



FUNDAMENTOS DO OSCILOSCÓPIO

Manual básico

ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real



CONTENTS

Visão geral	3	Especificações sobre referências de osciloscópios	14
Onde tudo começou	3	Largura de banda	14
A era digital nos chama	3	Número efetivo de bits (ENOB).....	14
Tipos de osciloscópios digitais.....	4	Canais.....	15
Osciloscópios de amostragem digital.....	4	Taxa de amostragem	15
Osciloscópios de amostragem em tempo real	4	Profundidade de memória.....	15
Osciloscópios de sinal misto.....	4	Tipo de disparo.....	15
Elementos básicos de osciloscópios digitais	5	Tempo de subida	15
O sistema vertical.....	5	Resposta de frequência.....	16
O sistema horizontal	6	Ganho (vertical) e precisão de base de tempo (horizontal).....	17
O sistema de disparo	6	Resolução vertical de conversor A/D	17
O sistema de exibição e a interface de usuário	9	Sensibilidade vertical.....	17
		Tela e interface de usuário.....	17
		Recursos de comunicação.....	17
Pontas de prova	10	Medições típicas dos osciloscópios	18
Pontas de prova passivas.....	10	Medições de tensão	18
Pontas de prova ativas	11	Medições de deslocamento de fase	18
Pontas de prova diferenciais	11	Medições de tempo	18
Pontas de prova de corrente	11	Amplitude de pulso e medições de tempo de subida..	18
Pontas de prova de alta tensão.....	11	Decodificação de barramentos seriais	18
		Análise de frequência, estatísticas e funções matemáticas.....	18
Os benefícios de um conversor A/D não intercalado	12		
Considerações sobre a ponta de prova.....	13	Resumo	20
Carregamento de circuito	13		
Aterramento.....	13	Glossário	21
Processo de seleção de ponta de prova	13		

VISÃO GERAL

O osciloscópio é, indiscutivelmente, uma das ferramentas mais úteis já criadas para ser utilizada por engenheiros eletrônicos. Em mais de cinco décadas desde a criação dos osciloscópios analógicos modernos, centenas de documentos úteis e milhares de artigos foram escritos sobre eles, sobre como eles funcionam, sobre como usá-los e exemplos específicos de aplicações de osciloscópios em ação. Diferentemente disso, este manual básico se concentrará em osciloscópios digitais que substituíram seus predecessores analógicos na grande maioria dos usos. Este documento fornece uma breve descrição das origens dos osciloscópios, de sua transição do analógico para o digital, dos tipos de osciloscópios digitais e de seus principais subsistemas, bem como das principais referências de especificações e medições.

Onde tudo começou

Vencedor do prêmio Nobel, o físico K. F. Braun (fig. 1) da Alemanha inventou o osciloscópio de tubo de raios catódicos (CRT) como uma curiosidade física, em 1897. Ele aplicou um sinal oscilante a placas defletoras horizontais e um sinal de teste a um defletor vertical em um CRT revestido de fósforo. As placas produziram a representação gráfica transiente de formas de ondas elétricas na pequena tela de fósforo. Esta invenção evoluiu para um instrumento de medição e foi gradualmente aprimorada ao longo dos 50 anos seguintes. O engenheiro Howard Vollum fez um avanço em 1947, transformando o osciloscópio em um instrumento altamente útil, ao permitir que um disparo controlasse a função de varredura pela primeira vez.

Sem um disparo, os primeiros osciloscópios traçavam a forma de onda da tensão de entrada, iniciando um traço horizontal quando a tensão de entrada excedia um limite ajustável. O disparo permitiu que formas de onda repetidas permanecessem estáveis na tela do CRT, já que várias repetições da forma de onda eram desenhadas sobre o mesmo traço. Se não existir nenhum disparo, um osciloscópio vai desenhar várias cópias da forma de onda em diferentes lugares, resultando em emaranhado incoerente ou em uma imagem que se move na tela.



Fig. 1: O vencedor do prêmio Nobel, físico K. F. Braun

Os osciloscópios continuaram a ter avanços tanto em potencialidades quanto em recursos ao longo dos anos, em conjunto com o rápido desenvolvimento de dispositivos semicondutores analógicos e digitais de alto desempenho e de software.

A era digital nos chama

Os osciloscópios digitais começaram sua ascensão à onipresença na década de 1980 e se beneficiaram com a conversão mais rápida do analógico para o digital (A/D) e da memória para registrar e exibir formas de onda (fig. 2 na próxima página). Até mesmo os primeiros osciloscópios digitais tinham uma flexibilidade de exibição, disparo e análise que nenhum osciloscópio analógico poderia alcançar. Os avanços em semicondutores e softwares transformaram o projeto do instrumento de majoritariamente analógico para majoritariamente digital. O processamento de sinais no domínio digital tem os mesmos benefícios para outros produtos de consumo, comerciais e industriais, mas os osciloscópios digitais tinham vantagens realmente importantes. Em geral, eles agora podiam não só manipular sinais como nunca, mas também analisá-los detalhadamente, enquanto recebiam requisitos especiais cada vez mais complexos, como transmissão de dados de alta velocidade, por exemplo. Além disso, permitiam que os usuários capturassem eventos com base em parâmetros específicos e que vissem o que tinha acontecido antes dos eventos terem ocorrido. Os osciloscópios agora podiam fazer parte de um sistema de teste automatizado graças às redes locais e à Internet, e seus resultados exibidos aos usuários na sala ao lado, na cidade vizinha ou em outro continente. Uma referência importante na arquitetura do osciloscópio digital foi a introdução do disparo digital pela Rohde & Schwarz em 2009, que eliminou limitações inerentes (como jitter de disparo) dos tipos analógicos. Isso será abordado em detalhes mais à frente.

Tipos de osciloscópios digitais

O osciloscópio digital realiza duas funções básicas: aquisição e análise. Durante a aquisição, a amostragem de sinais é salva na memória, e durante a análise, as formas de onda adquiridas são analisadas e exibidas na tela. Existe uma variedade de osciloscópios digitais e os que estão descritos aqui são os mais comuns atualmente.

Osciloscópios de amostragem digital

O osciloscópio de amostragem digital faz a amostragem de sinais antes de qualquer condicionamento de sinal, como atenuação ou amplificação. O projeto permite que o instrumento tenha uma largura de banda muito ampla, mas uma faixa dinâmica um pouco limitada de 1 V (V_{pp}). Diferentemente de outros tipos de osciloscópios digitais, um osciloscópio de amostragem digital pode capturar sinais que têm componentes de frequência muito mais altos do que a taxa de amostragem do instrumento. Isso torna possível medir sinais repetitivos muito mais rápido do que com qualquer outro tipo de osciloscópio. Como resultado, os osciloscópios de amostragem digital são usados em aplicações de largura de banda muito alta, como a fibra óptica, onde seu alto custo pode ser justificado.

Osciloscópios de amostragem em tempo real

Os benefícios da amostragem em tempo real são claros quando o intervalo de frequências de um sinal é menor do que a metade da taxa de amostragem máxima de um osciloscópio. A técnica permite que o instrumento adquira um grande número de pontos em uma única varredura, para disponibilizar uma exibição altamente precisa. Atualmente, é o único método capaz de capturar os sinais transientes de disparo único mais rápidos. Os osciloscópios da série R&S®RTO se enquadram nessa categoria.

No que diz respeito a módulos, os sistemas integrados normalmente abrangem sinais de 1 bit, barramentos seriais e paralelos com e sem clock e formatos de transmissão padronizados ou exclusivos. Todos esses caminhos devem ser analisados, o que normalmente requer configurações complexas de testes ou vários instrumentos. Também é frequentemente necessário exibir tanto sinais

analógicos quanto digitais. Atualmente, muitos osciloscópios têm opções específicas, que transformam o osciloscópio digital em um instrumento híbrido, com recursos de análise de um analisador lógico. Isso é valioso para depurar rapidamente circuitos digitais, graças à capacidade de disparo digital, à alta resolução, à capacidade de aquisição e às ferramentas de análise.

Osciloscópios de sinal misto

Os osciloscópios de sinal misto expandem as funções do osciloscópio digital para incluir análises lógicas e análises de protocolo, o que simplifica a bancada de testes e permite a visualização simultânea de formas de onda analógicas, sinais digitais e detalhes de protocolo em um único instrumento. Os desenvolvedores de hardware utilizam osciloscópios de sinal misto para analisar a integridade de sinal, enquanto os desenvolvedores de software os utilizam para analisar o conteúdo do sinal. Um osciloscópio típico de sinal misto possui dois ou quatro canais analógicos e muitos outros canais digitais. Os canais analógicos e digitais são adquiridos ao mesmo tempo para que possam ser correlacionados no tempo e analisados em um instrumento.



Fig. 2: Desafios de medição dos osciloscópios

Elementos básicos de osciloscópios digitais

Todo osciloscópio digital possui quatro blocos funcionais básicos: sistema vertical, sistema horizontal, sistema de disparo e sistema de exibição. Para aproveitar a funcionalidade geral de um osciloscópio digital, é importante entender as funções e a importância de cada um.

Grande parte do painel frontal de um osciloscópio digital é dedicado às funções verticais, horizontais e de disparo, pois abrangem a maioria dos ajustes necessários. A seção vertical trata da atenuação ou da amplificação de sinais usando um controle que varia volts por divisão, o que altera a atenuação ou a amplificação para adaptar o sinal à tela. Os controles horizontais são para a base de tempo do instrumento e o controle de segundos por divisão determina a quantidade de tempo por divisão exibida horizontalmente na tela. O sistema de disparo realiza a função básica de estabilizar o sinal, iniciar o osciloscópio para fazer uma aquisição e permitir que o usuário selecione e modifique as ações de tipos específicos de disparos. Por fim, o sistema de exibição inclui a própria tela e os drivers, bem como o software necessário para quaisquer funções de exibição.

O sistema vertical

Esse subsistema do osciloscópio (fig. 3) permite que o usuário posicione e dimensione a forma de onda verticalmente, selecione um valor para o acoplamento de entrada e modifique as características do sinal para configurá-las na tela. O usuário pode colocar a forma de onda em uma posição precisa na tela verticalmente e aumentar ou diminuir seu tamanho. Todas as telas do osciloscópio têm uma grade que divide a área visível em 8 ou 10 divisões verticais, cada uma representando uma parte da tensão total. Um osciloscópio com 10 divisões na grade da tela tem uma tensão de sinal visível total de 50 V em divisões de 5 V.

