

数字示波器原理和应用

SHUZI SHIBOQI YUANLI HE YINGYONG

孙灯亮 编著



上海交通大学出版社

数字示波器原理和应用

孙灯亮 编著

上海交通大学出版社

内 容 简 介

本书从理论和实践两方面介绍了数字示波器的基础理论和具体应用,分为上、下两卷。上卷介绍数字示波器的工作原理,从被测对象的特征、示波器硬件结构、关键概念和技术点、波形参数测量定义、探头技术原理等角度探讨数字示波器的工作原理和相关概念。下卷介绍数字示波器在测试各种总线和接口标准上的具体应用,从通用的测量分析(抖动、眼图、均衡、嵌入、去嵌入),到具体的低速和高速总线和接口的测量,比较全面地介绍了数字示波器的各种具体应用。本书适合从事电子工程领域和通信工程领域的数字系统研发和测试工作者,以及大专院校电子工程、通信工程、电子测量与仪器仪表等专业的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

数字示波器原理和应用 / 孙灯亮编著. —上海:
上海交通大学出版社, 2012
ISBN 978—7—313—08292—3

I. ①数… II. ①孙… III. ①数字示波器
IV. ①TM935.37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 068564 号

数字示波器原理和应用

孙灯亮 编著

上海交通大学 出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

上海交大印务有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787 mm×1092 mm 1/16 印张: 15.5 字数: 377 千字

2012 年 5 月第 1 版 2012 年 5 月第 1 次印刷

印数: 1~2530

ISBN 978—7—313—08292—3/TM 定价: 60.00 元

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系
联系电话: 021—54742979

数字技术是第三次科技革命即信息科技革命的推动力量之一。

在计算机领域,系统总线在 2002 年前后从并行的 PCI 总线架构(典型信号速率 33 MHz)转向串行的 PCI Express 总线架构。第一代 PCI Express 的信号速率是 2.5 Gbps;现在主流计算机都采用第二代的 PCI Express,其信号速率是 5 Gbps;新的工作站和服务器平台已经在使用第三代的 PCI Express,其信号速率达到 8 Gbps;第四代的高达 16 Gbps 信号速率的标准已经开始制定。在嵌入式领域,如雷达系统、通讯系统、图像处理系统和国防军备装备等系统,最常用的替代 PCI 总线架构的总线互连标准是 RapidIO,现在几乎都采用串行的 RapidIO 标准,信号速率达到 3.125 Gbps。第二代 RapidIO 的信号速率达到 6.25 Gbps,很多嵌入式系统已经开始研究和使用的。

除了系统内部互连的 PCI Express 和 RapidIO 总线外,外部高速数字接口也大都采用串行架构,如存储接口的 SATA 总线,第一代信号速率是 1.5 Gbps,第二代是 3 Gbps,现在主流是第三代,信号速率高达 6 Gbps。非常常用的是 USB 接口,主流是 USB 2.0,信号速率是 480 Mbps,正在慢慢转向 USB 3.0,信号速率是 5 Gbps。高清多媒体和视频接口总线常用的是 HDMI 和 DisplayPort,前者信号速率达到 3.4 Gbps,后者已经达到 5.4 Gbps。Intel 和 Apple 公司正在做新的努力,用 Thunderbolt 或 LightPeak 统一各种总线标准,信号速率已经高达 10.3125 Gbps。可见这 10 年来数字技术发展之迅速。

测试高速数字总线和接口最常用的仪器是数字示波器。安捷伦在 2002 年推出的 6 GHz 带宽示波器 54855A 是当时业界第一台能在 4 个通道上以全带宽提供每通道 20 GSa/s 采样的示波器,代表当时示波器技术的最高水平。而到 2010 年,安捷伦已经推出代表当年业界最高水平的 32 GHz 带宽的磷化铟示波器。可见示波器技术在高速数字技术飞速发展的推动下进展的迅速。

现在,数字示波器已经成了研发高速数字系统和保证生产品质的必备工具之一。以前电子工程师的配置是人手一个万用表,现在已经慢慢变成了人手一台示波器。因而了解和掌握数字示波器的工作原理和具体应用也成为数字系统研发和品质工程师的必备技能之一。



