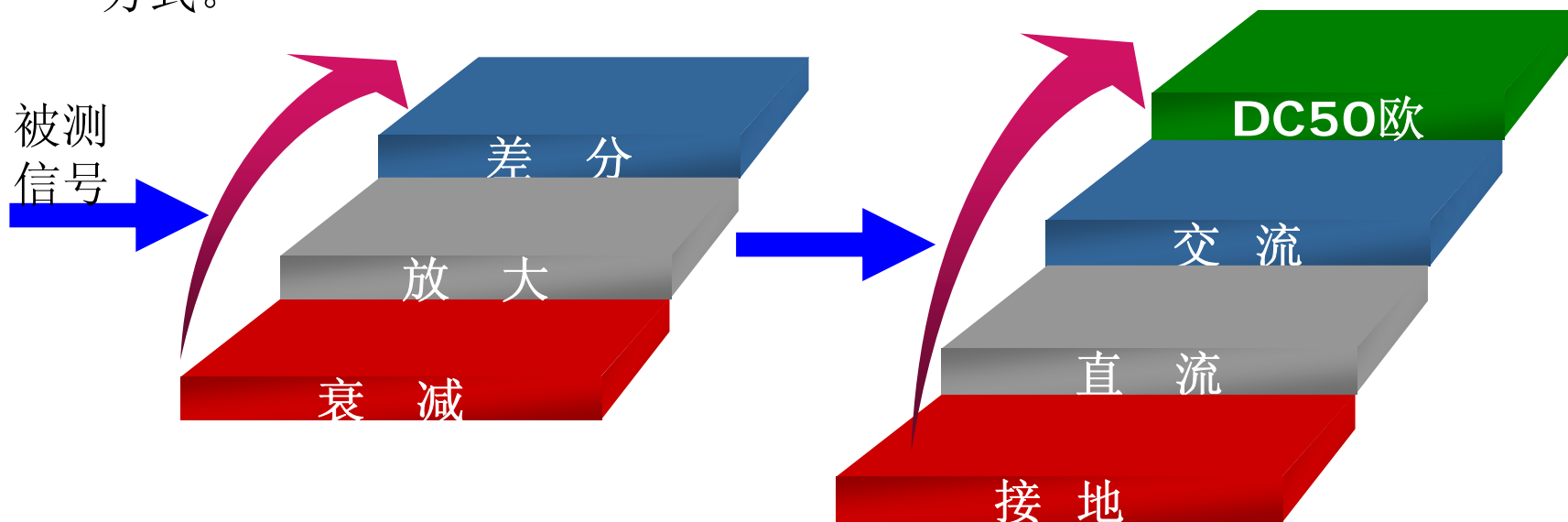


阻抗变换与耦合

要把被测信号引入示波器进行不失真的测量，则要求测量电路接入被测电路后，尽可能少的影响被测信号；同时把被测信号变换成适合示波器输入电路的信号，这就需要通过一个阻抗变换网络来完成。

对于差分信号的测量，需要把差分信号不失真的变换为单端信号来进行测试。

耦合是指连接方式，即前一级电路到后一级电路之间的连接方式。



带宽是选择示波器的第一参数

示波器的结构决定了带宽的重要性：

放大器的模拟带宽决定了示波器的带宽；

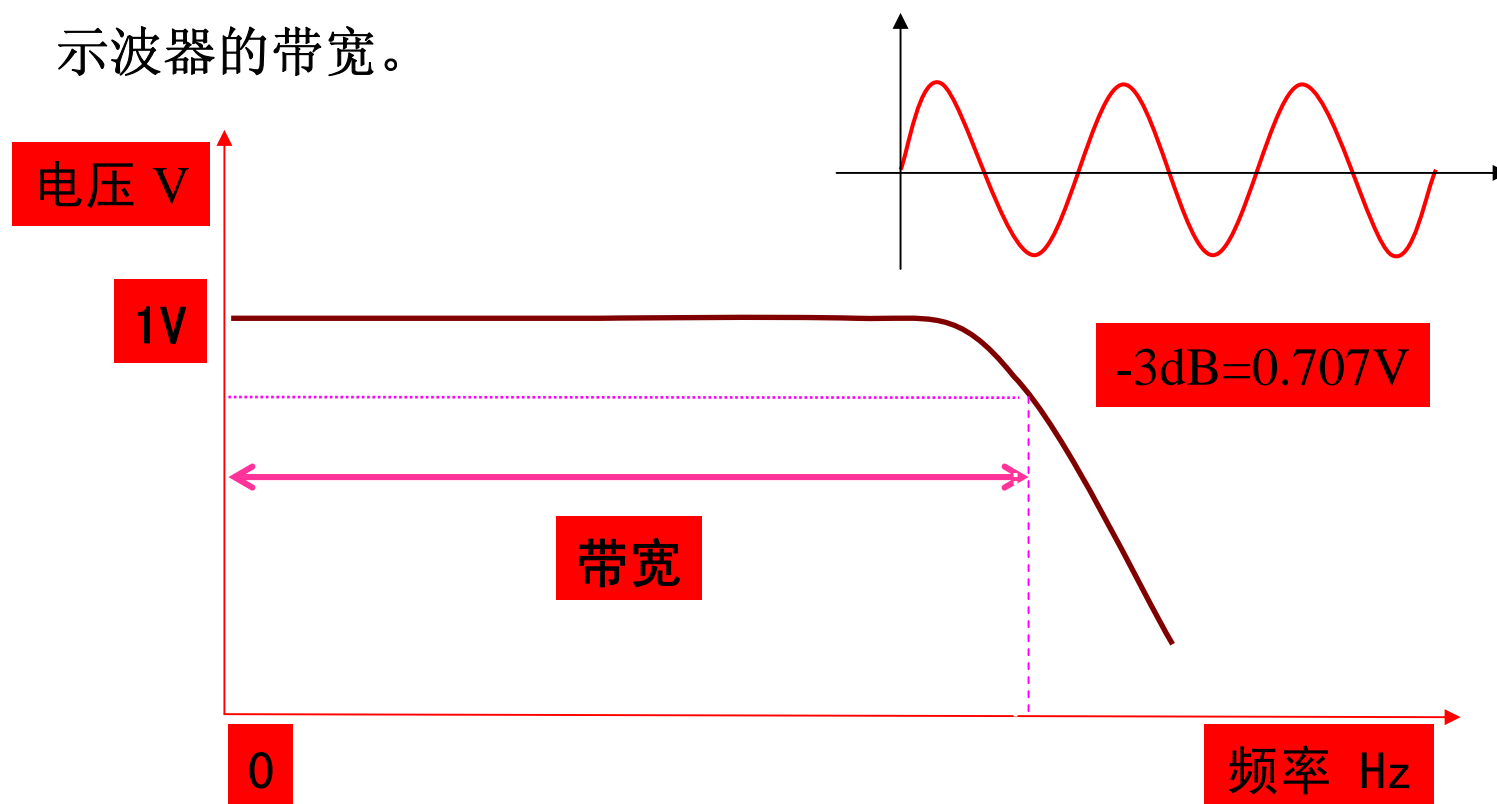
放大器是信号进入示波器的大门，它的带宽决定了示波器的带宽，示波器能请进什么样的信号由这个大门来决定。

数字示波器的带宽也是模拟带宽。

什么是示波器带宽？

带宽 = 正弦波 -3 dB 点

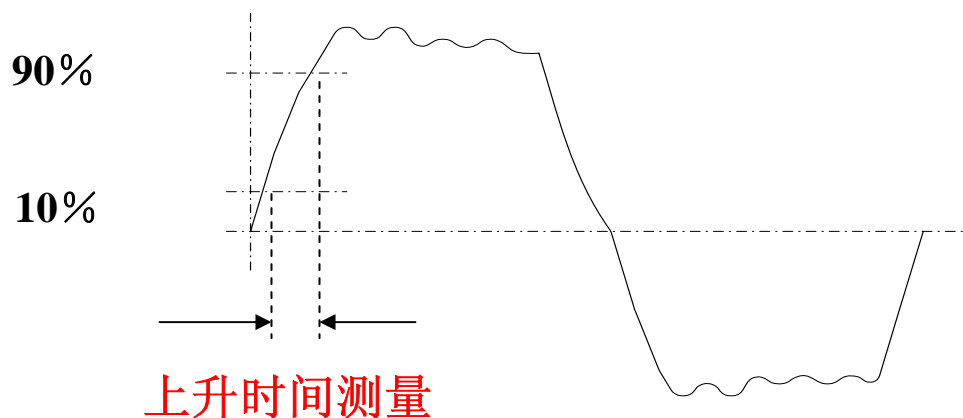
带宽定义：示波器输入标准正弦波信号，不断提高信号频率，输入信号幅度会被不断衰减；频率越高，衰减幅度越大；当频率提高到某个值，输入信号刚好被衰减**3dB**时所对应的频率点，即为示波器的带宽。



什么是上升时间?