Selecionar 8, 10 ou outra divisão é opcional. O 10 é frequentemente escolhido pela simplicidade: é mais fácil dividir por 10 do que por 8. As pontas de prova também afetam a escala de exibição, já que podem não atenuar os sinais (uma ponta de prova 1x) ou atenuar 10 vezes (uma ponta de prova 10x) e até mesmo 1000x. As pontas de prova serão abordadas posteriormente.

O acoplamento de entrada mencionado anteriormente define como o sinal percorre o caminho entre a captura feita pela ponta de prova através do cabo, e entra no instrumento. O acoplamento de CC fornece 1 MΩ ou 50 Ω de acoplamento de entrada. Uma seleção de 50 Ω envia o sinal de entrada diretamente para o amplificador de ganho vertical do osciloscópio, para que seja alcançada uma maior largura de banda. A seleção dos modos de acoplamento de CA ou de CC (e o valor de terminação de 1 MΩ correspondente) coloca um amplificador em frente ao amplificador de ganho vertical, geralmente limitando a largura de banda a 500 MHz sob todas as condições. O benefício de uma impedância tão alta é a proteção inerente a altas tensões. Ao selecionar "Aterramento" no painel frontal, o sistema vertical é desconectado e o ponto 0 V é exibido na tela.

Os outros circuitos relacionados ao sistema vertical incluem um limitador de largura de banda que, ao diminuir o ruído nas formas de onda exibidas, também atenua o conteúdo do sinal de alta frequência. Muitos osciloscópios também usam um filtro de equalização opcional DSP para estender a largura de banda do instrumento para além da resposta bruta de sua interface, modelando a resposta de fase e de magnitude do canal do osciloscópio. No entanto, esses circuitos precisam da taxa de amostragem para atender aos critérios de Nyquist (a taxa de amostragem deve exceder duas vezes a frequência fundamental máxima do sinal). Para alcançar isso, o instrumento geralmente fica bloqueado em sua taxa de amostragem máxima e não pode ser reduzido para exibir uma duração de tempo mais longa sem desativar o filtro.

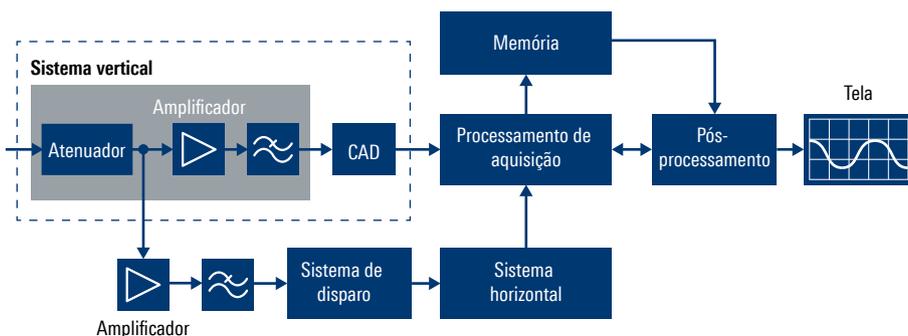


Fig. 3: O sistema vertical

O sistema horizontal

O sistema horizontal está mais diretamente relacionado à aquisição do sinal do que o sistema vertical, e enfatiza as métricas de desempenho, tais como a taxa de amostragem e a profundidade da memória, bem como outras que estão diretamente relacionadas à aquisição e à conversão do sinal. O tempo entre os pontos de amostra é chamado de intervalo de amostragem. Ele representa os valores digitais armazenados na memória para produzir a forma de onda resultante.

O tempo entre os pontos da forma de onda é chamado de intervalo de forma de onda. Como um ponto de forma de onda pode ser constituído a partir de vários pontos de amostragem, os dois estão relacionados e às vezes podem ter o mesmo valor.

O menu do modo de aquisição em um osciloscópio típico é muito limitado, pois com apenas uma forma de onda por canal, os usuários podem escolher apenas um tipo de decimação ou um tipo de forma de onda aritmética. No entanto, alguns osciloscópios podem exibir três formas de onda por canal em paralelo, e o tipo de decimação e os tipos aritméticos de forma de onda podem ser combinados para cada forma de onda. Os modos típicos incluem:

► Modo de amostras:

Um ponto de forma de onda é criado com uma amostra para cada intervalo de forma de onda

► Modo de alta resolução:

Uma média das amostras no intervalo da forma de onda é exibida para cada intervalo

► Modo de detecção de pico:

O mínimo e o máximo dos pontos de amostra em uma forma de onda são exibidos para cada intervalo

► Valor eficaz:

O valor eficaz das amostras dentro do intervalo da forma de onda é exibido; isso é proporcional à potência instantânea

Os modos aritméticos típicos de formas de onda incluem:

► Modo envelope:

Com base nas formas de onda capturadas a partir de um mínimo de dois eventos de disparo, o osciloscópio cria um limite (envelope) que representa os valores mais altos e mais baixos para uma forma de onda

► Modo médio:

A média de cada amostra de intervalo de forma de onda é formada ao longo de uma série de aquisições

O sistema de disparo

O disparo é um dos elementos fundamentais de todo osciloscópio digital, pois captura eventos de sinais para análise detalhada e fornece uma visão estável das formas de onda repetidas. A precisão de um sistema de disparo, bem como sua flexibilidade, determinam quão bem o sinal de medição pode ser exibido e analisado. Conforme observado anteriormente, o disparo digital traz vantagens significativas para o usuário do osciloscópio no que diz respeito à precisão de medição, à densidade de aquisição e à funcionalidade.

O disparo analógico

O disparo de um osciloscópio (fig. 4) garante uma exibição estável de formas de onda para monitoramento contínuo de sinais repetitivos. Por reagir a eventos específicos, ele é útil para isolar e exibir características de sinal específicas, como níveis lógicos de "residual" que não são alcançados e distúrbios de sinal devido a diafonia, bordas lentas ou tempo inválido entre canais. O número de eventos de disparo e a flexibilidade do disparo têm sido aprimorados continuamente ao longo dos anos.

Um osciloscópio é digital porque o sinal de medição é incluído na amostra e armazenado como uma série contínua de valores digitais, até recentemente o disparo era exclusivamente um circuito analógico para processar o sinal de medição original. O amplificador de entrada

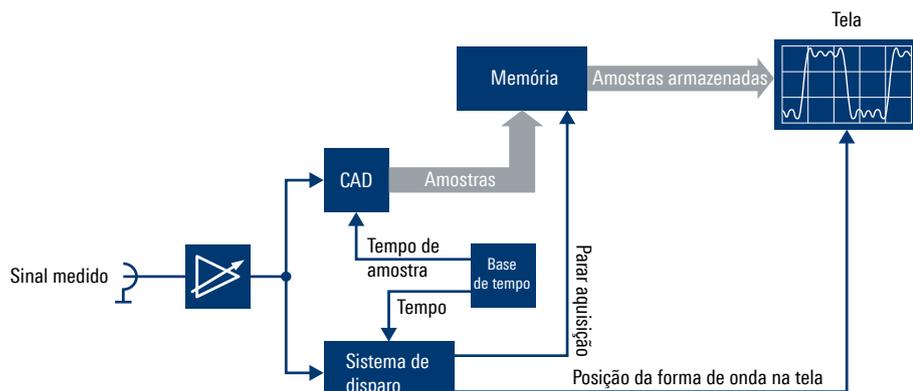


Fig. 4: Disparo analógico

condiciona o sinal sob teste para corresponder sua amplitude com a faixa de operação do conversor analógico-digital (A/D) e com a tela, e o sinal condicionado da saída do amplificador é distribuído em paralelo para o conversor A/D e o sistema de disparo.

Em um caminho, o conversor A/D faz uma amostragem do sinal de medição e os valores de amostra digitalizados são gravados na memória de aquisição. No outro, o sistema de disparo compara o sinal a eventos de disparo válidos, como a ultrapassagem de um limite de disparo com o disparo de borda. Quando uma condição de disparo válida ocorre, as amostras do conversor A/D são finalizadas e a forma de onda adquirida é processada e exibida. O cruzamento do nível do disparo pelo sinal de medição resulta em um evento de disparo válido. Para exibir o sinal na tela com precisão, o tempo do ponto de disparo deve ser preciso. Caso contrário, a forma de onda exibida não cruza o ponto de disparo (o ponto de cruzamento do nível de disparo e da posição do disparo).

Isso pode ser causado por vários fatores. Primeiramente, no sistema de disparo, o sinal é comparado a um limiar de disparo através de um comparador e o tempo da borda na saída do comparador deve ser medido com precisão utilizando um conversor tempo-digital (TDC). Se o TDC for impreciso, a forma de onda exibida será deslocada em relação ao ponto de disparo, fazendo com que o deslocamento mude em cada evento de disparo e resultando em instabilidade de disparo.

Outro fator é que as fontes de erro podem ser encontradas nos dois caminhos do sinal de medição. O sinal é processado em dois caminhos diferentes (o caminho de aquisição do conversor A/D e o caminho de disparo) e ambos contêm distorções lineares e não lineares diferentes. Isso causa incompatibilidades sistemáticas entre o sinal exibido e o ponto de disparo determinado. Na pior das hipóteses, o disparo pode não reagir a eventos de disparo válidos, mesmo que eles estejam visíveis na tela, ou pode reagir a eventos de disparo que não podem ser capturados e exibidos pelo caminho de aquisição.

O fator final é a presença de fontes de ruído nos dois caminhos, já que incluem amplificadores com diferentes níveis de ruído. Isso causa atrasos e variações de amplitude que aparecem como desvios da posição de disparo (jitter) no visor. Quando implementado digitalmente, o disparo não inclui esses erros.

