



FUNDAMENTOS DE OSCILOSCOPIOS

Manual básico

ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real



CONTENTS

Introducción	3	Especificaciones clave de los osciloscopios	14
Dónde empezó todo.....	3	Ancho de banda	14
El despertar de la era digital.....	3	Número efectivo de bits (ENOB).....	15
Tipos de osciloscopios digitales	4	Canales.....	15
Osciloscopios digitales de muestreo	4	Velocidad de muestreo.....	15
Osciloscopios de muestreo en tiempo real.....	4	Profundidad de memoria.....	15
Osciloscopios de señal mixta.....	4	Tipos de disparo	15
Elementos básicos de los osciloscopios digitales.....	5	Tiempo de subida	16
El sistema vertical	5	Respuesta en frecuencia.....	16
El sistema horizontal	6	Precisión de ganancia (vertical) y base de tiempo (horizontal).....	17
El sistema de disparo	6	Resolución vertical del convertidor A/D	17
El sistema de visualización y la interfaz de usuario.....	9	Sensibilidad vertical.....	17
		Pantalla e interfaz de usuario.....	17
		Funciones de comunicación	17
Sondas	10	Mediciones típicas con osciloscopio	18
Sondas pasivas	10	Mediciones de voltaje	18
Sondas activas	11	Mediciones de desplazamiento de fase	18
Sondas diferenciales	11	Mediciones de tiempo.....	18
Sondas de corriente.....	11	Mediciones de duración de impulso y tiempo de subida.....	18
Sondas de alto voltaje.....	11	Decodificación de buses serie.....	18
		Análisis de frecuencia, estadística y funciones matemáticas.....	18
Ventajas de un convertidor A/D no entrelazado	12		
Aspectos a tener en cuenta sobre las sondas.....	13	Resumen	20
Carga de circuitos	13		
Puesta a tierra	13	Glosario	21
Proceso de selección de sondas.....	13		

INTRODUCCIÓN

No cabe duda de que el osciloscopio es una de las herramientas más potentes que han sido creadas para el uso de los ingenieros electrónicos. Han transcurrido más de cinco décadas desde la creación del osciloscopio analógico, se han escrito cientos de documentos y miles de artículos útiles que explican en qué consiste, cómo funciona y cómo se utiliza y que muestran al osciloscopio en acción a través de ejemplos específicos de aplicación. Por lo tanto, este manual básico se enfocará en los osciloscopios digitales, los cuáles han reemplazado a sus predecesores analógicos en la gran mayoría de las aplicaciones. Incluye una breve descripción de los orígenes del osciloscopio, su transición del modelo analógico al digital, los tipos de osciloscopios digitales y sus principales subsistemas, especificaciones clave y mediciones.

Dónde empezó todo

El físico alemán K. F. Braun, ganador del premio Nobel (fig. 1), inventó el osciloscopio de tubos de rayos catódicos (CRT) como una curiosidad física en 1897. Para ello aplicó una señal oscilante a unas placas deflectoras horizontales y una señal de prueba a un deflector vertical en un CRT con revestimiento de fósforo. Las placas generaban tramas transitorias de formas de onda eléctricas en la pequeña pantalla de fósforo. Este invento evolucionó hasta convertirse en un instrumento de medición que fue perfeccionándose de manera gradual a lo largo de los 50 años siguientes. El ingeniero Howard Vollum hizo un avance en 1947 al transformar el osciloscopio en un instrumento de gran utilidad cuando incluyó un disparo que permitía controlar por primera vez la función de barrido.

Al no tener un sistema de disparo, los primeros osciloscopios trazaban la forma de onda del voltaje de entrada y empezaban una traza horizontal cuando el voltaje de entrada excedía un umbral ajustable. La función de disparo permitió que las formas de onda repetidas permanezcan estables en la pantalla CRT mientras se dibujaban múltiples repeticiones de la forma de onda sobre la misma traza. En ausencia de disparo, el osciloscopio trazaría varias copias de la forma de señal en diferentes lugares,



Fig. 1: K. F. Braun, ganador del premio Nobel

dando lugar a una imagen caótica e incoherente o a una imagen en movimiento en la pantalla.

A lo largo de los años, los osciloscopios continuaron mejorando tanto en funciones como en características paralelamente con el rápido desarrollo de software y de dispositivos semiconductores digitales y analógicos de alto rendimiento.