- 理想的方波和脉冲波的电压是有突然变化的波形，陡变有一定时间这取决于系统带宽及其他电路参数。
- 波形从一种电压变至另一种电压的时间称为上升时间

上升时间通常在过渡的**10%至90%**处



如何决定示波器系统带宽

t_r (10% to 90%)

$$t_{r(\text{DISPLAYED})} = \sqrt{t_{r(\text{示波器})}^2 + t_{r(\text{探头})}^2 + t_{r(\text{源信号})}^2}$$

$$t_r = \frac{0.35^*}{BW} \quad \text{或者} \quad BW = \frac{0.35^*}{t_r}$$

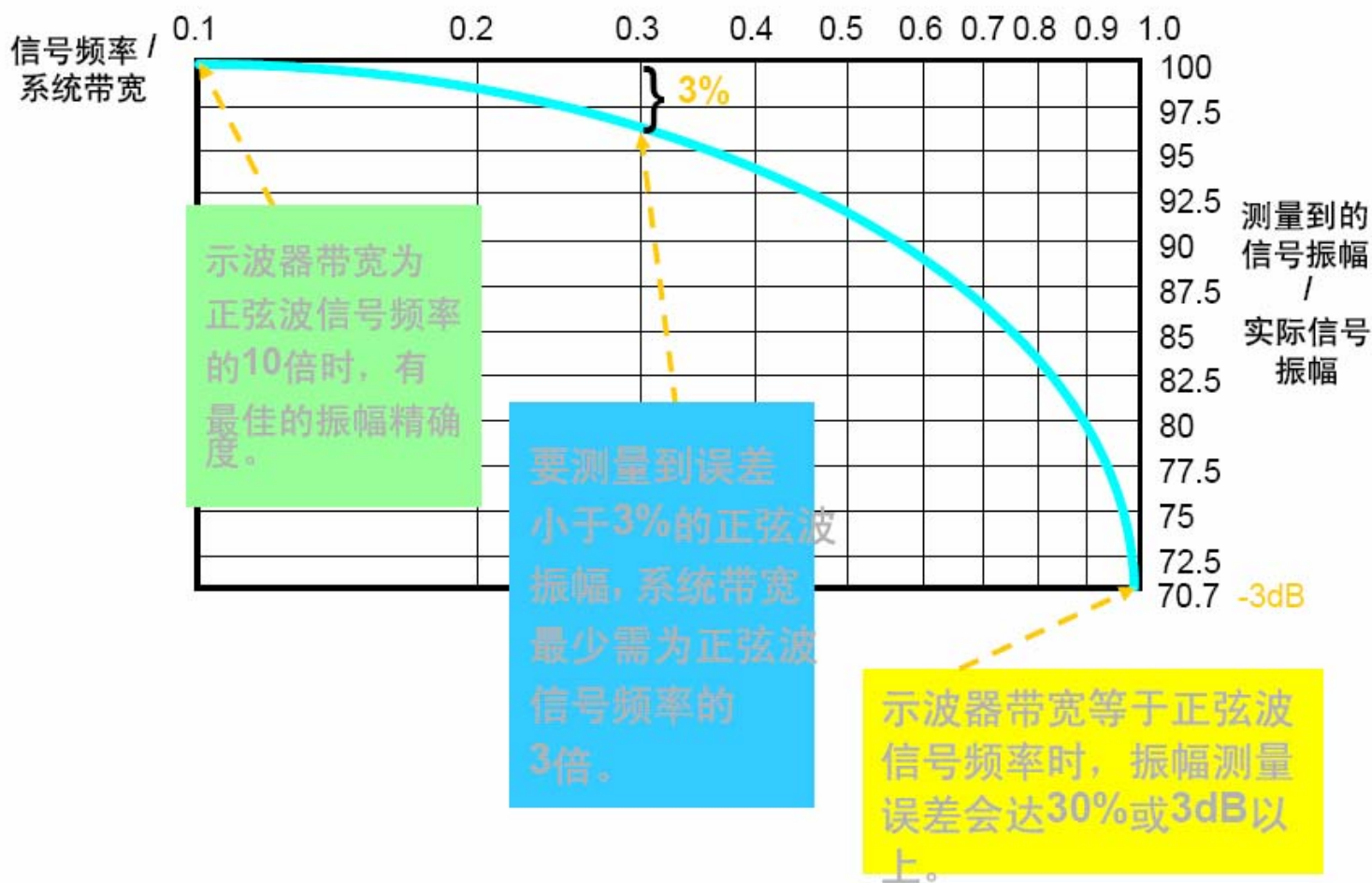
BW (-3 dB)

$$BW_{(\text{DISPLAYED})} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{BW_{(\text{示波器})}}\right)^2 + \left(\frac{1}{BW_{(\text{探头})}}\right)^2 + \left(\frac{1}{BW_{(\text{源})}}\right)^2}}$$

* 此常量针对一极模型。对于更高带宽的仪器来说, 此常量可以高到0.45.

- 由以上公式可以看出, 示波器及探头的带宽越宽, 则对测量带宽影响越小, 也就是说测量带宽越接近信号带宽

系统带宽 vs. 正弦波幅度精度



典型逻辑电平测量精度要求

电平逻辑	典型信号上升时间	计算出的信号带宽 $= \frac{0.35^*}{t_{\text{rise}}}$	测量系统带宽 针对 3% 滚降错误	测量系统带宽 针对 1.5% 滚降错误
TTL	5 ns	70 MHz	231 MHz	350 MHz
CMOS	1.5 ns	230 MHz	767 MHz	1.15 GHz
ECL	500 ps	700 MHz	2.33 GHz	3.5 GHz
GaAs	200 ps	1.75 GHz	5.8 GHz	8.75 GHz

$$t_{\text{rise (displayed)}} = \sqrt{(t_{\text{rise (scope)}})^2 + (t_{\text{rise (probe)}})^2 + (t_{\text{rise (source)}})^2}$$

波形上升时间与测量精度的关系

信号上升时间仪表上升时间之比

上升时间测量精度%

1:1

41%

2:1

22%

3:1

12%

4:1

5%

5:1

2%

7:1

1%

10:1

0.5%

带宽选择实例

已知条件：示波器主机1GHz，探头配置1.5GHz，被测信号200MHz（上升时间500ps）。

$$\text{示波器上升时间} = 0.35/1\text{GHz} = 350\text{ps}$$

$$\text{探头上升时间} = 0.35/1.5\text{GHz} = 233\text{ps}$$

$$\text{整个测量系统上升时间} = \sqrt{350^2 + 233^2} = 420\text{ps}$$

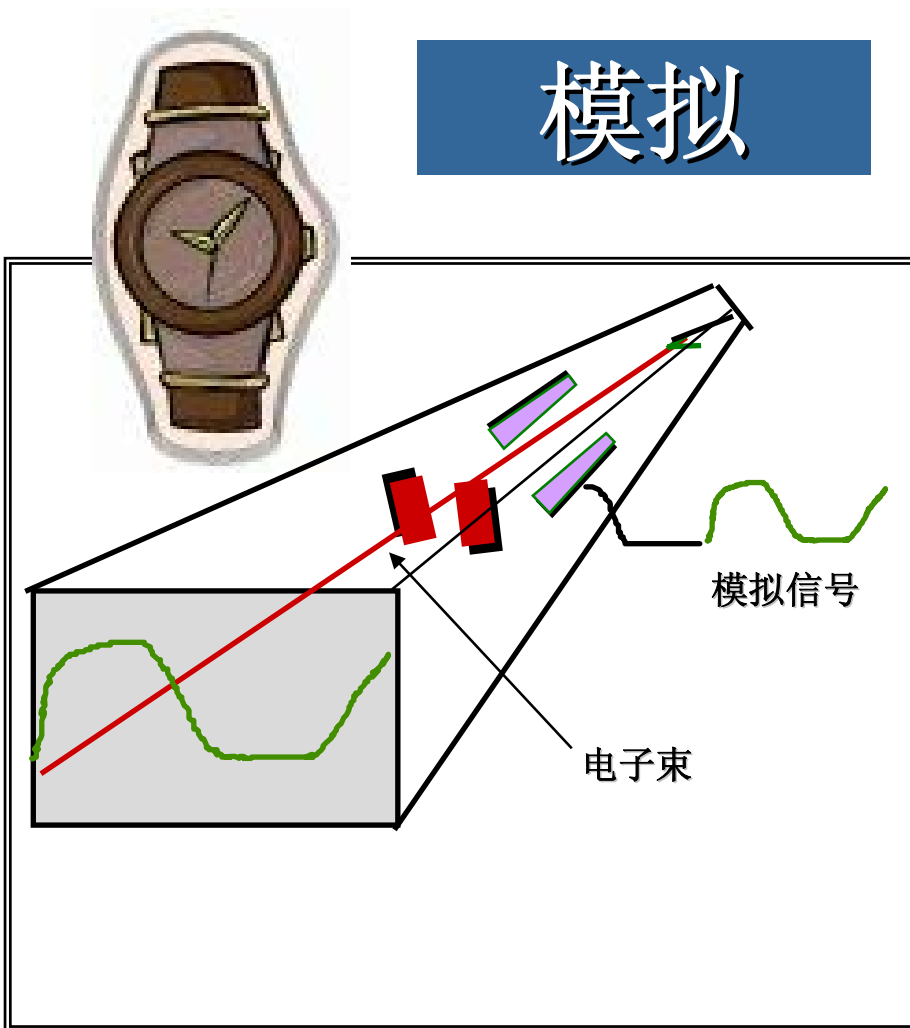
$$\text{整个测量系统实际带宽} = 0.35/420 = 833\text{MHz}$$