O disparo digital

Em contraste com um disparo analógico, um sistema de disparo digital (fig. 5) opera diretamente nas amostras do conversor A/D e o sinal não é dividido em dois caminhos. O sistema de disparo processa o sinal idêntico ao adquirido e exibido. Como resultado, as deficiências normais dos sistemas de disparo analógico são eliminadas. Para avaliar um ponto de disparo, um disparo digital aplica algoritmos DSP precisos para detectar eventos de disparo válidos e medir com precisão os registros de data. O desafio é implementar o processamento de sinal em tempo real para monitoramento contínuo de sinais medidas. Por exemplo, o acionador digital nos instrumentos da série R&S®RTO emprega uma amostragem de conversor A/D de 8 bits a 10 Gsample/s e processa dados a 80 Gbit/s.

Uma vez que o disparador digital usa os mesmos dados digitalizados que o caminho de aquisição, é possível obter disparos de eventos de sinais dentro da faixa do conversor A/D. Para um evento de disparo selecionado, o sinal é comparado com o limite de disparos definido. Em um exemplo simples (um disparo de borda), um evento é detectado quando o sinal cruza o limiar do disparo na direção solicitada, seja em uma subida ou em uma descida. Em um sistema digital, o sinal é representado por amostras e a taxa de amostragem deve ser pelo menos duas vezes mais rápida do que a frequência máxima do sinal. Só então é possível a reconstrução completa do sinal.

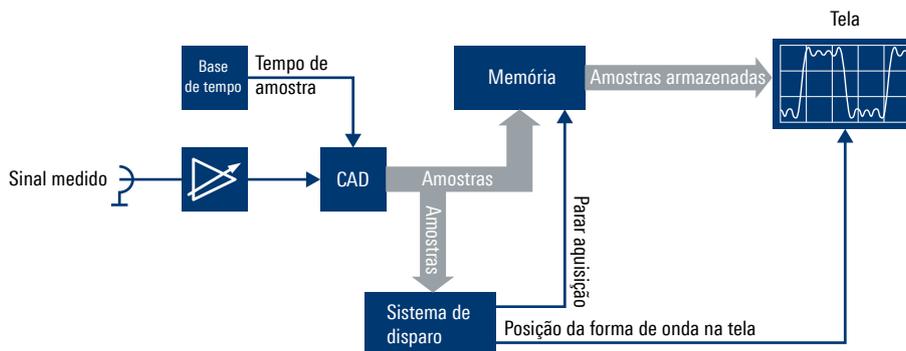


Fig. 5: Disparo digital

Uma decisão de disparo que usa apenas amostras do conversor A/D é insuficiente porque pode perder cruzamentos de limiar de disparo, portanto, a resolução do tempo é aumentada pelo aumento da amostra do sinal usando um interpolador a uma taxa de 20 Gsample/s. Após o interpolador, o comparador confronta os valores da amostra com o limiar de disparo definido e o nível de saída do comparador muda se um evento de disparo for detectado.

A fig. 6 mostra um sinal onde as áreas ocultas são reduzidas através da melhoria da resolução da amostra com o aumento da amostra por um fator de dois. À esquerda, as amostras de forma de onda não incluem a sobremodulação na forma de onda e o limiar de disparo acima das amostras do conversor A/D não pode detectar a sobremodulação. À direita, a taxa de amostragem da forma de onda é duplicada por interpolação e o disparo na sobremodulação é possível. A frequência máxima é de 3,5 GHz para que o sistema de disparo digital possa detectar componentes de frequência com base no conversor A/D em até 10 Gsample/s.

Já que alguns eventos de disparo, tais como falhas e amplitude de pulso são baseados em condições de tempo, um disparo digital pode acionar tais eventos com muita precisão, pois determina os pontos de interseção no limiar em tempo real. O tempo dos eventos de disparo pode ser definido para uma resolução de 1 ps, e a amplitude de pulso mínima detectável é especificada em 100 ps.

Os benefícios específicos de um disparo digital são exibidos na tabela 1.

O processo de disparo

Uma varredura disparada inicia em um ponto selecionado e permite a exibição de sinais periódicos, como ondas senoidais ou quadradas, bem como sinais aperiódicos, como pulsos únicos ou pulsos que não se repetem a uma taxa fixa. O tipo mais comum de disparo é o disparo de borda, que é configurado para ativar quando a tensão ultrapassa algum valor definido. O usuário pode escolher entre uma borda crescente ou decrescente. O disparo por falha permite que o instrumento seja acionado por um pulso que tenha uma amplitude maior ou menor que um determinado período de tempo. Isso normalmente é empregado ao tentar encontrar erros que podem acontecer aleatoriamente ou intermitentemente e, portanto, são muito difíceis de encontrar.

O disparo por amplitude de pulso é muito parecido com o disparo por falha em sua missão de procurar amplitudes de pulso específicas, e permite que pulsos de qualquer amplitude especificada, seja ela negativa ou positiva, sejam especificados juntamente com a posição horizontal do disparo. A vantagem é que o usuário pode ver o que ocorreu antes ou depois do disparo, de forma que, se um erro for encontrado, a visualização do que ocorreu antes de o disparo ser executado pode fornecer informações sobre o que o causou. Se o atraso horizontal estiver definido como 0, o evento de disparo será colocado no meio da tela e os eventos que ocorrerem antes dele serão vistos à esquerda e os que ocorrerem depois, à direita.

Além desses disparos, existem muitos outros tipos que abordam situações específicas e permitem que eventos de interesse sejam detectados. Por exemplo, dependendo do instrumento, o usuário pode disparar pulsos definidos por amplitude, tempo (amplitude de pulso, falha, velocidade de variação de saída, setup-and-hold e tempo limite) e por padrão ou estado lógico. Outras funções de disparo incluem disparo de padrão serial, disparo A + B e acionamento de barramento serial ou paralelo.

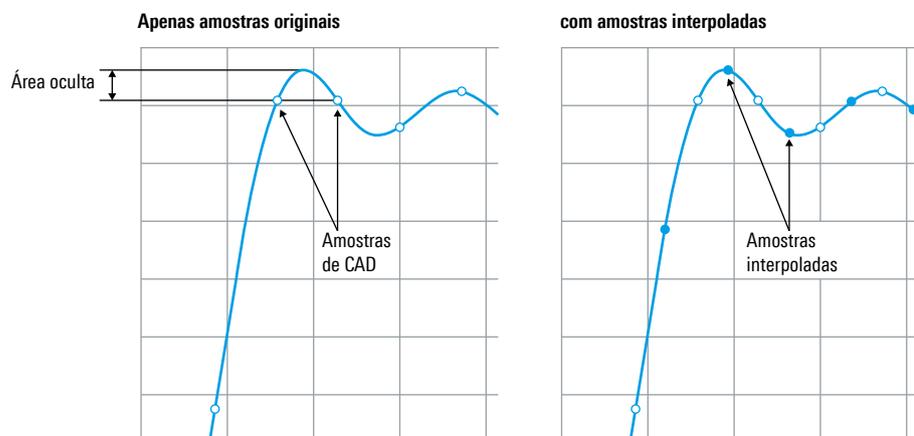


Fig. 6: Redução na área oculta

Os osciloscópios digitais podem disparar em eventos únicos e em eventos de disparos atrasados, controlar quando procurar eventos e redefinir o disparo para iniciar a sequência novamente após uma transição, um tempo ou um estado específico. Como resultado, os eventos até mesmo nos sinais mais complexos podem ser capturados.

Os osciloscópios digitais possuem controle de posição de disparo, que define a posição horizontal do disparo no registro da forma de onda. Ao variar, o usuário pode capturar a aparência do sinal antes do evento de disparo. Isso determinará a duração do sinal visível antes e depois do ponto de disparo. O controle de inclinação do osciloscópio ajusta o ponto do sinal onde o disparo ocorrerá (ou seja, na borda ascendente ou descendente).

Modos de disparo

O modo de disparo determina se e quando o osciloscópio exibe uma forma de onda. Todos os osciloscópios têm dois modos de disparo: um modo normal e um modo automático (auto). Quando configurado no modo normal, o osciloscópio apenas fará um disparo quando o sinal atingir um local específico. No modo automático, o instrumento fará varreduras mesmo que nenhum disparo esteja definido.

Acoplamento e intervalo mínimo de disparo

Alguns osciloscópios permitem o acoplamento (CA ou CC) para selecionar o sinal de disparo e em alguns acoplamentos para rejeição de alta frequência, rejeição de baixa frequência e rejeição de ruído. As configurações mais avançadas são projetadas para eliminar o ruído e outros componentes espectrais do sinal de disparo, de forma a evitar disparos falsos. Garantir que o osciloscópio dispare na parte correta do sinal às vezes não é simples. Por isso, a maioria dos instrumentos ajuda a tornar isso mais fácil com o intervalo mínimo de disparo, que é um período de tempo ajustável após um disparo, durante o qual o osciloscópio não pode disparar, e é útil ao disparar em formas de onda complexas para garantir que o osciloscópio dispare apenas no ponto desejado.

O sistema de exibição e a interface de usuário

Como o nome indica, o sistema de exibição controla todos os aspectos da apresentação do sinal ao usuário. As marcações da tela juntas formam uma grade chamada graticula ou retícula. Os osciloscópios digitais e as suas tarefas são complexas. Assim, a interface do usuário deve ser extensa, mas fácil de entender. Por exemplo, a tela sensível ao toque da série R&S®RTO usa elementos de controle codificados por cores, estruturas de menu simples e teclas para funções usadas com frequência. Na série R&S®RTM, basta pressionar um botão para acionar uma função de medição rápida, que mostra valores para um sinal ativo. Estão disponíveis caixas de diálogo semitransparentes, janelas de medição móveis, uma barra de ferramentas configurável e ícones de visualização com formas de onda em tempo real.