本书是一部论述电子系统中数字信号测量的理论和实践问题的专著。因为市面上还没有全面介绍数字示波器原理和应用的书籍,希望这本书能够填补这个空白。本书结合多年的实践经验,把以前陆续在杂志和网络上发表的文章综合一起,按数字信号测量的理论和实践为主线增加相应内容编写而成,分为上、下两卷。上卷介绍数字示波器的工作原理,从被测对象的特征、示波器硬件结构、关键概念和技术点、波形参数测量定义、探头技术原理等角度探讨数字示波器工作原理和相关概念。下卷介绍数字示波器在测试各种数字总线和接口标准上的具体应用,从通用的测量分析(抖动、眼图、均衡、嵌入、去嵌入),到具体的低速高速总线和接口的测量,比较全面地介绍了数字示波器的各种具体应用。

本书能够成功出版,首先要感谢安捷伦科技(中国)有限公司,没有这样的工作平台和实践机会是没法保证书籍的质量的。然后要感谢技术工程部经理李建宇和数字测量市场部经理杜吉伟,没有他们的鼓励和支持,本书也很难成功出版。还要感谢提供素材的李凯、马卓凡、田志东、胡海洋等技术专家,他们的知识和经验增强了内容的实用性。最后,还要感谢在安捷伦共同工作的其他同仁,特别是销售部区域经理、客户经理和销售工程师,没有他们的支持,很难在书籍的推广上走得更远。初次出书,不足之处在所难免,欢迎读者们指正。

孙灯亮

上卷 数字示波器原理

第 1 章 示波器背景和被测对象

- 1.1 示波器背景
- 1.2 示波器的主要应用分类
- 1.3 电子信号
- 1.4 时钟信号和数据信号频谱的差异
- 1.5 时钟信号和数据信号的五次谐波点幅度
- 参考文献

第 2 章 数字示波器硬件结构原理

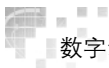
- 2.1 数字示波器硬件架构
- 2.2 单片 80 G/s 采样电路原理
- 参考文献

第 3 章 数字示波器信号保真度和波形重建

- 3.1 数字技术的发展推动数字示波器性能的提升
- 3.2 探头系统对被测信号的影响和发展
- 3.3 数字示波器的体系结构及其带宽和频响
- 3.4 数字示波器模数转换器 ADC 的采样和波形重建
- 3.5 数字示波器高精度测量的要求小结
- 参考文献

第 4 章 理解示波器的抖动测量本底和本底噪声

- 4.1 示波器抖动测量本底
 - 4.1.1 固有抖动
 - 4.1.2 抖动测量本底
 - 4.1.3 长期抖动
 - 4.1.4 抖动验证



- 4.1.5 抖动测量本底小结
- 4.2 示波器的本底噪声
 - 4.2.1 本地噪声简介
 - 4.2.2 噪声的定义和测量
 - 4.2.3 测量噪声峰峰值
 - 4.2.4 使用探头测量噪声
 - 4.2.5 在噪声条件下进行测量
 - 4.2.6 观察“胖”波形
 - 4.2.7 本底噪声小结

参考文献

第 5 章 ADC 的性能指标和数字示波器有效位 ENOB 指标

- 5.1 ADC 的性能指标
- 5.2 数字示波器的有效位指标
- 5.3 ENOB 的定义和测量
- 5.4 如何提高示波器的 ENOB

参考文献

第 6 章 示波器波形更新速率及其处理技术

- 6.1 波形捕获率的概念
- 6.2 DPO 原理
- 6.3 MegaZoom 原理
- 6.4 FPGA 技术在示波器数字信号处理中的应用
- 6.5 总结

参考文献

第 7 章 数字示波器的触发技术

- 7.1 触发的作用
- 7.2 触发器简单工作原理
- 7.3 触发释抑
- 7.4 边沿触发
- 7.5 边沿再边沿触发
- 7.6 边沿转换时间触发
- 7.7 毛刺触发
- 7.8 码型和状态触发
- 7.9 脉冲宽度触发
- 7.10 矮电平触发
- 7.11 建立时间和保持时间触发
- 7.12 超时触发

- 7.13 窗口触发
- 7.14 视频触发
- 7.15 条件限定触发
- 7.16 串行和协议触发
- 7.17 InfiniiScan 触发
- 7.18 多级触发
- 参考文献