$$\text{实测信号所得上升时间} = \sqrt{420^2 + 500^2} = 653\text{ps}$$

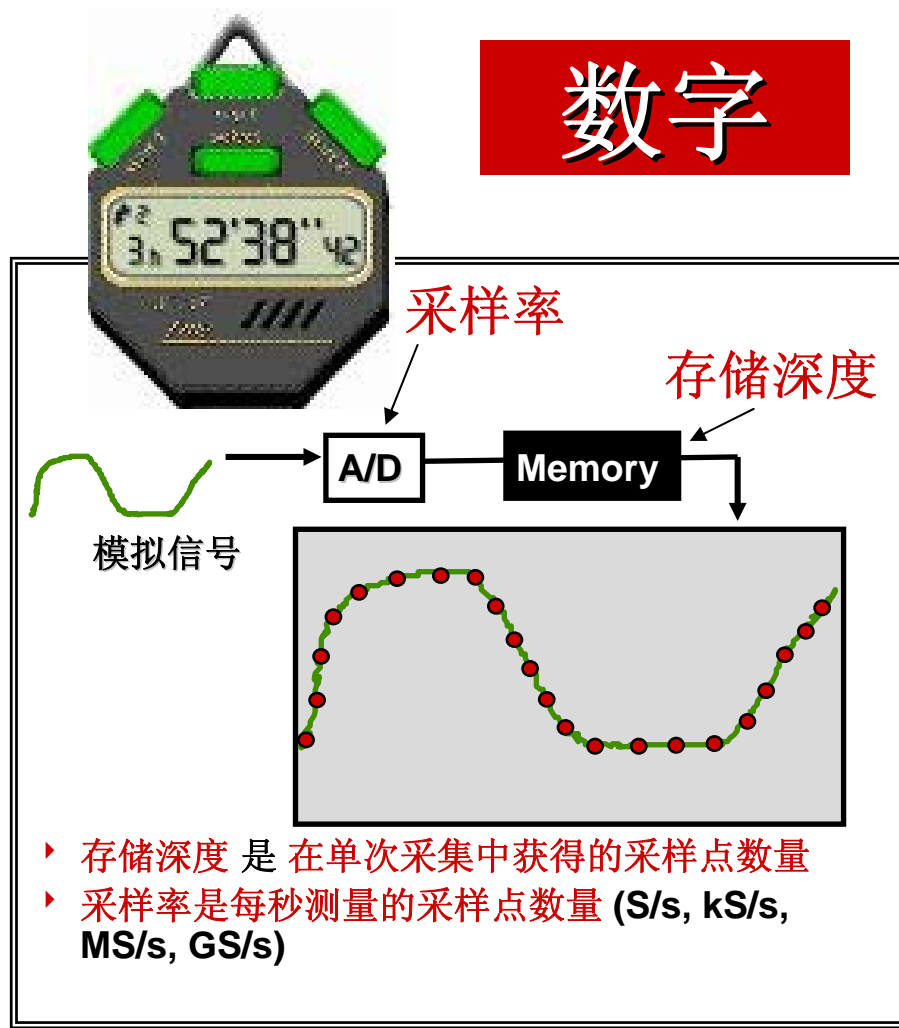
$$\text{实际测量误差} = (653 - 500) / 500 = 30.6\%$$

采样率和存储深度

模拟



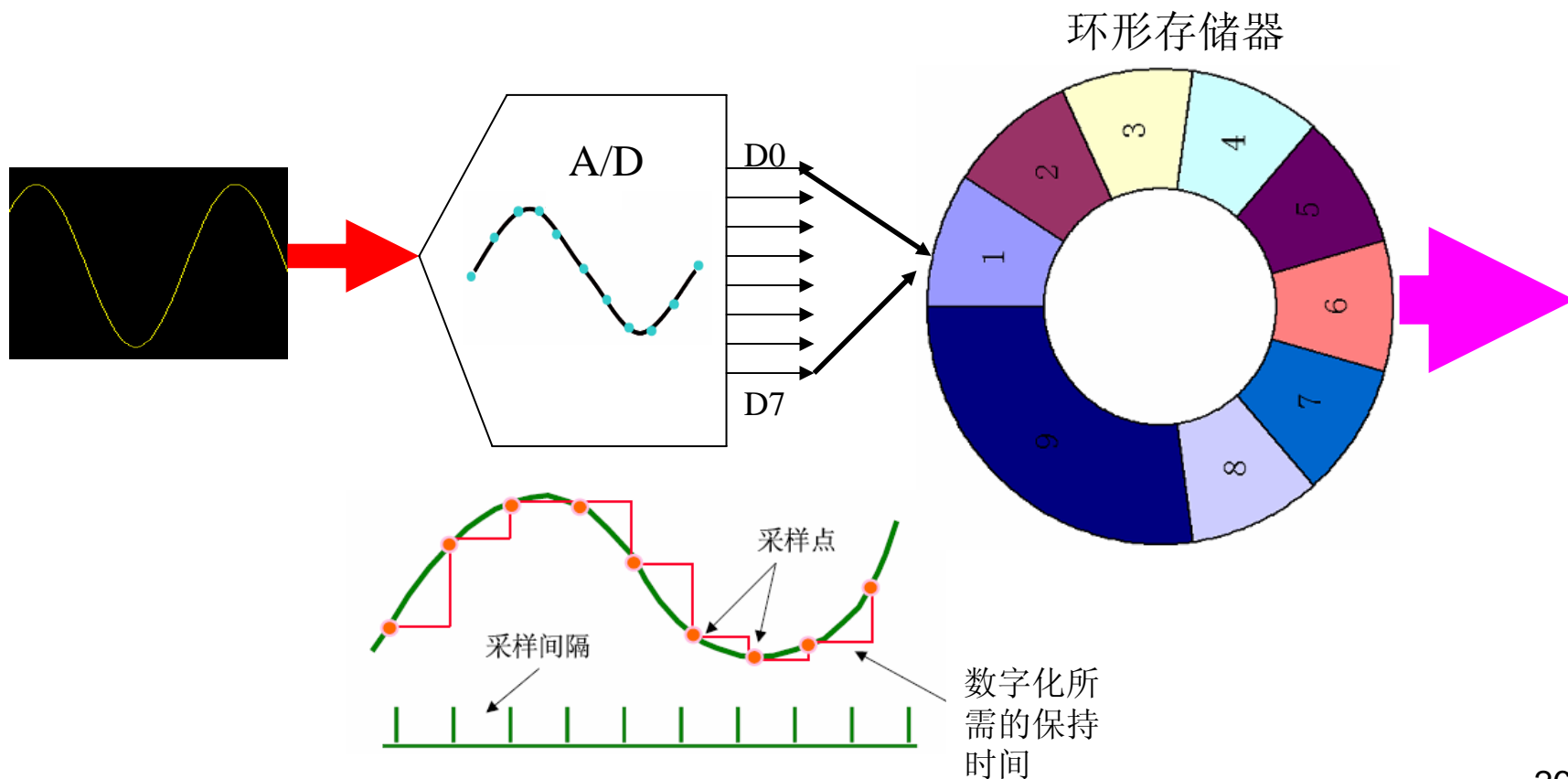
数字



采样与存储原理

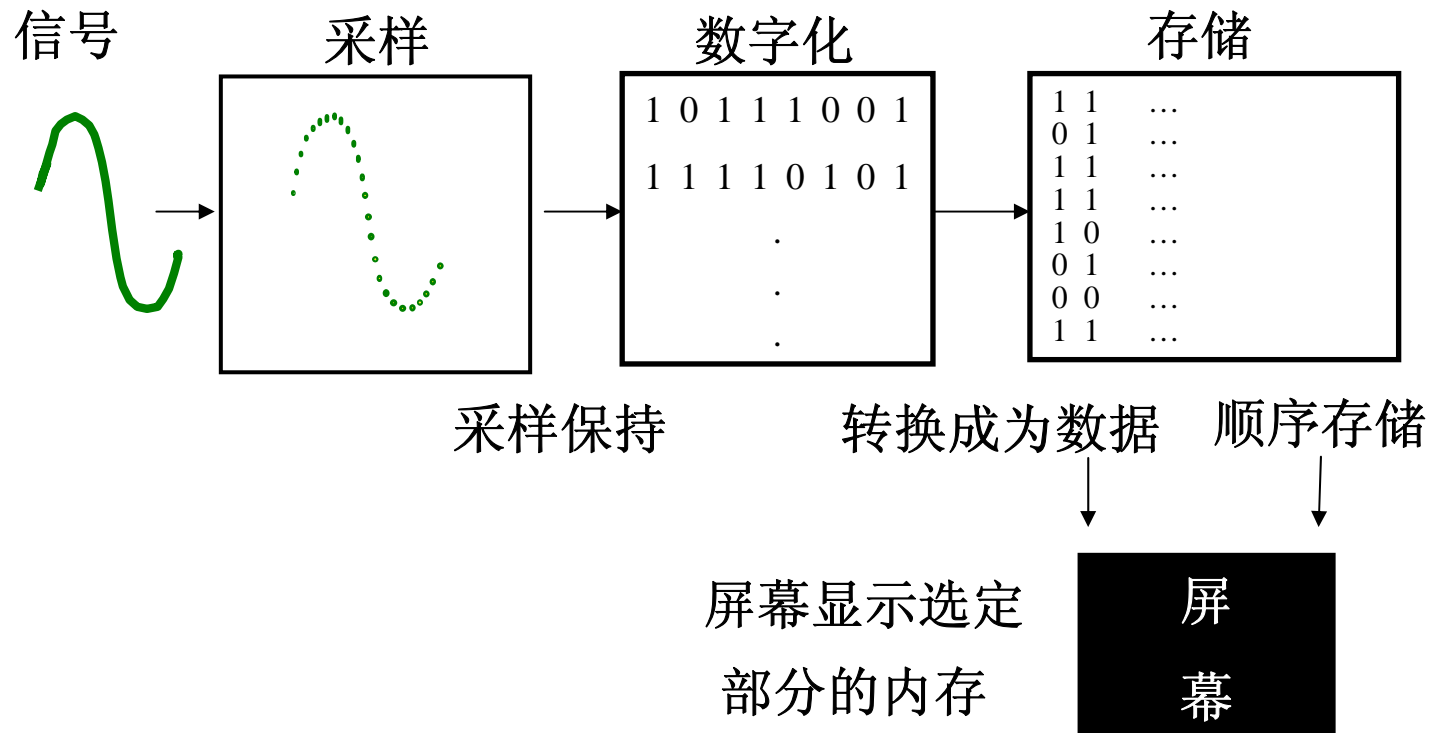
采样：通过测量等时间间隔波形的电压幅值，并把该电压大小转换为8位二进制代码表示的数字信息。