Tabela 1: Benefícios do disparo digital	
Baixo jitter em tempo real	Como são usados valores de amostra idênticos tanto para o processamento de aquisição quanto para o de disparo, pode ser alcançado um jitter de disparo muito baixo (abaixo de valor eficaz de 1 ps). Diferentemente dos sistemas de disparo "aprimorados por software", que foram implementados utilizando abordagens de pós-processamento, o disparo digital não requer períodos de tempo cego adicionais depois de cada aquisição de forma de onda. Como resultado, o R&S®RTO pode alcançar uma aquisição máxima e uma taxa de análise de 1 milhão de formas de onda por segundo.
Sensibilidade do disparo ideal	A sensibilidade do disparo analógico é limitada a mais de uma divisão vertical e uma histerese maior pode ser escolhida com o modo de "rejeição de ruído" do instrumento, para disparo estável em sinais ruidosos. No entanto, um disparo digital permite o ajuste individual da histerese do disparador, de 0 a 5 divisões, para otimizar a sensibilidade da respectiva característica do sinal. Como resultado, é possível obter um disparo preciso de até 1 mV/div, sem limitação de largura de banda.
Evento de disparo sem mascaramento	Um disparador analógico requer tempo após uma decisão de disparo para rearmar o circuito de disparo antes que outro possa ocorrer. Durante esse período, o osciloscópio não pode responder a novos eventos de disparo. Por isso, eles são mascarados. Um disparo digital pode avaliar eventos de disparos individuais em intervalos de 400 ps com uma resolução de 250 fs.
Filtros flexíveis de sinais de disparo	Um ASIC de aquisição e disparo nos instrumentos R&S®RTO permite uma programação flexível da frequência de corte de um filtro passa-baixo digital no caminho em tempo real, e é utilizável para o sinal de disparo, para o sinal de medição ou para ambos. O filtro passa-baixo no sinal de disparo suprime apenas o ruído da alta-frequência enquanto captura e exibe o sinal de medição não filtrado.
Reconhecimento de disparo da remoção de distorção de canal	A relação de tempo entre os canais de entrada do osciloscópio é importante para condições de medição e disparo entre dois ou mais sinais. Os disparos analógicos fornecem um recurso de remoção de distorção de sinal para compensar os atrasos nas diferentes entradas, que são processadas no caminho de aquisição após o conversor A/D. Como resultado, ele não pode ser visto e os sinais inconsistentes são, então, exibidos e avaliados pelo sistema de disparo. Um disparo digital usa dados digitalizados e processados idênticos, de modo que as formas de onda vistas na tela e os sinais processados pela unidade de disparo sejam consistentes mesmo quando a remoção de distorção do canal for aplicada.

PONTAS DE PROVA

O objetivo de uma ponta de prova é levar o sinal do circuito para o osciloscópio com o máximo de transparência possível. Ela é mais do que simplesmente um acessório do osciloscópio, já que é o ponto de contato entre o instrumento e o dispositivo ou circuito que está sendo medido. Suas características elétricas, a maneira como está conectada e sua interação tanto com o osciloscópio quanto com o circuito têm um impacto significativo na medição.

Uma ponta de prova ideal é fácil de conectar, tem contatos confiáveis e seguros, não degrada ou distorce o sinal transmitido, tem comportamento de fase linear sem nenhuma atenuação, tem largura de banda infinita, alta imunidade a ruídos e não carrega a fonte de sinal. No entanto, na prática, todos esses atributos são impossíveis e, na verdade, são mais do que a maioria das situações de medição exige. Na prática, o sinal a ser medido geralmente não é fácil de alcançar: sua impedância pode variar amplamente, a configuração geral é sensível ao ruído e dependente da frequência, a largura de banda é limitada e as diferenças na propagação de sinais criam pequenos desvios de tempo (distorções) entre vários canais de medição.

Felizmente, os fabricantes de osciloscópios não medem esforços para minimizar os problemas de pontas de prova e torná-las mais fáceis de conectar ao circuito e mais confiáveis depois de instaladas. Operar um osciloscópio com uma mão enquanto se segura uma ponta de prova na outra, por exemplo, sempre foi um desafio. As pontas de prova ativas para osciloscópios R&S®RTO têm um botão de ponta de prova que permite aos usuários alternar entre as funções do osciloscópio e podem ser atribuídas a várias funções. O instrumento também tem um voltímetro integrado chamado R&S®ProbeMeter, que permite a realização de medições de CC precisas, que são mais exatas do que um canal de osciloscópio tradicional.

Os dois tipos básicos são as pontas de prova de tensão e as pontas de prova de CA ou de CA/CC. No entanto, existem muitos outros tipos (fig. 7) dedicados a medições específicas, incluindo pontas de prova lógicas projetadas para a resolução de problemas de estados lógicos de um

circuito digital. As pontas de prova ambientais são projetadas para operar em amplas faixas de temperatura. As pontas de prova de temperatura medem a temperatura dos componentes e dos locais no circuito onde altas temperaturas podem ser encontradas. Também existem pontas de prova projetadas para serem usadas em nível de wafer; em estações de uso de pontas de prova; pontas de provas ópticas que convertem sinais ópticos em elétricos e possibilitam a visualização de sinais ópticos no osciloscópio; além de pontas de prova específicas para medição de tensões muito altas.

Pontas de prova passivas

O tipo mais simples e mais barato de pontas de prova, as pontas de prova passivas, fornecem a maior parte dos recursos de medição necessários. Elas são compostas de fios, conectores, resistores e capacitores quando a atenuação é necessária. Elas não têm componentes ativos, podem operar sem energia a partir do instrumento e são naturalmente resistentes.

Uma ponta de prova de 1x (uma vez) possui a mesma faixa dinâmica que o osciloscópio e uma ponta de prova atenuante estende (multiplica) o alcance do instrumento, atenuando o nível do sinal em 10x, 100x ou mais. O tipo de ponta de prova mais versátil é o tipo 10x, porque causa menos carregamento e tem uma faixa de tensão mais alta. Essa é a ponta de prova (padrão) típica fornecida com muitos instrumentos.

Uma ponta de prova de alta impedância, passiva e de 1x, conectada à entrada 1 M Ω do osciloscópio possui alta sensibilidade (pequena atenuação). Uma ponta de prova passiva de alta impedância de 10:1, que também se



Fig. 7: vários tipos de pontas de prova e respectivos acessórios

conecta à entrada 1 M Ω do osciloscópio, fornece ampla faixa dinâmica, impedância de entrada aumentada e baixa capacitância em comparação com a ponta de prova de 1x. Uma ponta de prova passiva de baixa impedância de 10:1, que se conecta à entrada de 50 Ω do osciloscópio tem pouca variação de impedância ao longo da frequência, mas carrega significativamente a fonte devido à sua impedância nominal de 500 Ω .

Uma ponta de prova de 1x é cobiçável quando a amplitude do sinal é baixa, mas quando o sinal é uma mistura de componentes de amplitude baixa e moderada, uma ponta de prova de 1x/10x comutável é conveniente. A largura de banda das pontas de prova passivas geralmente varia de menos de 100 MHz a 500 MHz. Nos ambientes de 50 Ω encontrados com sinais de alta velocidade (alta frequência), é necessária uma ponta de prova de 50 Ω , sua largura de banda pode ser de vários gigahertz e o tempo de subida, de 100 ps ou até mais rápido.

As pontas de prova passivas incluem um controle de ajuste de baixa frequência que é usado quando ela é conectada ao osciloscópio. A compensação de baixa frequência corresponde a capacitância da ponta de prova à capacitância de entrada do osciloscópio. O controle de ajuste de alta frequência é usado apenas para frequências operacionais acima de 50 MHz. As pontas de prova passivas específicas do fornecedor para frequências mais altas são ajustadas na fábrica, portanto, somente o ajuste de baixa frequência deve ser realizado. As pontas de prova ativas não requerem esses tipos de ajustes porque suas características e compensações são determinadas na fábrica.

Pontas de prova ativas

As vantagens das pontas de prova ativas (fig. 8) incluem baixa carga na fonte de sinal, desvio de CC ajustável da extremidade da ponta de prova, que permite alta resolução em pequenos sinais de CA sobrepostos nos níveis de CC e reconhecimento automático pelo instrumento, eliminando a necessidade de ajuste manual. As pontas de prova ativas estão disponíveis tanto nas versões de extremidade



Fig. 8: pontas de provas ativas

única quanto nas versões diferenciais. As pontas de prova ativas usam componentes ativos, como transistores de efeito de campo, que fornecem capacitância de entrada muito baixa, o que traz benefícios como a alta impedância de entrada, que é mantida em um amplo intervalo de frequências. Elas também possibilitam a medição de circuitos nos quais a impedância não é conhecida e permitem o uso de cabos à terra mais longos. Como as pontas de prova ativas têm um carregamento extremamente baixo, elas são essenciais quando conectadas a circuitos de alta impedância que as pontas de prova passivas carregariam de forma inaceitável.

No entanto, o amplificador de buffer integrado nas pontas de prova ativas funciona em uma faixa de tensão limitada e a impedância da ponta de prova ativa depende da frequência do sinal. Apesar de poderem ser fabricadas para operar com milhares de volts, as pontas de prova ativas são, no entanto, não são tão mecanicamente resistentes quanto as pontas de prova passivas.

Pontas de prova diferenciais

Embora uma ponta de prova separada para cada sinal possa ser usada para sondar e medir um sinal diferencial, o melhor método é a utilização de uma ponta de prova diferencial. Uma ponta de prova diferencial usa um amplificador diferencial embutido para subtrair os dois sinais, consumindo, por isso, apenas um canal do osciloscópio. Além disso, fornece um desempenho de CMRR (taxa de rejeição de modo comum) substancialmente mais alto em uma faixa de frequência mais ampla do que as medições de extremidade única. As pontas de prova diferenciais podem ser usadas tanto para aplicações de extremidade única quanto para aplicações diferenciais.

Pontas de prova de corrente

As pontas de prova de corrente funcionam detectando a força de um campo de fluxo eletromagnético quando a corrente flui através de um condutor. Este campo é, então, convertido em uma tensão correspondente para medição e análise por parte de um osciloscópio. Quando usado em combinação com as capacidades matemáticas e de medição de um osciloscópio, as pontas de prova de corrente permitem que o usuário faça uma série de medições de potência.

Pontas de prova de alta tensão

A tensão máxima para pontas de prova passivas de uso geral normalmente fica em torno de 400V. Quando são encontradas tensões muito altas em um circuito de até 20 kV, existem pontas de prova exclusivas para fazer com que seja possível medi-las com segurança. Obviamente, ao fazer medições em tensões tão altas, a segurança é a principal preocupação. Esse tipo de ponta de prova geralmente se adapta tendo um comprimento de cabo muito maior.