El despertar de la era digital

Los osciloscopios digitales empezaron a ser cada vez más populares en la década de los 80, ya que se beneficiaron de la mayor rapidez en la conversión de analógico a digital (A/D) y en la memoria necesaria para grabar y visualizar formas de onda (fig. 2). Incluso las funciones de disparo, análisis y visualización de los primeros osciloscopios digitales eran tan flexibles que ningún osciloscopio analógico podría igualar. Los avances en materia de semiconductores y software transformaron el diseño del instrumento, que pasó de ser mayormente analógico a ser mayormente digital. Otros productos de consumo, comerciales e industriales, se beneficiaron igualmente del procesamiento digital de señales, pero, esta tecnología ofreció a los osciloscopios digitales ventajas verdaderamente importantes. En general, la señal no solo podía manipularse de formas nunca antes posibles, sino que también puede analizarse al detalle, mientras que se adapta a los requisitos especiales de flujos de datos cada vez más complejos y de alta velocidad. Ahora, los usuarios pueden capturar eventos basados en parámetros específicos y ver también lo que había sucedido antes. Los osciloscopios ya pueden ahora ser parte de un sistema de prueba automatizado que, gracias a las redes de área local y a la internet, pueden mostrar los resultados a los usuarios situados en una habitación contigua, en otra ciudad o en otro continente. Uno de los puntos clave en el desarrollo del diseño de los osciloscopios digitales fue la introducción del sistema de disparo digital por Rohde & Schwarz en 2009, que eliminaba las limitaciones inherentes (como el jitter de disparo) de los modelos analógicos. Esto se describe detalladamente más adelante.

Tipos de osciloscopios digitales

El osciloscopio digital ejecuta dos funciones básicas: la adquisición y el análisis. La adquisición consiste en el almacenamiento de las señales muestreadas en la memoria. Durante el análisis, las formas de onda adquiridas se examinan y visualizan por la pantalla. Existen una gran variedad de osciloscopios digitales. Los aquí descritos son los más usuales hoy en día.

Osciloscopios digitales de muestreo

El osciloscopio digital muestrea las señales antes de que se realice cualquier acondicionamiento de estas, como por ejemplo mediante atenuación o amplificación. El diseño permite al instrumento disponer de un ancho de banda muy amplio, aunque con un rango dinámico algo limitado de 1 V (V_{pp}). A diferencia de otros tipos de osciloscopios digitales, el osciloscopio digital de muestreo puede capturar señales con componentes de frecuencia mucho más altos que su velocidad de muestreo. Esto le permite medir señales repetitivas mucho más rápido que cualquier otro tipo de osciloscopio. Como resultado, los osciloscopios digitales de muestreo se utilizan en aplicaciones con un gran ancho de banda, como las de fibra óptica, que justifican su alto costo.

Osciloscopios de muestreo en tiempo real

Las ventajas del muestreo en tiempo real son claras cuando la gama de frecuencias de una señal es inferior a la mitad de la máxima velocidad de muestreo del osciloscopio. Esta técnica permite al instrumento adquirir un gran número de puntos en un solo barrido para una visualización muy precisa. Actualmente es el único método capaz de capturar las señales transitorias más rápidas con un solo disparo. Los osciloscopios de la serie R&S®RTO pertenecen a esta categoría.

Los sistemas integrados a nivel de tarjeta generalmente abarcan señales de 1 bit, buses serie y en paralelo síncronos o asíncronos, así como también formatos de transmisión estandarizados o propietarios. Todas estas rutas de acceso deben analizarse, lo que normalmente requiere complejas configuraciones de prueba y múltiples instrumentos. También suele ser necesario visualizar tanto señales analógicas como digitales. Para este fin, hoy en día muchos osciloscopios digitales poseen opciones específicas que los convierten en instrumentos híbridos con la capacidad de análisis de un analizador lógico. Esto sirve para depurar de manera rápida circuitos digitales gracias a su sistema de disparo digital, su alta resolución, su capacidad de adquisición y sus herramientas de análisis.

Osciloscopios de señal mixta

Los osciloscopios de señal mixta expanden la funcionalidad del osciloscopio digital para incluir análisis lógico y de protocolo, lo que simplifica su configuración y permite la visualización sincrónica de formas de onda analógicas, señales digitales y detalles de protocolo en un solo instrumento. Los desarrolladores de hardware utilizan osciloscopios de señal mixta para analizar la integridad de las señales, mientras que los desarrolladores de software los usan para analizar el contenido de las señales. Un osciloscopio de señal mixta típico posee dos o cuatro canales analógicos y un número mucho mayor de canales digitales. Los canales analógicos y digitales se adquieren de manera sincrónica, por lo que pueden correlacionarse en el tiempo y analizarse en un solo instrumento.



Fig. 2: Retos de la medición con osciloscopios

Elementos básicos de los osciloscopios digitales

Todo osciloscopio digital tiene cuatro bloques funcionales básicos: el sistema vertical, el sistema horizontal, el sistema de disparo y el sistema de visualización. Para apreciar la funcionalidad general de un osciloscopio digital, es muy importante entender las funciones y la importancia de cada uno de estos bloques.

Una gran parte del panel frontal está dedicada a las funciones vertical, horizontal y de disparo, que abarcan la mayor parte de los ajustes necesarios. La sección vertical se encarga de la atenuación o de la amplificación de señales por medio de un mando que regula los voltios por división y cambia así la atenuación o la amplificación para adaptar la señal a la pantalla. Los mandos horizontales son para la base de tiempo del instrumento y el mando de segundos por división determina la cantidad de tiempo por división que se muestra de manera horizontal en la pantalla. El sistema de disparo realiza la función básica de estabilizar la señal, iniciar el osciloscopio para realizar una adquisición y permitir al usuario seleccionar y modificar las acciones de tipos específicos de disparo. Finalmente, el sistema de visualización incluye la propia pantalla y los controladores, así como también el software necesario para implementar las numerosas funciones de visualización.