存储：把采样所得的数字信息依序存储到高速环形存储器里。

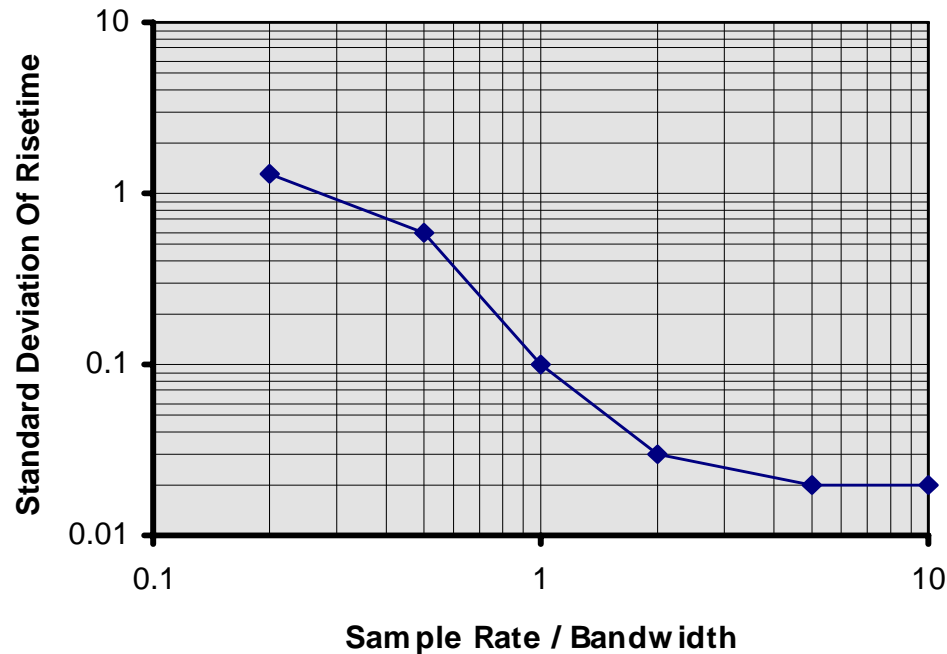


采样过程

采样时发生了什么？

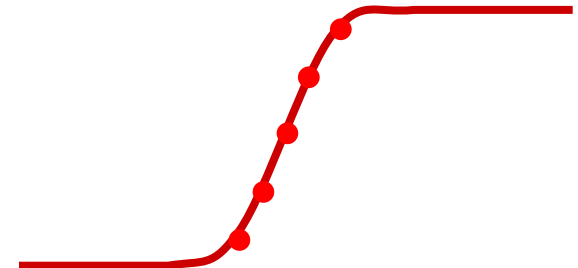
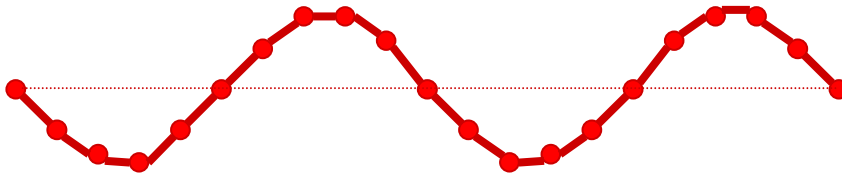


为什么需用高采样？



采样率	时间/ 采样点	采样率 /带宽	平均上 升时间	方差
200 MS/s	5 ns	0.2	4.7 ns	1.3 ns
500 MS/s	2 ns	0.5	2.3 ns	0.6ns
1 GS/s	1 ns	1.0	1.6 ns	0.1 ns
2 GS/s	0.5 ns	2.0	1.27 ns	0.03 ns
5 GS/s	0.2 ns	5.0	1.16 ns	0.02 ns
10 GS/s	0.1 ns	10.0	1.15 ns	0.02 ns

- 超过带宽5倍以上的采样率可保证好的测量精度
- 测试脉冲波, 需在上升沿采样大于5个点
- 高采样率减少了测试波形的失真。



存储深度

示波器通过采样把模拟信号变换为数字信号，每一个采样点用八位的二进制数表示，即一个字节。

示波器显示窗口一次性可显示的最大波形采样点数即为示波器的存储深度；也可理解为一个波形记录的最大采样点数。

在存储深度一定的情况下，存储速度越快，存储时间就越短，他们之间是一个反比关系。存储速度等效于采样率，存储时间等效于采样时间，采样时间由示波器的显示窗口所代表的时间决定，所以

$$\text{存储深度} = \text{采样率} \times \text{采样时间} \quad (\text{距离} = \text{速度} \times \text{时间})$$

提高示波器的存储深度可以间接提高示波器的采样率：当要测量较长时间的波形时，由于存储深度是固定的，所以只能降低采样率来达到，但这样势必造成波形质量的下降；如果增大存储深度，则可以以更高的采样率来测量，以获取不失真的波形。

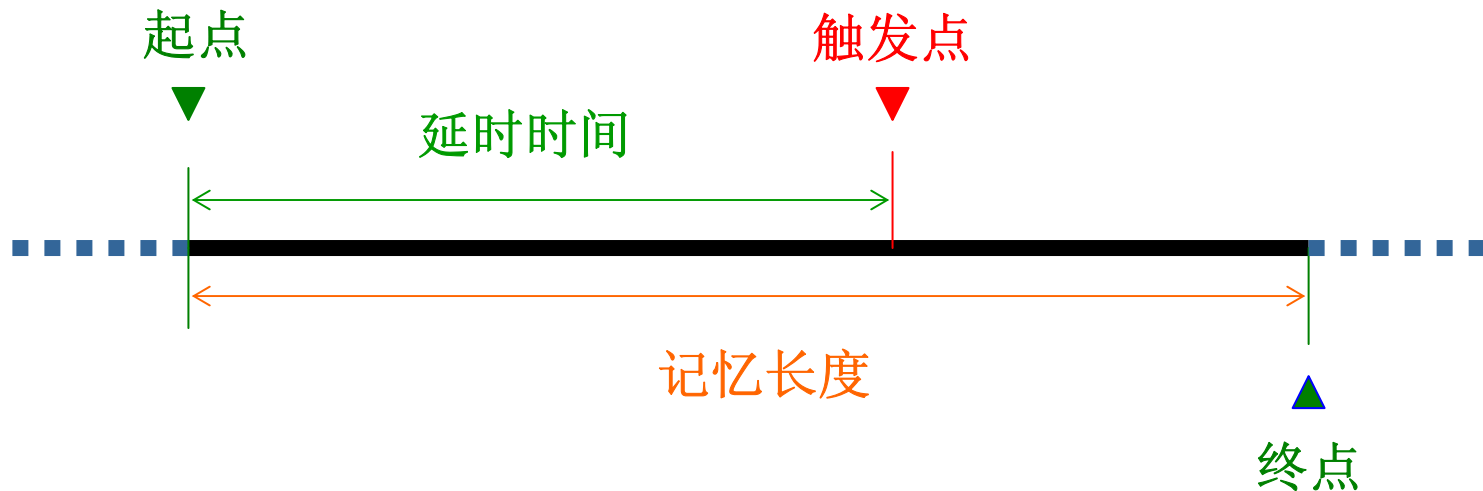
波形存储原理

示波器的存储由两个方面来完成：

触发信号和延时的设定确定了示波器存储的起点；

示波器的存储深度决定了数据存储的终点。

记录时间 = 记录长度 / 采样率



采样、存储深度及带宽选择实例

已知条件：希望获取**2ms**的波形，被测信号为**500MHz**的差分信号，选择合适的示波器带宽、存储深度和采样率。

- 1 示波器带宽选择为被测信号**5-10**倍，具体值取**6**倍，即**3GHz**；探头带宽最好大于示波器带宽，选择**3.5GHz**；示波器测量系统带宽为**2.28GHz**；
- 2 信号周期**2ns**，上升时间估算为周期的**10%**，即**200ps**。要保证波形不失真，上升沿至少有**4**个采样点，即采样点间距**50ps**，采样率为**20GS/s**。
- 3 在**20GS/s**的采样率下，获取**2ms**的波形，则所需存储深度为：
存储深度 = 采样率 × 采样时间 = **20GS/s × 2ms = 40M**
- 4 根据计算结果，选择和计算结果指标尽量相近的示波器如下：
WP7300：3GHz示波器，20GS/s@2Ch；10GS/s@4Ch；48Mpts@2Ch，24M@4Ch