OS BENEFÍCIOS DE UM CONVERSOR A/D NÃO INTERCALADO

Após as pontas de prova, o conversor A/D é o primeiro componente principal do osciloscópio pelo qual o sinal de medição passa. A maneira como ele atua nesse sinal determina quão bem os elementos de processamento posteriores funcionam. Os conversores A/D para osciloscópios geralmente são construídos a partir de vários conversores, que são intercalados em paralelo e juntos formam o dispositivo geral. No entanto, alternativamente: o uso de um único conversor A/D tem benefícios significativos e foi escolhido pela Rohde&Schwarz para os equipamentos da série R&S®RTO.

Mesmo quando apenas alguns núcleos de conversores são intercalados, é essencial que suas características de resposta a ruído, fase e frequência variem o mínimo possível. Além disso, o tempo de intercalação é crítico quando os intervalos de medição são dezenas de picossegundos e o relógio de amostragem distribuído para cada conversor também deve ter características de fase extraordinariamente precisas em todo o intervalo de frequências do dispositivo, o que não é um desafio trivial. O tempo de cada conversor A/D varia em algum grau em relação aos outros. Por isso, se cinco conversores forem intercalados, haverá cinco clocks de amostragem ligeiramente diferentes, cujos resultados aparecerão no domínio da frequência como componentes na frequência fundamental.

Esses componentes de frequência normalmente estão 40 dB ou 50 dB abaixo da escala completa (mas ainda assim claramente visíveis) e aparecem periodicamente para que não façam parte de um cálculo de média, como ocorre com o ruído. Eles são causados tanto pelo tempo, quanto por amplitudes incompatíveis ou ainda por ambos. Como existem nos domínios da frequência e do tempo, eles podem aparecer como ruídos devido aos muitos harmônicos em diferentes frequências que, juntos, parecem um sinal aleatório ao longo do tempo.

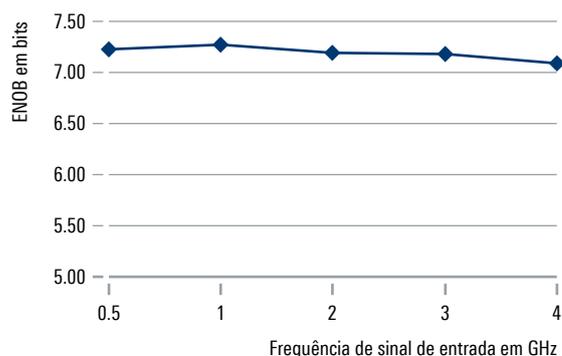
É por isso que alguns fabricantes de osciloscópios usam vários conversores, pois juntos eles produzem resultados que parecem ruídos, e que podem ser identificados e atenuados até certo ponto. No entanto, a entrada do sinal de dados de faixa larga em um osciloscópio se mistura com o conteúdo espúrio desses conversores, o que produz conteúdo espúrio adicional. Em resumo, o nível geral de ruído do osciloscópio (ruído mais distorção) limita o número de bits efetivos que podem ser derivados de um conversor A/D. Como a intercalação de muitos conversores é um dos principais contribuintes para o nível de ruído; a maneira mais óbvia de lidar com isso é usar um conversor A/D em vez de muitos conversores.

A Rohde&Schwarz escolheu essa abordagem na série R&S®RTO. O dispositivo é um conversor de flash único com 8 bits de resolução que obtém amostras em 10 Gsample/s e atinge um ENOB de 7 (em um total de 8). O resultado é uma redução no piso de ruído do sistema em cerca de 6 dB, o que melhora a relação sinal-ruído e a faixa dinâmica de modo que as tensões muito pequenas possam ser facilmente discernidas.

Além disso, as medições no domínio da frequência, tais como potência do canal, distorção harmônica total e potência do canal adjacente, podem ser determinadas com mais precisão porque o espectro não é obstruído pelo ruído gerado pelo osciloscópio. Esse desempenho é explorado por um ASIC personalizado que aumenta drasticamente a velocidade na qual o instrumento pode passar de amostras inteiras brutas de conversor A/D para uma forma de onda medida. Com 40 milhões de formas de onda de amostra, um osciloscópio típico pode precisar de vários minutos para a aquisição ser concluída enquanto o R&S®RTO executa essa operação em frações de segundo.

Número efetivo de bits (ENOB)

O ENOB consistentemente alto dos conversores A/D nos osciloscópios R&S®RTO garante uma representação precisa dos detalhes do sinal e uma faixa dinâmica muito alta.



Considerações sobre a ponta de prova

Carregamento de circuito

A característica mais importante que a ponta de prova agrega ao circuito é o carregamento, seja resistivo, capacitivo ou indutivo. O carregamento resistivo atenua a amplitude, mudando o deslocamento de CC e alterando o viés do circuito. O carregamento resistivo é importante se a resistência de entrada da ponta de prova for igual à do sinal que está sendo examinado, pois parte da corrente que flui no circuito entra na ponta de prova. Isso reduz a tensão onde o circuito encontra a ponta de prova e pode fazer que um circuito com defeito funcione corretamente. No entanto, é mais frequente que cause mau funcionamento. Para reduzir o efeito do carregamento resistivo, use uma ponta de prova com uma resistência maior do que 10 vezes a do circuito sob teste.

O carregamento capacitivo diminui a velocidade do tempo de subida, reduz a largura de banda e aumenta o atraso de propagação. É causado pela capacitância na extremidade da ponta de prova. Ele apresenta erros de medição que dependem da frequência e é o principal problema ao fazer medições de atraso e de tempo de subida. O carregamento capacitivo é causado pela capacitância da ponta de prova que atua como um filtro passa-baixo em altas frequências, que desvia as informações de alta frequência para o aterramento e reduz a impedância de entrada da ponta de prova em altas frequências. As pontas de prova com extremidades de baixa capacitância são altamente desejáveis.

O carregamento indutivo distorce o sinal e é produzido pela indutância do ciclo entre a extremidade da ponta de prova e seu cabo à terra. A sobretensão no sinal causada pelo carregamento indutivo no cabo à terra, em conjunto com a capacitância da extremidade da ponta de prova, pode ser atenuada pelo aterramento eficaz, o que aumenta a frequência da sobretensão para além daquela da largura de banda do instrumento. O comprimento do cabo à terra deve ser sempre o mais curto possível para reduzir o tamanho do ciclo e minimizar a indutância. Uma indutância mais baixa minimizará a sobretensão na parte superior da forma de onda.

Aterramento

O aterramento adequado é essencial ao fazer medições com o osciloscópio para precisão e segurança do operador, especialmente ao trabalhar com altas tensões. O instrumento deve ser aterrado por meio de um cabo de fonte de alimentação e nunca deve ser operado com o aterramento protetor desconectado. Caso contrário pode ocasionar zumbidos de baixa frequência, se o aterramento do sinal do dispositivo sob teste estiver conectado à terra pela rede elétrica em um local diferente, causando um circuito de aterramento. A prática comum é isolar o aterramento do sinal da ligação à terra e criar uma conexão com o aterramento do sinal próximo ao pino do sinal.

Processo de seleção de ponta de prova

Dois fatores são importantes para escolher a ponta de prova (de tensão) correta: a largura de banda necessária para capturar a forma de onda sem distorção e a impedância mínima desejada para minimizar o carregamento do circuito. A largura de banda especificada do osciloscópio é válida apenas para uma impedância de entrada de 50 Ω e uma faixa de entrada de tensão limitada. Deve ser de pelo menos cinco vezes a frequência de pulso mais alta a ser medida, para preservar os harmônicos e, assim, a integridade da forma de onda.

A impedância de CC especificada tem pouco valor para medições de CA. Sobre a frequência, a impedância diminui, de maneira mais drástica, em pontas de provas passivas. Para tentar manter a impedância de entrada pelo menos 10 vezes maior que a impedância da fonte na frequência de sinal mais alta, a escolha entre uma ponta de prova ativa ou passiva é simples. Isso pode restringir a escolha a apenas um ou dois modelos que mais se aproximam do cumprimento dos requisitos para a configuração da medição. As pontas de prova ativas são obrigatórias para obter todos os benefícios da largura de banda de um osciloscópio na região de micro-ondas.

Lembre-se de que a impedância de baixa frequência é mais alta em pontas de prova passivas de 10x, e em geral não apresentam desvios de CC e nem introduzem ruído. As pontas de prova ativas oferecem impedância constante em frequências de centenas de quilohertz e maior impedância de até vários 100 MHz. As pontas de prova de baixa impedância oferecem impedância constante de até 1 GHz e, embora a impedância em uma frequência possa ser cobiçável, uma impedância constante, mas menor, evita a distorção dos sinais com harmônicos.

Em suma, as pontas de prova ativas são recomendadas para sinais com componentes de frequência acima de 100 MHz e a baixa capacitância de entrada resulta em uma frequência de ressonância mais alta. As conexões com pontas de prova ativas devem ser as mais curtas possíveis para garantir uma largura de banda alta e utilizável. Além disso, se o nível do aterramento parecer instável, uma ponta de prova diferencial pode ser necessária.

Com pontas de prova passivas, é importante usar o modelo recomendado para o instrumento em uso, mesmo que a ponta de prova tenha uma especificação de largura de banda mais alta do que parece ser necessário. A baixa capacitância de entrada resulta em uma frequência de ressonância mais alta. O aterramento deve ser curto para minimizar sua indutância. Tenha cuidado ao medir tempos de subida de bordas acentuadas, pois a frequência de ressonância pode ser muito menor do que a largura de banda do sistema. A impedância da ponta de prova deve ter cerca de dez vezes a impedância do ponto de teste do circuito para não carregá-lo de forma muito pesada.

ESPECIFICAÇÕES SOBRE REFERÊNCIAS DE OSCILOSCÓPIOS

Assim como acontece com todos os equipamentos de teste eletrônico, os osciloscópios digitais possuem uma série de especificações importantes. Alguns são simples, mas outros são especificados de várias maneiras, dependendo do fabricante, ou podem ser confusos de alguma outra maneira. Conseqüentemente, as definições abaixo são amplamente genéricas.