第 8 章 数字示波器的波形参数测量、数学运算、直方图分析和 FFT 变换

- 8.1 示波器波形测量简介
- 8.2 波形测量关键点
- 8.3 电压和时间参数的测量
- 8.4 示波器中的数学运算
- 8.5 示波器中的直方图分析
- 8.6 示波器中的 FFT 变换
- 参考文献

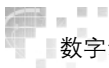
第 9 章 示波器探头技术

- 9.1 探头的负载效应
- 9.2 探头的类型
- 9.3 有源探头
- 9.4 有源探头附件
- 9.5 探头及附件准确度验证
- 9.6 典型的示波器探头介绍
- 参考文献

下卷 数字示波器的典型应用

第 10 章 抖动测量和分析

- 10.1 抖动的定义及与相位噪声和频率噪声的关系
- 10.2 抖动成分的分解及各个抖动成分的特征和产生原因
 - 10.2.1 随机抖动
 - 10.2.2 确定性抖动
 - 10.2.3 周期性抖动和子速率抖动
 - 10.2.4 数据相关抖动
 - 10.2.5 占空比失真
 - 10.2.6 使用浴盆曲线和双狄拉克模型预估总体抖动
- 10.3 高级抖动溯源分析方法
- 参考文献



第 11 章 眼图测量和分析

- 11.1 眼图概念
- 11.2 眼图模板
- 11.3 眼图测试对仪器的要求
- 11.4 眼图测试中的时钟恢复
- 11.5 眼图参数的定义
- 11.6 有问题眼图的调试
- 参考文献

第 12 章 均衡测量和分析

- 12.1 均衡需求背景
- 12.2 均衡简介
- 12.3 前馈均衡
- 12.4 判决反馈均衡
- 12.5 前馈均衡与判决反馈均衡的比较
- 12.6 连续时间线性均衡
- 12.7 小结
- 参考文献

第 13 章 嵌入和去嵌入测量和分析

- 13.1 线性器件/系统和非线性器件/系统的区别
- 13.2 S 参数的含义
- 13.3 嵌入和去嵌入基本概念
- 13.4 用 InfiniiSim 进行嵌入和去嵌入处理
- 13.5 DDR2 去嵌入测量实例
- 参考文献

第 14 章 RapidIO 测试思路和方法

- 14.1 RapidIO 总线的出现及其体系结构和应用
- 14.2 RapidIO 信号完整性测试及其最必要的波形参数测试
- 14.3 RapidIO 互连通道测试
- 14.4 RapidIO 接收性能和误码率测试
- 14.5 RapidIO 协议层调试
- 14.6 小结
- 参考文献

第 15 章 PCIe 3.0 Tx 信号品质一致性测试方法和步骤

- 15.1 PCIe 3.0 Tx 一致性测试点
- 15.2 PCIe 3.0 Tx 一致性测试仪器和附件要求

- 15.3 PCIe 3.0 Tx 一致性测试仪器连接
- 15.4 让被测件产生测试码型
- 15.5 使用 InfiniiSim 工具嵌入封装参数
- 15.6 使用 Sigtest 软件进行波形参数分析,并生产测试报告,判断结果
- 参考文献

第 16 章 从物理层到协议层的 USB 2.0 一致性测试方案

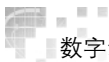
- 16.1 概述
- 16.2 USB 2.0 基本规范
- 16.3 9000 系列示波器概述
- 16.4 基于 9000 示波器的 USB 2.0 物理层测试
- 16.5 基于 9000 示波器的 USB 2.0 协议层测试
 - 16.5.1 USB 2.0 的协议触发
 - 16.5.2 USB 2.0 的协议解码
- 16.6 小结
- 参考文献

第 17 章 DDR 信号完整性测量

- 17.1 DDR 1&2&3 信号完整性测试分析技术探析
 - 17.1.1 DDR 1&2&3 总线概览
 - 17.1.2 DDR 1&2&3 时钟总线的信号完整性测试分析
 - 17.1.3 DDR 1&2&3 地址、命令总线的信号完整性测试分析
 - 17.1.4 DDR 1&2&3 数据总线的信号完整性测试分析
 - 17.1.5 小结
- 17.2 DDR3 总线信号完整性测试需要关注的事项
 - 17.2.1 探测
 - 17.2.2 读写信号分离
 - 17.2.3 自动化一致性测试
 - 17.2.4 调试
- 17.3 DDR2 和 DDR3 BGA 探头适配器的加工安装方法
- 参考文献