触 发

触发：按照需求设置一定的电压幅值、时间、波形变化率等方面的条件，当波形流中的某一个波形满足这一条件时，示波器即实时捕获该波形和其相邻部分，并显示在屏幕上。



触发条件的唯一性是精确捕获的首要条件

为了观察特定波形之前发生的更多事件，把触发点往显示窗口右方推移一段时间，即是延迟触发；

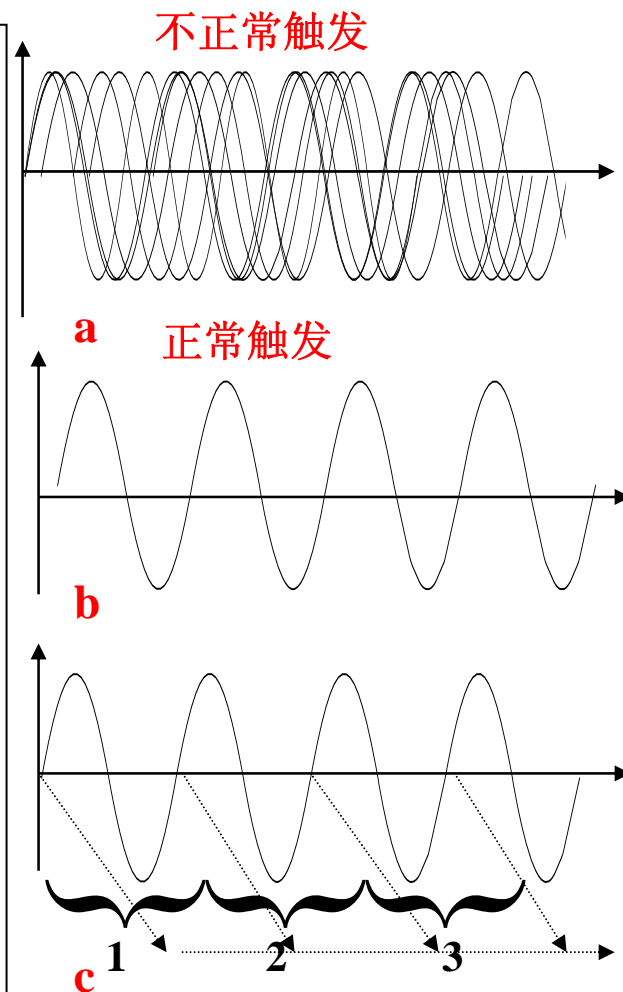
为了了解特定波形之后发生的更多事件，把触发点往显示窗口左方推移一段时间，即是超前触发。

示波器触发的作用

触发电路的作用就是保证每次时基在屏幕上扫描的时候，都从输入信号上与定义的触发点相同的点开始，这样每一次扫描的波形就同步的，从而显示稳定的波形，见图b/c；没有触发电路在屏幕上看到的将会是具有随机起点的很多波形杂乱重叠的图象，见图a。

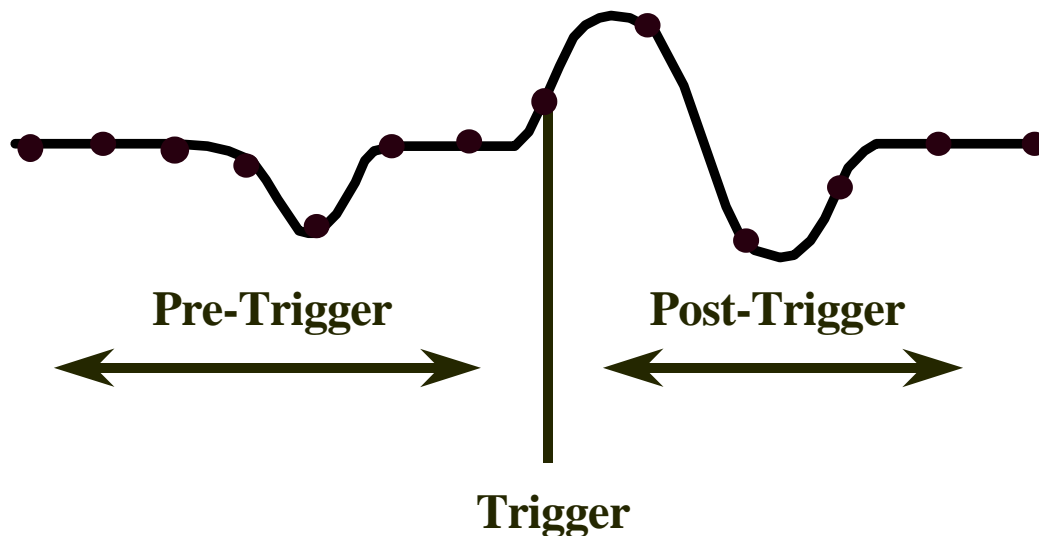
触发是使用示波器最麻烦的一点，示波器提供了许多触发方式，可根据测量问题加以应用。

作为数字示波器来说，触发实际上参与了确定波形的存储起点。



预触发/后触发

- 采样点数字化
- 时间等间隔
- 可选的预/后触发



数字示波器的一个最显著特点在于它容许用户观看触发前的事件。这是因为数据被连续地存储到内存中，同时触发事件在数据量足够后停止采集。

触发耦合

触发耦合：触发信号与触发电路的耦合方式

- 默认时为**DC**耦合，触发源直接连到触发电路
- 交流耦合：触发源通过一个串联的电容连到触发电路
- HF**抑制：使触发源信号通过低通滤波器以抑制高频分量，这意味即使一个低频信号中包含很多高频噪声，仍能使其按低频信号触发。
- LF**抑制：使触发源信号通过一个高通滤波器以抑制其低频成分，这对于显示包含很多电源交流声的信号时的情况是很有用的。