Largura de banda

A largura de banda máxima é a especificação mais importante observada por todos os fabricantes de osciloscópios digitais e por um bom motivo: ela determina o intervalo de frequências que o osciloscópio pode medir com precisão. Se a largura de banda do instrumento for inadequada para uma aplicação específica, o instrumento não é um dispositivo de medição preciso e útil, uma vez que não haverá conteúdo suficiente disponível para exibir o sinal. A largura de banda do osciloscópio é definida como a frequência mais baixa na qual o sinal de entrada é atenuado em 3 dB, ou seja, onde um sinal de onda senoidal seria atenuado para 70,7% de sua verdadeira amplitude.

Selecionar a largura de banda adequada para um determinado aplicativo pode ser difícil. Obviamente, a maneira mais simples de satisfazer esse requisito é selecionando um instrumento com a maior largura de banda. No entanto, osciloscópios de largura de banda muito alta podem ser exageradamente caros. Além disso, o nível de ruído aumenta e o alcance dinâmico diminui significativamente com o aumento da largura de banda. Isso pode aumentar tanto a incerteza de medição quanto a largura de banda inadequada. Um osciloscópio com a menor largura de banda possível para as aplicações e sinais que provavelmente serão encontrados é a melhor escolha.

Os osciloscópios são usados principalmente para medir pulsos digitais, e uma onda quadrada é um pulso ideal com largura de banda infinita. O espectro de frequências deste sinal consiste em um sinal na frequência fundamental e em harmônicos ímpares. A amplitude dos harmônicos segue uma função $\sin(x)/x$ em frequência, de modo que o terceiro harmônico está cerca de 13,5 dB abaixo do fundamental e o quinto harmônico fica 27 dB abaixo dele. O harmônico seguinte, o sétimo, é de 54 dB e está abaixo do piso de ruído da maioria dos osciloscópios. Uma regra geral comum para a escolha da largura de banda do osciloscópio é a chamada "regra do quinto harmônico", que é baseada no espectro de ondas quadradas. Essa regra geralmente leva a escolhas de largura de banda excessivas.

O espectro descrito acima se aplica a uma onda quadrada perfeita, mas todos os sinais digitais têm um tempo de subida que tem fim e que modifica o espectro ideal de ondas quadradas, reduzindo a amplitude de harmônicos de ordem superior. Em muitos casos, o nível do quinto harmônico está bem abaixo do piso de ruído do osciloscópio e ter menos largura de banda é adequado. Isso é tipicamente verdadeiro para sinais com larguras de banda de 3 Gbit/s e superiores, como sinais de dados seriais cujo tempo de subida em relação ao intervalo de bits é de cerca de 30%. Nesse caso, uma largura de banda inferior a cinco vezes o fundamental é aceitável para medições precisas.

A largura de banda alcançável também é diretamente afetada pela ponta de prova, que não é um dispositivo ideal e, portanto, tem a sua própria largura de banda que deve ser levada em consideração. A largura de banda da ponta de prova sempre deve ser maior do que a largura de banda do osciloscópio por um fator de cerca de 1,5 vezes. Uma ponta de prova com largura de banda de 1,5 GHz é necessária para o desempenho total do osciloscópio. Uma largura de banda maior da ponta de prova é importante para garantir que os sinais de teste estejam dentro da região de resposta em frequência plana da ponta de prova. Para um osciloscópio "típico" com largura de banda de 1 GHz, essa região normalmente seria um terço da especificação máxima de largura de banda da ponta de prova ou 300 MHz.

Mais especificamente, a maioria dos sinais de teste é mais complexa do que uma simples onda senoidal e inclui vários componentes espectrais, como harmônicos. Para visualizar sinais digitais, por exemplo, o osciloscópio deve fornecer uma largura de banda cerca de cinco vezes maior do que a frequência de clock. Para sinais analógicos, a frequência mais alta do dispositivo ao qual o osciloscópio está conectado determina a largura de banda necessária do osciloscópio.

Número efetivo de bits (ENOB)

O número efetivo de bits (ENOB) é uma especificação que pode ser confusa, pois pode se referir tanto aos bits de resolução alcançáveis pelo conversor A/D quanto ao número total efetivo de bits que ele pode alcançar enquanto parte de um instrumento completo. O primeiro

é invariavelmente maior que o segundo e nenhuma especificação costuma ser vista nas folhas de dados dos osciloscópios. No entanto, é importante conhecer o acrônimo ENOB. O ENOB é determinado por muitos fatores, variando com frequência, ruído de interface, distorção harmônica e distorção intercalada. Os fornecedores de osciloscópios promovem a proximidade do ENOB deles ao valor bruto (como mais de 7 de um total de 8 bits para o R&S®RTO), pois não é algo comum (veja Os benefícios de um conversor A/D não intercalado na página 12).

Canais

A maioria dos osciloscópios digitais já teve 2 ou 4 canais, mas hoje eles podem ter 20, resultado da necessidade de medir sinais analógicos e digitais complexos. Para o comprador do osciloscópio, é essencial que o número de canais a serem encontrados seja estimado corretamente, pois a alternativa é construir hardware de disparo externo. Quando usado em aplicativos de depuração incorporados, o osciloscópio de sinal misto irá intercalar 16 canais de tempo lógico com os 2 ou 4 canais tradicionais.

Taxa de amostragem

A taxa de amostragem do osciloscópio é o número de amostras adquiridas em 1s, e deve ser pelo menos 2,5 vezes maior do que a largura de banda do osciloscópio. Como os osciloscópios digitais mais recentes têm taxas de amostragem extremamente altas e larguras de banda acima de 6 GHz, eles geralmente são projetados para acomodar eventos transientes de alta velocidade e com disparo único. Eles fazem isso por meio da sobreamostragem em taxas maiores do que cinco vezes a largura de banda declarada. Embora os fabricantes de osciloscópios especifiquem a taxa máxima de amostragem de seus instrumentos, isso só é possível quando um ou dois canais estão sendo usados. Se mais canais forem usados simultaneamente, é provável que a taxa de amostragem diminua. Portanto, o principal determinante é quantos canais podem ser usados enquanto ainda se atinge a taxa máxima de amostragem do instrumento. Como em qualquer sistema onde os sinais analógicos são convertidos para sinais digitais, quanto maior for a taxa de amostragem, maior a resolução e, para osciloscópios digitais, melhores serão os resultados exibidos.

Profundidade de memória

Essa especificação é importante porque, à medida que a taxa de amostragem aumenta, a quantidade de memória necessária para armazenar os sinais capturados também aumenta. Quanto maior a memória do instrumento, mais formas de onda ele pode capturar em toda a sua taxa de amostragem. De um modo geral, os períodos de captura de longo prazo requerem profundidade de memória significativa, mas os osciloscópios podem sofrer uma queda significativa na taxa de atualização quando a configuração de profundidade de memória mais profunda é selecionada.

Ao realizar a aquisição do sinal, os osciloscópios convencionais salvam, processam e exibem dados continuamente. Enquanto tudo isso está acontecendo, o instrumento fica essencialmente cego para as características do sinal que está sendo medido. Nas taxas de amostragem mais altas, o tempo cego pode realmente ser superior a 99,5% de todo o tempo de aquisição. Portanto, as medições só são feitas em menos de 0,5% do tempo, o que oculta falhas de sinal. Talvez a necessidade mais crítica de memória suficiente de captura de sinal seja quando um evento ocorre aleatoriamente ou com pouca frequência. Com pouca memória, a probabilidade de o evento não ser capturado aumenta drasticamente. Além da memória de alta velocidade, os osciloscópios, como os instrumentos da série R&S®RTO, empregam um ASIC que executa vários processos em paralelo, o que reduz drasticamente o tempo cego e permite que a velocidade da análise se aproxime de 1 milhão de formas de onda por segundo, 20 vezes mais rápido do que outros instrumentos.

Tipo de disparo

Felizmente para um potencial comprador de osciloscópio, a maioria dos osciloscópios vêm com uma variedade de recursos tradicionais de disparo, além de alguns exclusivos para aplicações comuns. Isso é importante, pois muitos tipos de disparos podem ser executados e algumas aplicações não podem ser abordadas adequadamente sem eles. Praticamente todo osciloscópio digital inclui disparos de borda, de falha e padrão. Os osciloscópios de sinal misto tornam possível disparar através dos canais lógicos e dos canais do osciloscópio. Os engenheiros que trabalham com barramentos de interface serial comuns exigirão protocolos de disparo para SPI, UART/RS-232, CAN/LIN, USB, I²C, FlexRay™ e outros, para que os requisitos de disparo potenciais sejam parte das especificações do osciloscópio.

Tempo de subida

Atualmente, a grande maioria das aplicações exige medição do tempo de subida, especialmente ao medir sinais digitais que exigem medições muito rápidas do tempo de subida, o que torna essa métrica mais importante do que nunca. O tempo de subida do osciloscópio determina a faixa de frequência útil real que ele pode atingir. Um osciloscópio com tempo de subida mais rápido pode representar com mais precisão os detalhes das transições de alta velocidade. Quando aplicada a uma ponta de prova, a resposta a uma função de etapa indica o período mais rápido que a ponta de prova pode transmitir para a entrada do osciloscópio. A regra geral é que as medições precisas de tempo de subida e descida do pulso, a velocidade do tempo de subida de todo o sistema (osciloscópio e ponta de prova), deve ser de três a cinco vezes a da transição mais rápida.

Resposta de frequência

A resposta em frequência é uma das muitas características que determinam o desempenho do osciloscópio digital, mas é importantíssima - embora nunca seja incluída nas folhas de dados do fabricante do osciloscópio. Ela permanece nas sombras principalmente porque uma forma de resposta em frequência Gaussiana sempre foi assumida quando os osciloscópios e o sinal eram analógicos. Um osciloscópio digital pode ter uma curva de resposta plana ao máximo, Chebyshev, Butterworth, Gaussiana ou outras curvas de resposta em frequência; e cada tipo afeta a sobremodulação e a sobretensão, que causam erros de amplitude e de tempo de subida de maneiras diferentes. Portanto, é importante compreender esta especificação misteriosa.

Todos os sinais são a soma das ondas senoidais em diferentes frequências e fases que aparecem no domínio da frequência como linhas espectrais, cada onda ponderada separadamente pela resposta em frequência do osciloscópio. Saber como a resposta em frequência pondera cada componente do sinal seria benéfico, mas o usuário só pode adivinhar, já que apenas 3 dB de largura de banda e tempo de subida são especificados na planilha de dados.