第 18 章 数字视频接口测量

- 18.1 数字视频接口背景简介
- 18.2 DVI&HDMI 数字视频接口及测量
 - 18.2.1 DVI&HDMI 总线简介
 - 18.2.2 HDMI 一致性测试标准
 - 18.2.3 DVI&HDMI 测试内容和测试方法
 - 18.2.4 HDMI 测量方案



- 18.2.5 BitifEye 软件——自动化 HDMI 接收器测试
- 18.3 DisplayPort 数字视频接口及测量
 - 18.3.1 DisplayPort 的设备分类
 - 18.3.2 DisplayPort 的技术特点
 - 18.3.3 DisplayPort 的未来
 - 18.3.4 DisplayPort 的测试
 - 18.3.5 DisplayPort 的 Source 测试
 - 18.3.6 DisplayPort 的完整测试方案
- 18.4 MHL 数字视频接口及测量
 - 18.4.1 MHL 技术简介
 - 18.4.2 MHL 一致性测试内容
 - 18.4.3 MHL 源一致性测试方法

参考文献

第 19 章 千兆以太网一致性测量

- 19.1 简介
- 19.2 10M/100M/1000M 以太网测试内容
- 19.3 10M/100M/1000M 以太网测试码型
- 19.4 10M/100M/1000M 以太网测试方法
- 19.5 10M/100M/1000M 以太网回波损耗测量

参考文献

第 20 章 10Gbase-T 物理层一致性测试方法

- 20.1 概述
- 20.2 示波器测试部分
 - 20.2.1 最大跌落测试
 - 20.2.2 抖动测试
 - 20.2.3 发射时钟频率测试
- 20.3 频谱仪测试部分
 - 20.3.1 发射器线性度测试
 - 20.3.2 发射器功率频谱密度
 - 20.3.3 发射器功率电平
- 20.4 网络分析仪测试部分
- 20.5 小结

参考文献

第 21 章 用示波器进行宽带雷达信号的矢量分析

- 21.1 前言
- 21.2 宽带雷达分析仪

- 21.3 线性调频雷达矢量分析
- 21.4 巴克码雷达矢量分析
- 21.5 小结
- 参考文献

第 22 章 用便携式示波器进行低速串行总线的测量

- 22.1 用便携式示波器进行低速串行总线测量的宏观思路
 - 22.1.1 背景简介
 - 22.1.2 硬件解码
 - 22.1.3 自动搜索和导航功能
 - 22.1.4 多总线分析
 - 22.1.5 使用分段存储器以捕获多个串行总线数据包
 - 22.1.6 探测差分串行总线
- 22.2 MIL-STD-1553B 总线简介及测试方法
 - 22.2.1 1553 总线简介
 - 22.2.2 1553 总线的技术特点
 - 22.2.3 1553 总线的测试方法
 - 22.2.3.1 总线的触发和解码
 - 22.2.3.2 总线的眼图和模板测试
 - 22.2.3.3 测试仪器的选择
 - 22.2.3.4 1553 总线的未来
- 22.3 I2C 总线简介及测试方法
 - 22.3.1 集成电路间总线(I2C)简介
 - 22.3.2 使用 MSO 的触发特性调试 I2C 总线系统
 - 22.3.2.1 I2C 触发特性
 - 22.3.2.2 内容触发:在特定地址值和数据值的读写帧上触发
 - 22.3.2.3 EEPROM 数据读触发
 - 22.3.2.4 I2C 总线启动和停止触发
 - 22.3.2.5 I2C 总线重新启动触发
 - 22.3.2.6 I2C 总线确认丢失触发
 - 22.3.2.7 10 位写入触发
 - 22.3.2.8 硬件加速解码:更快地查找和调试间歇性串行总线错误和信号完整性问题
 - 22.3.2.9 彩色编码
- 22.4 SPI 总线系统测试和调试
 - 22.4.1 串行外设接口简介
 - 22.4.2 SPI 总线调试
- 22.5 CAN 总线系统测试和调试