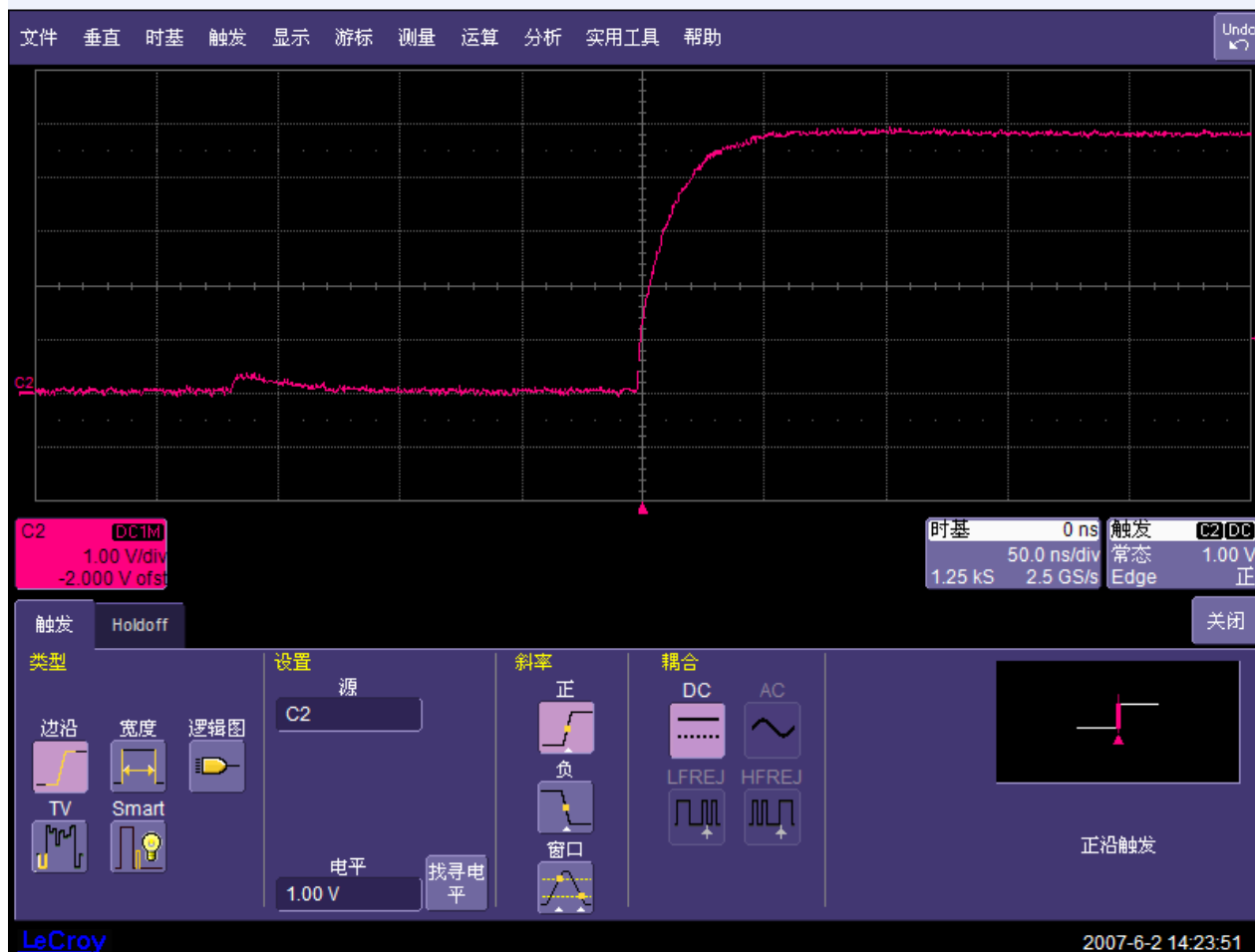
边沿触发

当被测信号的电平变化方向与设定相同，其值变化到与设定值相同时，示波器被触发，并捕捉波形。

正边沿触发

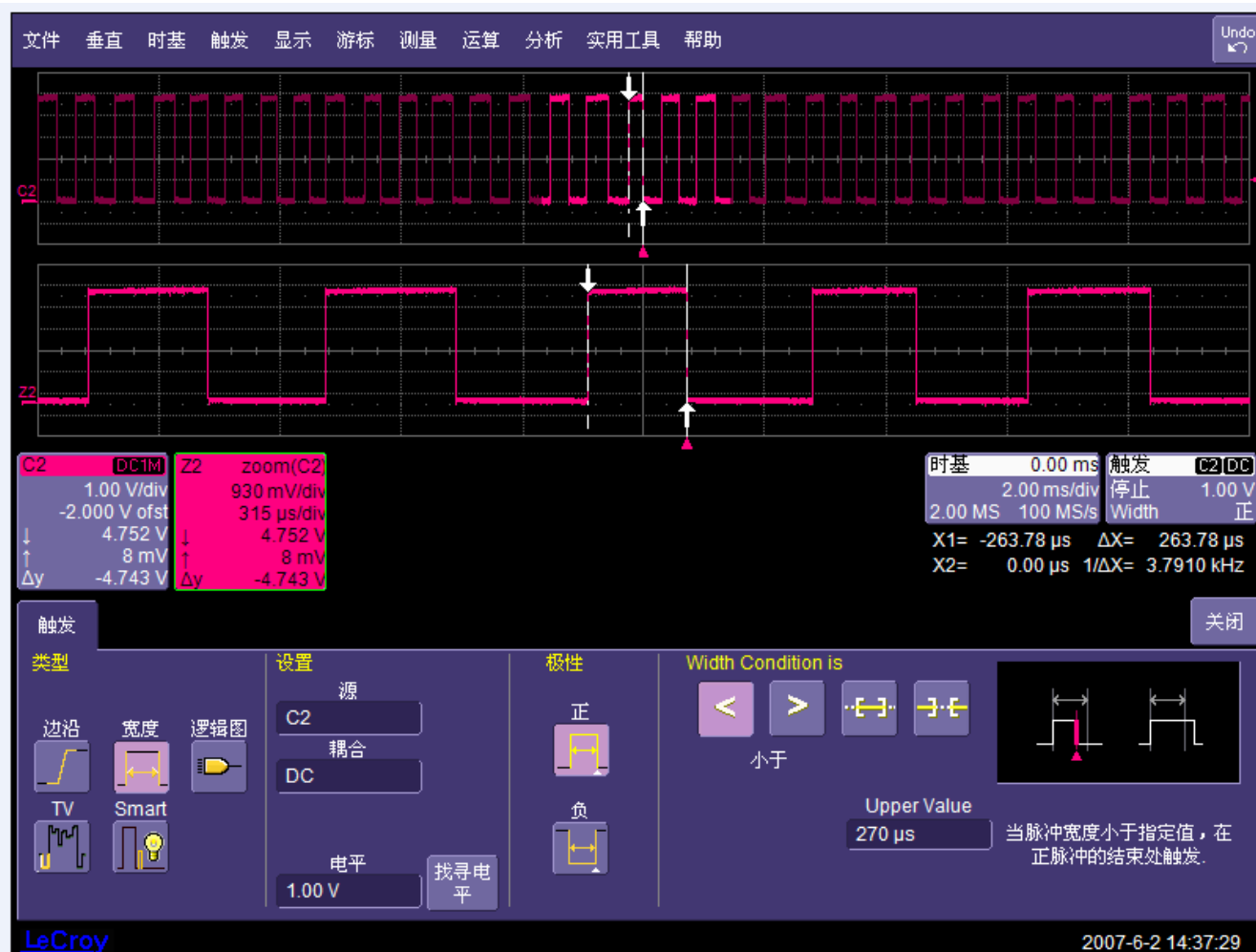
负边沿触发

窗口触发



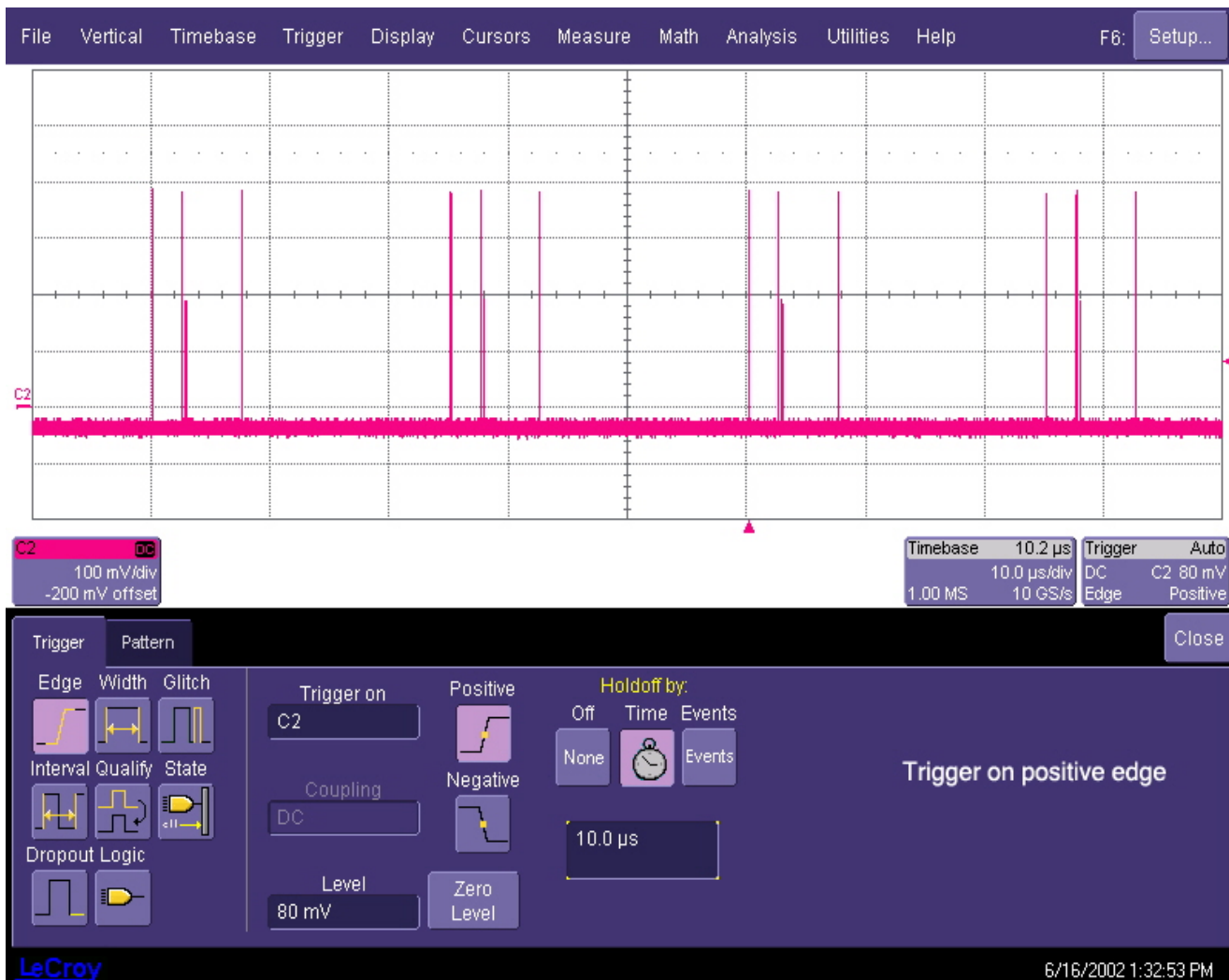
宽度触发

输入脉冲的极性和设定一致，宽度符合设定值，在该脉冲的后沿与设定触发电平一致时触发。



保持触发Holdoff

根据信号满足设定持续时间值 (Time) 或事件数 (Evts) 后触发



- ▶ 最长保持20秒或1到9,999,999个事件

间隔触发Interval

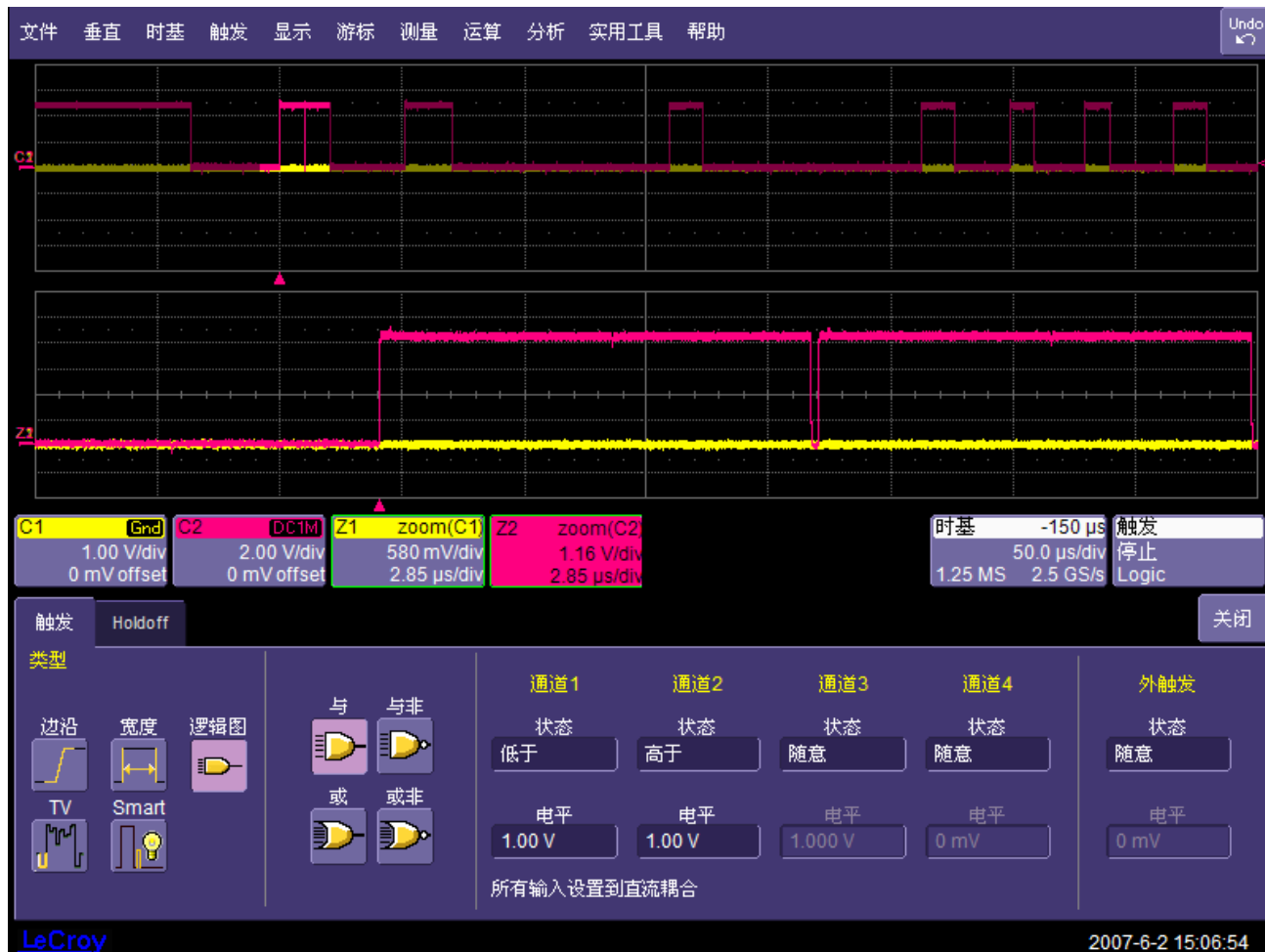
根据信号周期或间隔值大小触发



- ▶ 范围从2ns到20s
- ▶ 有包含/排外选择模式

逻辑触发

通道与通道之间的输入电平值满足设定的逻辑关系时，各个通道被同时触发，稳定的显示在时间窗口中。



TV触发