Cada fabricante tem seu próprio ideal para a curva de resposta em frequência. Algumas pessoas acreditam que uma resposta plana ao máximo fornece os melhores resultados, pois esse tipo de resposta não se desvia até a frequência de corte do instrumento, após a qual cai de forma acentuada. O intervalo de frequência do instrumento também pode ser estendido para características de implementação muito incisivas.

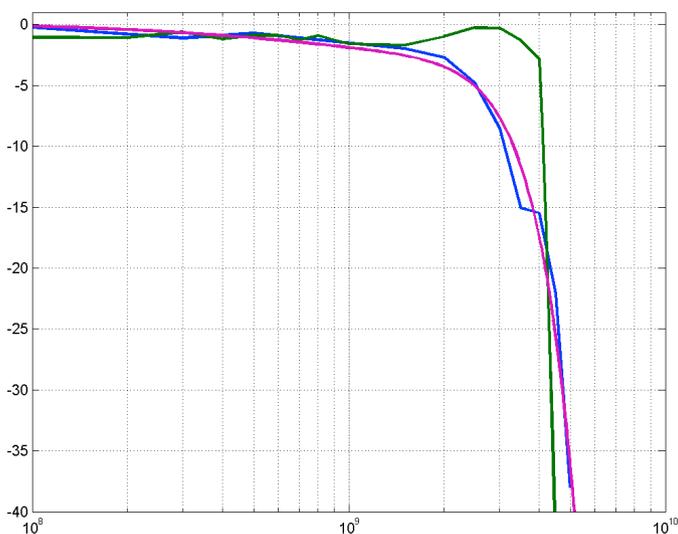


Fig. 9: A curva de resposta em frequência Gaussiana do R&S®RTO1024 (azul) e a do osciloscópio plano ao máximo (verde) sobreposta a uma resposta Gaussiana ideal (violeta) mostra o quão perto a última chega de uma resposta ideal.

A resposta em frequência plana ao máximo requer que sejam feitas compensações significativas. Por exemplo, há uma penalidade na frequência de transição, pois não é possível que a resposta seja perfeitamente plana e que a transição ocorra sem falhas na resposta em frequências mais altas. Butterworth, Chebyshev e outros tipos de respostas também produzem alguma irregularidade na banda de passagem, mesmo com os atuais filtros digitais de última geração.

A Rohde&Schwarz acredita que a resposta Gaussiana tradicional represente a melhor compensação entre especificações conflitantes e fornece a melhor precisão geral e o mínimo de sobretensão e sobremodulação. Ela tem a capacidade exclusiva de ser realizada nos domínios de frequência e de tempo e não produz sobretensão em nenhum deles. A resposta em frequência do osciloscópio R&S®RTO de 2 GHz, juntamente com uma resposta plana ao máximo de um osciloscópio de 4 GHz (fig. 9), mostra que a resposta do R&S®RTO é quase uma forma Gaussiana exemplar de livro didático. A fig. 10 compara a etapa de resposta de ambos os osciloscópios; a sobremodulação do R&S®RTO é de 1%, enquanto o osciloscópio plano ao máximo tem 8% da sobremodulação. A adoção da resposta Gaussiana requer uma compensação de uma largura de banda mais estreita de 3 dB porque a resposta diminui gradualmente. No entanto, ela alcança a maior precisão (especialmente nas bordas do sinal), elimina a sobretensão e tem uma sobremodulação de menos de 1%, muito abaixo da média do setor, que é de 5 a 10% ou mais. A redução na sobremodulação (a excursão máxima de amplitude expressa como uma porcentagem da amplitude final) é extremamente importante, pois as características do dispositivo em teste seriam obscurecidas, impossibilitando medições precisas de amplitude.

Ganho (vertical) e precisão de base de tempo (horizontal)

A precisão de ganho do osciloscópio é o determinante da precisão com a qual seu sistema vertical pode variar a amplitude do sinal de entrada, e a precisão horizontal define a capacidade de seu sistema horizontal de visualizar o tempo do sinal.

Resolução vertical de conversor A/D

A resolução vertical é uma métrica da precisão com a qual o conversor A/D converte a tensão analógica em bits digitais. Por exemplo, um conversor A/D de 8 bits converte um sinal em 256 níveis de tensão discretos, que são distribuídos pela configuração de volts por divisão selecionada. Com 1 mV/div, o bit menos significativo é de 39 μ V. Isso é diferente do número efetivo de bits, pois não leva em consideração as características que não são ideais no conversor A/D e na interface do osciloscópio.

Sensibilidade vertical

A capacidade do amplificador vertical de amplificar a força do sinal é chamada de sensibilidade vertical e normalmente é de cerca de 1 mV por divisão da tela vertical. Nenhum osciloscópio possui uma sensibilidade tão grande quanto a de 1 mV por divisão e muitos contam com software para compensar, o que reduz o número efetivo de bits do osciloscópio. Às vezes, a limitação da largura de banda também é usada para resolver essa deficiência, especialmente em configurações de tensão mais baixa por divisão.

Tela e interface de usuário

Embora as especificações individuais definam o desempenho de um osciloscópio, a tela e a interface do usuário definem a facilidade de utilização do osciloscópio e quão bem seus resultados são processados. Os fabricantes de osciloscópios são muito consistentes em relação à tela, normalmente um LCD TFT de alta resolução e, às vezes, com retroiluminação LED. No entanto, a interface varia muito de fabricante para fabricante e é constantemente refinada a cada nova geração de osciloscópios. A facilidade de realizar medições, bem como a velocidade e a precisão de sua interpretação, são subjetivas, o que torna sensato avaliar cada instrumento candidato o mais detalhadamente possível.

Recursos de comunicação

Atualmente, os osciloscópios digitais possuem uma ampla variedade de interfaces de comunicação, desde o GPIB tradicional e o RS-232 até Ethernet e USB. Enquanto anteriormente a unidade de CD-RW era usada para transportar dados, hoje em dia uma simples unidade flash USB pode facilitar o trabalho, e a conectividade com a Internet cuida de mais transferências remotas. Também são permitidas atualizações e opções de firmware, e outras funcionalidades para download. A Ethernet também permite que o controle do instrumento e a transferência de dados, sejam realizados em qualquer lugar onde haja uma conexão com a Internet, e permite que o osciloscópio também se torne parte de um sistema ATE maior.

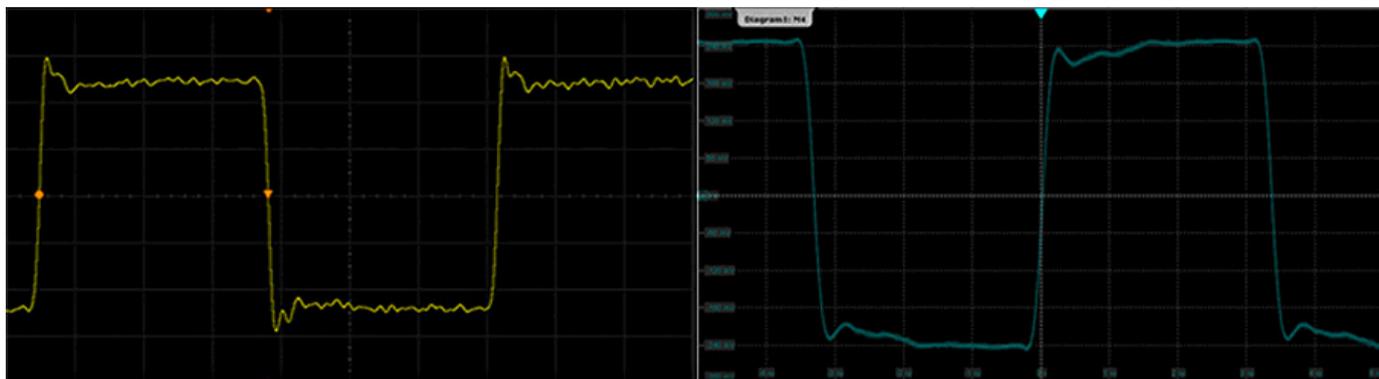


Fig. 10: As respostas de etapa dos dois osciloscópios mostram que o R&S®RTO1024 tem uma sobremodulação de cerca de 1% ao mesmo tempo em que a contrapartida é plana ao máximo e mostra uma sobremodulação de 8%.

MEDIÇÕES TÍPICAS DOS OSCILOSCÓPIOS

Quer seja analógico, quer seja digital, o osciloscópio é um instrumento versátil de teste. Apesar de sua função básica medir e exibir tensões, ele pode fazer muito mais. Além das medidas abaixo, muitas outras estão disponíveis para aplicações específicas com notas de aplicação e outros documentos que as descrevem, amplamente disponíveis na Internet. Elas abrangem desde a automação das medições descritas aqui, bem como a detecção e a análise de sinais em sistemas comerciais e de defesa, e uma ampla variedade de outras.

Medições de tensão

A medição básica de tensão é, na verdade, o passo fundamental após o qual muitos outros cálculos podem ser realizados. Por exemplo, a medição da tensão pico a pico (V_{pp}) é usada para calcular a diferença de tensão entre os pontos alto e baixo da forma de onda e as medições também podem usar a tensão de valor eficaz para determinar os níveis de potência.

Medições de deslocamento de fase

Um osciloscópio fornece uma maneira conveniente de medir o deslocamento de fase com uma função chamada modo XY. Ele leva um sinal de entrada no sistema vertical e outro no sistema horizontal. Um padrão Lissajous resultante mostra fases e frequências relativas de tensões alternadas. A forma permite que as diferenças de fase e as relações de frequência entre os dois sinais sejam determinadas.

Medições de tempo

Um osciloscópio pode ser usado para medir o tempo na escala horizontal, o que é útil para avaliar as características do pulso. Ou seja, a frequência é recíproca do período. Assim, uma vez que o período é conhecido, a frequência é igual a 1 dividido pelo período. A clareza da exibição de informações pode ser melhorada tornando maior a porção desejada do sinal.