- 22.5.1 控制器局域网简介
- 22.5.2 使用 MSO 的触发特性调试 CAN 总线系统
 - 22.5.2.1 CAN 触发特性
 - 22.5.2.2 规定波特率
 - 22.5.2.3 触发信号包括 CAN_H, CAN_L, Rx 或 Tx

参考文献

第 23 章 用示波器进行开关电源测量

- 23.1 开关电源原理简介
- 23.2 开关电源测量考虑
- 23.3 自动偏移校正和 U1880A 偏移校正夹具
- 23.4 功率设备分析
- 23.5 输入线路分析
- 23.6 调制分析
- 23.7 输出分析
- 23.8 打开时间/关闭时间分析
- 23.9 瞬时响应分析
- 23.10 生成报告

参考文献

第 24 章 电源完整性测试,调整解调器绝对延时测量,示波器在逻辑分析仪计量中的应用,DAC 设置时间、上升和下降时间测量

- 24.1 电源完整性测量,电源纹波噪声测量
- 24.2 调制器和解调器绝对延时测试方法
 - 24.2.1 调制器绝对延时测试方法
 - 24.2.2 解调器绝对延时测试方法
- 24.3 示波器在逻辑分析仪计量的应用
- 24.4 DAC 设置时间、上升时间和下降时间的测量

参考文献

数字示波器原理和应用

上 卷

数字示波器原理



示波器背景和被测对象



简要说明

要理解电子测量仪器,需要从两个方面着手,其一是被测对象;其二是针对特定被测对象的电子测量仪器的工作原理。数字示波器的主要被测对象是电子信号,其中最重要的是数字信号,对数字信号的时域和频域的理解是掌握数字示波器的关键之一。本章简要介绍示波器的背景知识,电子信号的时域参数概念,重点介绍数字信号的时域和频域特征。

1.1 示波器背景

电子技术在我们的生活中无所不有。每天都有无数人使用电子产品,如手机、电视机和计算机。随着电子技术的进步,这些产品的工作速度也变得越来越快。如今,大多数电子产品都采用了高速数字技术。

工程师需要可以精确设计和测试他们在高速数字产品中所使用的元器件的能力。他们在设计和测试元器件时所使用的仪器必须特别适合处理高速和高频的特性才行,而示波器正好是这样一种仪器。

示波器是一种功能强大的工具,在设计和测试电子器件方面很有用。它在帮助判定系统器件是否正常方面扮演极为重要的角色,而且还能帮助确定新设计的元器件是否按照预想的方式进行工作。示波器的功能远比数字万用表更强大,因为它可以观察电子信号的实际情况。

示波器的应用范围极为广泛,包括手机、计算机、汽车电子生产企业;大学的研究实验室以及航空航天/国防产业等。许多公司都依赖示波器来查找缺陷,从而制造出质量合格的产品。

1.2 示波器的主要应用分类

基本应用

- 波形观察与基本波形参数测量
- 电路诊断与异常信号捕获

信号的高级分析

- 数学运算(加减、积分、微分、FFT、滤波、用户自定义功能等等)
- 时钟恢复与眼图显测试、高级抖动分析与测量

- 串行通信信号的捕捉与解码(I2C、SPI、CAN、USB 等)
- 超宽带信号的调制域分析(UWB、雷达等)

标准数字总线和接口的一致性测试

- USB 2. 0/USB 3. 0, PCI Express 1&2&3, GbE, Fibre Channel, SATA 1&2&3, HDMI, DisplayPort, DDR 1&2&3, MHL, MIPI, Thunderbolt, QPI 等

1.3 电子信号

示波器的主要用途是显示电子信号。通过观察示波器上显示的信号,可以帮助确定电子系统的某个元器件是否在正常工作。因此,欲了解示波器的工作方式,必须先了解信号的基本定义。

电子信号会以波形或脉冲的形式出现,波形的基本特性包括以下各参数。

幅度

在工程应用中经常使用的幅度定义主要有两个。第一种通常称为峰值幅度,定义为干扰信号的最大位移量。第二种是均方根(RMS)幅度。要计算波形的 RMS 电压,必须将波形值平方并求出平均电压,然后再求平方根。