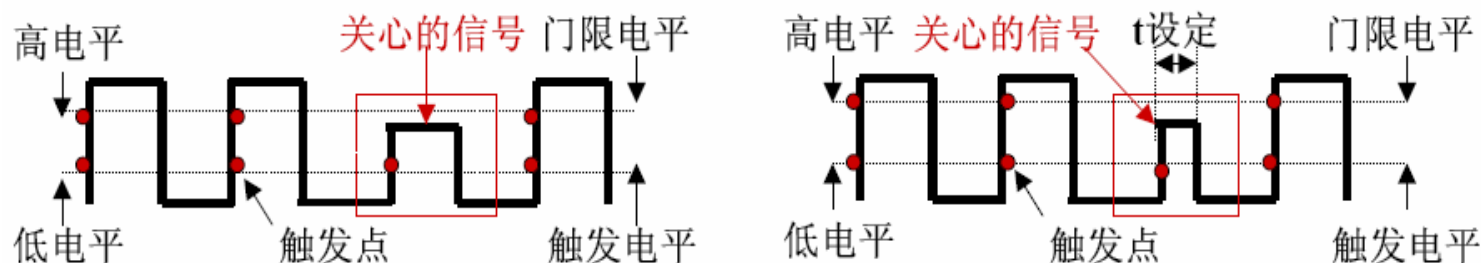
TV触发：专门为电视信号而设计的一种触发方式，在该模式下触发电平控制不起作用。示波器使用视频信号中同步脉冲作为触发信号。

TV触发有两种模式，**TVF** 场和**TVL**行



其他触发方式

欠幅触发：当脉冲序列的宽度不确定，大多数脉冲信号的幅值相同，但有小概率的欠幅信号时所采取的一种触发方式。



毛刺触发：对于宽度确定而幅度不确定的脉冲序列来讲，可以用毛刺触发来捕捉异常信号。

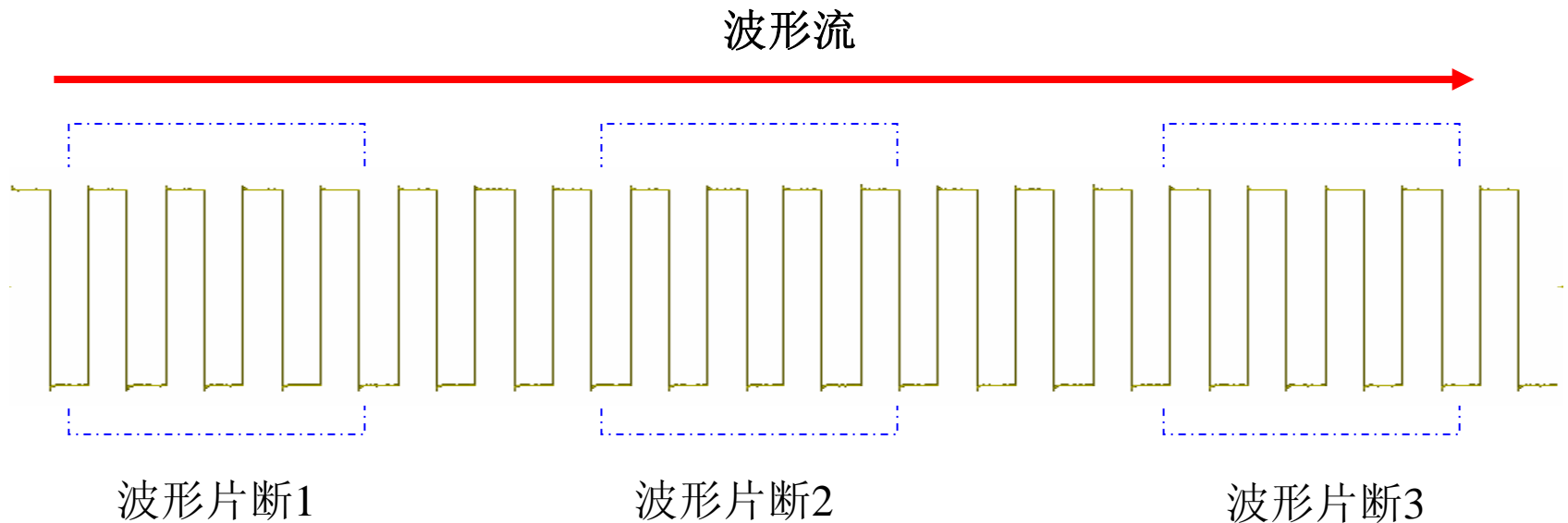


通信触发：根据特定的通信协议码型而设定的触发方式。比如I²C触发、SPI触发、CANbus触发等。

示波器的波形显示原理

在单位时间内截取波形流中的若干个波形片断，也即一定时间段内的波形来重复显示在示波器屏幕上；波形片断的长短由示波器屏幕所代表的时间长短决定。

示波器屏幕所代表的时间长短叫做波形显示的时间窗口，其值等于示波器的时基旋钮所代表的设定值乘以**10**（分格）。



数字示波器的滚动模式(Roll Mode)