Amplitude de pulso e medições de tempo de subida

A avaliação da amplitude e do tempo de subida dos pulsos é importante em muitas aplicações, pois suas características críticas podem ser corrompidas, o que, em um circuito digital, causará degradação ou falha completa. A amplitude de pulso é definida como o tempo necessário para que a forma de onda suba de 50% de sua tensão pico a pico até sua tensão máxima e depois retorne. A medição da amplitude do pulso negativo determina o tempo necessário para que a forma de onda diminua de 50% do seu valor de pico a pico para um ponto mínimo. O outro parâmetro relacionado aos sinais pulsados é o tempo de subida, definido como o tempo necessário para que o pulso passe de 10% para 90% de sua tensão total. Este padrão do setor assegura que as variações nos cantos de transição do pulso sejam eliminadas.

Decodificação de barramentos seriais

A decodificação de protocolos seriais como I²C, SPI, UART/RS-232, CAN, LIN e FlexRay™, é mais um conjunto comum de medições realizadas frequentemente com um osciloscópio. Esses recursos de medição geralmente fazem parte de uma ou mais opções de software do osciloscópio, que podem ser adicionadas conforme necessário.

Análise de frequência, estatísticas e funções matemáticas

Além das funções estatísticas, tais como histograma e média, e dos valores médios, o usuário pode aplicar funções matemáticas aos sinais medidos. Isso simplifica a análise da forma de onda, permitindo que o usuário exiba os resultados de maneira significativa. Ao combinar e transformar formas de onda de origem e outros dados em formas de ondas matemáticas, os usuários podem obter a visualização de dados que um aplicativo requer.

A maioria dos osciloscópios tem funções matemáticas para adicionar, subtrair, multiplicar ou dividir sinais nos diferentes canais. Outras funções matemáticas básicas incluem a transformada de Fourier, que permite que a composição da frequência do sinal seja visualizada na tela, e a determinação do valor absoluto para mostrar o valor da tensão da forma de onda.

Operações matemáticas, testes de máscara, histogramas, exibição de espectro e medições automáticas consomem recursos de computação em software, aumentam o tempo cego e fazem com que o instrumento responda lentamente. A Rohde&Schwarz emprega o seu conhecimento especializado em hardware na análise de espectro, apresentando essas funções em hardware e, combinando-as com interfaces de baixo ruído e com o alto número de bits efetivos do conversor A/D, para fornecer uma poderosa análise de espectro baseada na FFT.

A função FFT é rápida e uma alta velocidade de aquisição transmite um espectro em tempo real. Mudanças rápidas de sinal, interferência e sinais fracos sobrepostos são claramente visíveis.

Nos instrumentos da série R&S®RTO, as funções de teste de máscara também foram implementadas no hardware para preservar as altas velocidades de aquisição, ao mesmo tempo em que registram um número grande o suficiente de formas de onda necessárias para produzir dados estatisticamente relevantes. Como as formas de onda armazenadas estão disponíveis para análise, as falhas de sinal podem ser detectadas e suas causas identificadas rapidamente com um alto nível de confiança.

RESUMO

Um osciloscópio é um instrumento muito versátil usado em uma ampla variedade de ambientes de engenharia. De um modo geral, quanto mais efetivamente implementados os sistemas horizontais e verticais forem, maior a fidelidade do sinal. Além disso, a flexibilidade do disparo permite que o usuário configure o osciloscópio com uma forma de capturar sinais que aparecem aleatoriamente e com pouca frequência. Uma boa ponta de prova ou um conjunto de pontas de prova é essencial para testar o sinal no sistema de medição.

Conforme afirmado anteriormente, existem muitos aplicativos para os osciloscópios digitais, e os respectivos fabricantes sempre fornecem notas de aplicação e outros documentos valiosos para descrevê-los. Além disso, há muito mais informações que, em alguns casos, podem ser úteis para cada tópico descrito neste documento. Como resultado, uma vez que o osciloscópio é comprado, uma das etapas seguintes deve ser a obtenção do máximo de informações possível sobre os aplicativos específicos que o usuário provavelmente encontrará.

GLOSSÁRIO

A

Amostragem: o processo de aquisição de amostras discretas de um sinal de entrada que, posteriormente é convertido para o formato digital e em seguida, armazenado e processado pelo osciloscópio.

Amostragem

em tempo real: o modo de amostragem de um osciloscópio, que permite que um número grande de amostras seja capturado a partir da ação de um disparo único.

B

Base de tempo: conjunto de circuitos do instrumento que controlam o tempo de varredura.

C

Carregamento

de circuito a consequência da ponta de prova interagindo com o dispositivo ou circuito sob teste, cujo grau determina a transparência da ponta de prova tanto para o instrumento quanto para o circuito.

Conversor A/D: o dispositivo e o osciloscópio que convertem sinais de entrada analógicos em bits digitais, cuja eficácia determina qual desempenho o osciloscópio pode alcançar.

D

Detecção de

pico: um osciloscópio digital de modo de aquisição que torna possível exibir sinais que são críticos e difíceis de detectar.

Disparo: o subsistema do osciloscópio que determina quando exibir a primeira ocorrência do sinal.

Disparo único: um evento transiente adquirido pelo osciloscópio, que ocorre apenas uma vez no fluxo de sinal.

Divisão: As linhas verticais e horizontais na tela do osciloscópio.

E

Envelope:

os pontos mais altos e mais baixos de um sinal após ter sido capturado em um grande número de repetições de formas de onda.

F

Falha:

um evento de erro normalmente transiente e curto, que se autocorrigue, tornando o processo de eliminação de sua fonte extremamente difícil.

G

Gratícula:

linhas verticais e horizontais na tela do osciloscópio.

I

Inclinação:

o índice da distância vertical para a horizontal na tela é positivo quando aumenta da esquerda para a direita da tela e negativo quando diminui.

Intervalo mínimo

de disparo: o intervalo mínimo definido pelo usuário entre disparos utilizado quando é cobizável disparar no início de um sinal em vez de fazê-lo em uma parte aleatória da forma de onda.

L

Largura de

banda: o intervalo de frequências do osciloscópio limitado pelo ponto no qual a resposta é reduzida em 3 dB (portanto, largura de banda de 3 dB).

M

Média: uma técnica realizada pelo processamento de sinal digital em um osciloscópio que pode reduzir o ruído no sinal e na tela.

Modo de

aquisição: a forma como os pontos de formas de onda são criados a partir de pontos de amostras. Os modos padrão incluem amostra, detecção de pico, alta resolução, média e envelope.

N

Nível de

disparo: o nível de tensão que o sinal de entrada deve atingir antes de o disparo ser iniciado.

Número efetivo

de bits (ENOB): o número real de bits em um conversor A/D ou em um osciloscópio digital e um determinante da resolução após a conversão de um sinal analógico para o domínio digital. No conversor A/D normalmente é menor do que o número de bits declarado do dispositivo.

O

Osciloscópio de amostragem

digital: um osciloscópio que pode analisar sinais cujas frequências são mais altas do que a taxa de amostragem do instrumento.

Osciloscópio

de sinal misto: um osciloscópio digital que tem dois ou quatro canais analógicos, 16 canais digitais e funções normalmente associadas a um analisador lógico.

Osciloscópio

digital: um osciloscópio que converte um sinal de entrada analógico em uma representação digital usando um conversor A/D.

P

Ponto de

amostra: os dados adquiridos por um conversor A/D e usados para calcular pontos de forma de onda.

Ponta de prova: o dispositivo de entrada para o osciloscópio, que conecta o dispositivo ao circuito sob teste.

Precisão de

ganho: a capacidade do sistema vertical do osciloscópio de atenuar ou ampliar o sinal.

Pré-disparo:

um recurso do osciloscópio digital para adquirir as características do sinal antes e depois de um disparo ser realizado.

R

Resolução

vertical: a precisão com a qual um conversor A/D e um osciloscópio podem converter um sinal de entrada analógico para o domínio digital.

Resposta de

frequência: um gráfico que mostra com que precisão o osciloscópio representa a amplitude do sinal de entrada em um intervalo de frequências específico. A resposta ideal é plana como uma régua, mas continua sendo uma realização ideal e não uma realização prática.

S

Sensibilidade

vertical: a quantidade na qual o amplificador vertical pode amplificar um sinal.

Sinal analógico: um sinal elétrico contínuo que varia em amplitude ou frequência em resposta a mudanças de tensão.

Sinal digital: um sinal cujas informações são uma sequência de bits em contraste com um sinal analógico que é uma faixa contínua de tensões.

T

Taxa de

amostragem: a frequência na qual o osciloscópio digital adquire amostras do sinal, medidas em amostras por segundo.

Tempo de

subida: o tempo necessário, entre 10% e 90%, para que a borda principal de um pulso aumente de seu valor mais baixo para o seu valor mais alto.

Transiente:

também conhecido como evento de disparo único, um transiente é um sinal que ocorre apenas uma vez durante a captura do sinal.

V

Varredura

horizontal: o processo realizado pelo sistema horizontal dos instrumentos, que cria a forma de onda que pode ser exibida.

W

Ponto de forma

de onda: a tensão do sinal em um momento do tempo calculado por pontos de amostra.

Serviço que acrescenta valor

- ▶ Mundial
- ▶ Local e personalizado
- ▶ Customizado e flexível
- ▶ Qualidade impecável
- ▶ Confiança a longo prazo

Rohde & Schwarz

O grupo de tecnologia Rohde&Schwarz está entre os pioneiros quando o assunto é abrir caminho para um mundo mais seguro e conectado com suas soluções avançadas de teste e medição, sistemas de tecnologia, redes e cibersegurança. Fundado há mais de 85 anos, o grupo é um parceiro confiável de clientes do ramo empresarial e do poder público, em todo o mundo. Fundada há mais de 80 anos, esta empresa familiar sediada em Munique, Alemanha, tem uma ampla rede de vendas e serviços e está presente em mais de 70 países.

www.rohde-schwarz.com

Design de produto sustentável

- ▶ Compatibilidade ambiental e baixo impacto ao meio ambiente
- ▶ Baixo consumo de energia e baixas emissões
- ▶ Longevidade e custo total de propriedade otimizado

Certified Quality Management

ISO 9001

Certified Environmental Management

ISO 14001

Rohde & Schwarz training

www.training.rohde-schwarz.com

Rohde & Schwarz customer support

www.rohde-schwarz.com/support