对正弦波来说,RMS 幅度等于峰值幅度的 0. 707 倍。

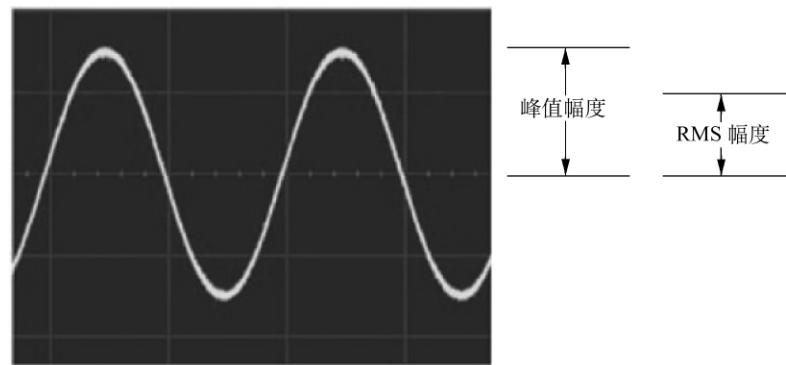


图 1—1 正弦波的峰值幅度和 RMS 幅度

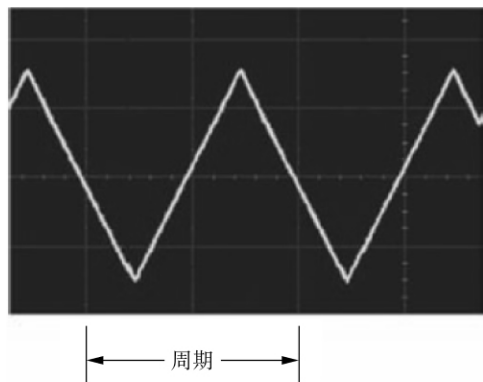


图 1—2 三角波的周期

相移

相移是指两个其他条件都相同的波形之间的水平位移量,以度($^{\circ}$)或弧度(rad)为单位。正弦波的周期以 360° 来表示。因此,如果两个正弦波相差半个周期,那么它们的相对相移就是 180° 。

周期

波形的周期是指波形重复出现一次所花费的时间,以秒(s)为单位。

频率

每个周期性波形都有一个频率。频率是指波形在一秒内重复出现的次数(用 Hz 为单位)。频率与周期互为倒数。

电子信号的波形是指波的形状或图像。波形可以提供许多有关信号的信息,例如,它可以告诉你电压是否突然发生改变、呈线性变化或保持不变。标准的波形有很多种,本节仅介绍最常遇到的几种。

正弦波

正弦波通常与交流(AC)电源有关,例如屋内的电源插座。正弦波的峰值幅度并非一直恒定,如果峰值幅度会随着时间不断地下降,就称这种波形为阻尼正弦波。

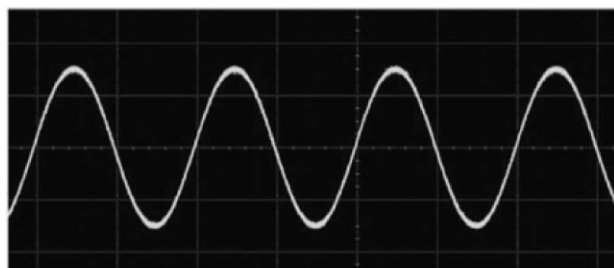


图 1-3 正弦波

方波 矩形波

方波会在两个不同的值之间周期性地跳动,因此在高点和低点部分的长度会相等。矩形波与方波不同的地方在于高度与宽度并不相等。

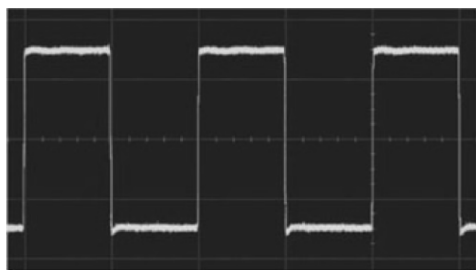


图 1-4 方波



图 1-5 三角波

三角波 锯齿波

在三角波中,电压会随着时间呈线性变化。它的信号边沿称为斜波,这是因为其波形会斜升或斜降到某个电压。由于锯齿波前面或后面的信号沿会随着时间产生线性的电压响应,所以看起来与三角波类似,但后面的信号沿几乎是立即下降的。