滚动模式是一种可以应用于全连续显示的方式

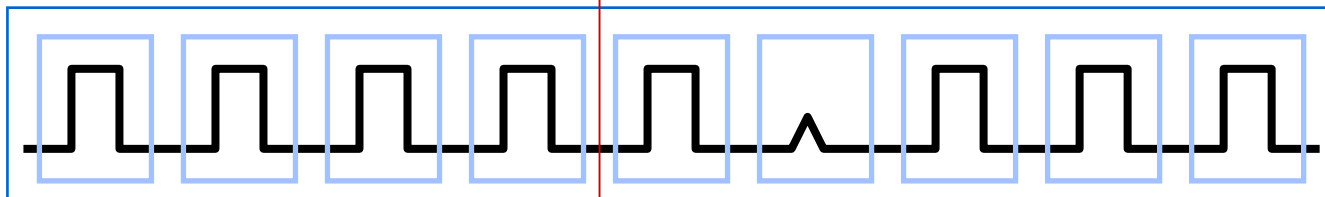
在这种模式下，示波器采集采样点并立即将采集的数据复制到显示存储器。而这些新的采样点显示于屏幕的右面，屏幕上已有的波形则向左滚动。老的采样点一旦移到屏幕左面即行消失。这样一来屏幕上显示的波形总是反映出最新信号对时间变化的情况。

由于有了滚动模式，就可以用示波器来代替图表记录仪来显示慢变化的现象，如化学过程、电池的冲放电周期或温度对系统性能的影响等。

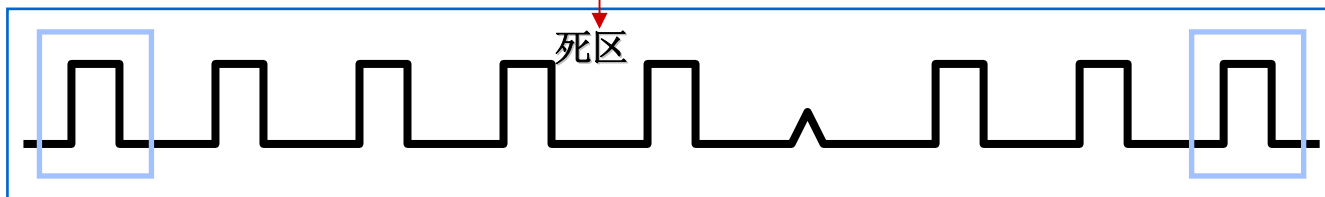
波形捕获的比较

为什么出现了死区？

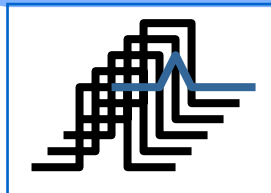
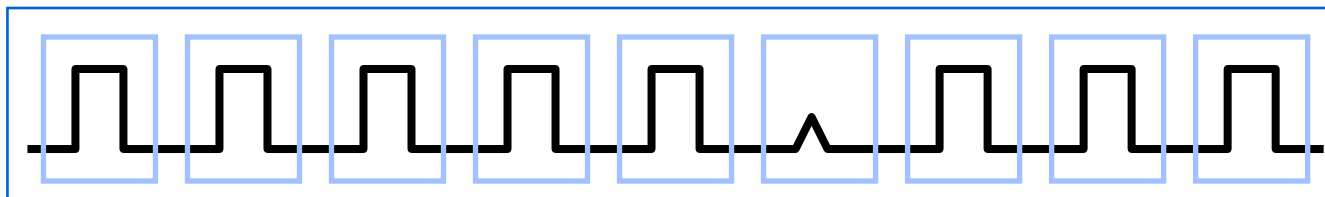
模拟示波器



普通数字示波器



力科
WaveStream
数字示波器

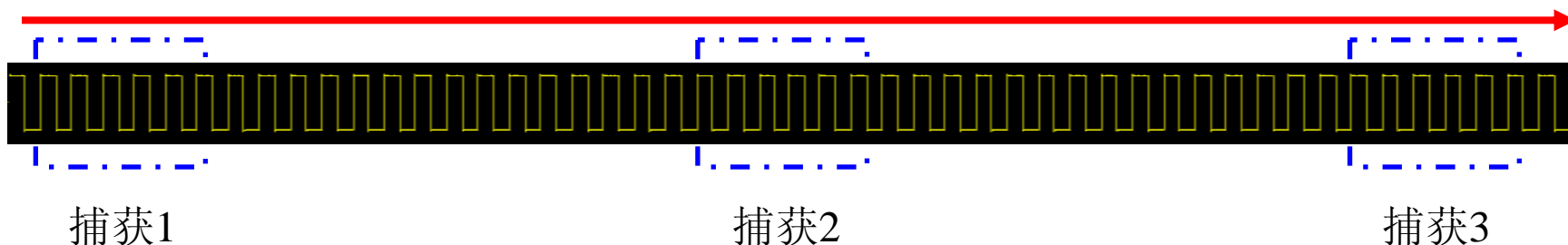


波形捕获率

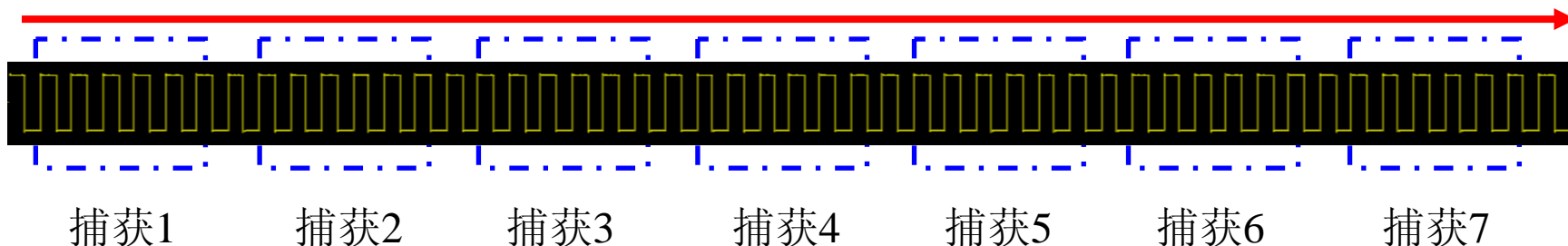
波形捕获率也就是波形刷新率，即单位时间内示波器屏幕所更新的波形片段次数。正常显示情况下，示波器所捕获波形仅占波形总量的10%左右，这就造成大量波形的漏失，发现异常的概率降低。

WaveStream技术：核心就是快刷新，把波形捕获率提高到8000次/秒，可以更容易观察动态复杂信号和隐藏在正常信号中的异常波形，为精确捕获创造条件。

普通显示模式



WaveStream模式

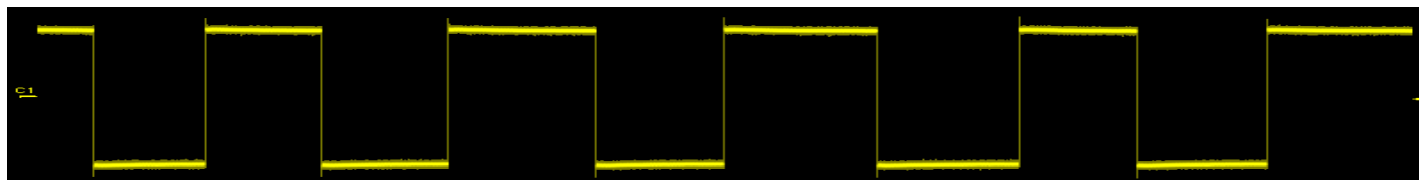


快刷新与模拟余辉

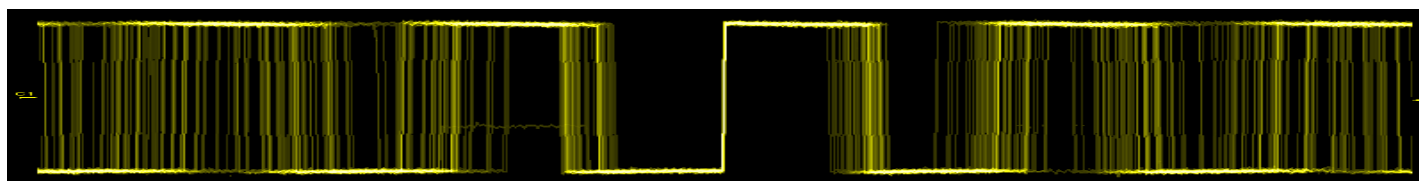
模拟余辉是对历史波形的叠加显示，以体现时间关系上前后波形的不一致性，是一种纯粹的显示处理技术，没有提高波形捕获率。

快刷新是以提高波形捕获率为核心的示波器波形处理技术，可以显著提高示波器的性能，发现波形流中更多的异常信号。

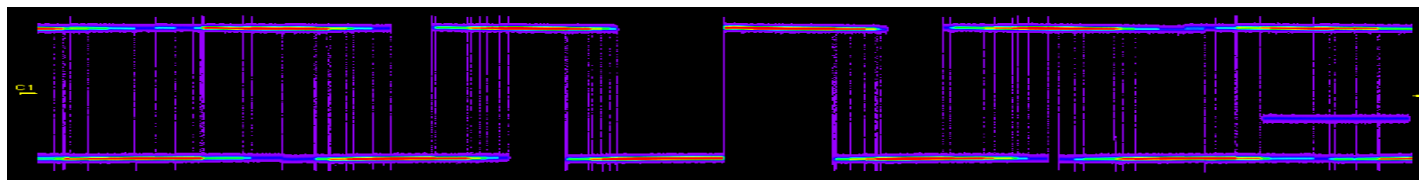
实际
波形



快刷新
模式



模拟余
辉模式



感谢您的参与！