El sistema vertical

Este subsistema del osciloscopio (fig. 3) permite al usuario posicionar y escalar la forma de onda de manera vertical, seleccionar un valor para el acoplamiento de entrada, como también modificar las características de la señal para configurarlas en la pantalla. El usuario puede colocar la forma de onda en sentido vertical en una posición exacta en la pantalla y aumentar o reducir su tamaño. Todas las pantallas de los osciloscopios tienen una cuadrícula que divide la zona visible en 8 o 10 divisiones verticales, cada una de las cuales representa una parte del voltaje total. Un osciloscopio con 10 divisiones en la cuadrícula puede visualizar un voltaje de señal total de 50 V en divisiones de 5 V.

Se puede seleccionar 8, 10 o alguna otra división. A menudo se elige 10 por simplicidad: es más fácil dividir por 10 que por 8. Por su parte, las sondas también afectan al escalado de la pantalla, ya que, o bien no atenúan las señales (una sonda 1x) o las atenúan 10 veces (una sonda 10x) o incluso 1000 veces. Las sondas se describen más adelante.

El acoplamiento de entrada antes mencionado define básicamente el modo en que la señal traza el trayecto desde su captura por la sonda hasta su llegada al instrumento pasando por el cable. El acoplamiento de CC proporciona 1 M Ω o 50 Ω de acoplamiento de entrada. Con una selección de 50 Ω se envía la señal de entrada directamente al amplificador de ganancia vertical del osciloscopio para poder obtener el mayor ancho de banda posible. La elección de modo de acoplamiento de CA o CC (con el correspondiente valor de terminación de 1 M Ω) sitúa al amplificador frente al amplificador de ganancia vertical, lo que generalmente limita el ancho de banda a 500 MHz. La ventaja de esa impedancia tan elevada es la protección inherente frente a altos voltajes. Al seleccionar «ground» en el panel frontal, el sistema vertical se desconecta, de modo que el punto de 0 V se visualiza en la pantalla.

Otros circuitos relacionados con el sistema vertical incluyen un limitador de ancho de banda, que, además de reducir el ruido en las formas de onda visualizadas, también atenúa el contenido de las señales de alta frecuencia. Muchos osciloscopios utilizan también un filtro de ecualización arbitraria DSP para ampliar el ancho de banda del instrumento más allá de la respuesta en bruto de su front-end, dando forma a la respuesta en fase y magnitud del canal del osciloscopio. Sin embargo, estos circuitos requieren que la velocidad de muestreo cumpla con los criterios de Nyquist (la velocidad de muestreo debe exceder el doble de la máxima frecuencia fundamental de la señal). Para lograr esto, se suele bloquear el instrumento en su máxima velocidad de muestreo, impidiendo que esta baje para visualizar una duración temporal más larga sin desactivar el filtro.

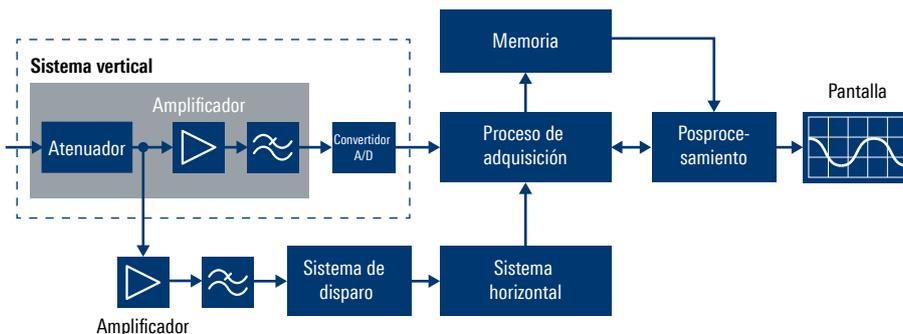


Fig. 3: El sistema vertical

El sistema horizontal

El sistema horizontal está más relacionado con la adquisición de señal que el sistema vertical, y pone énfasis en parámetros de rendimiento como la velocidad de muestreo y la profundidad de memoria, así como otros vinculados directamente con la adquisición y la conversión de la señal. El tiempo entre puntos de muestreo se denomina intervalo de muestreo y representa los valores digitales almacenados en la memoria para generar la forma de onda respectiva.

El tiempo entre puntos de una forma de onda se denomina intervalo de forma de onda. Dado que un punto de una forma de onda puede generarse a partir de varios puntos de muestreo, ambos están relacionados y pueden tener a veces el mismo valor.

El menú de modo de adquisición de un osciloscopio típico es muy limitado, ya que, con solo una forma de onda por canal, los usuarios pueden escoger un solo tipo de decimación o un tipo de aritmética de forma de onda. Sin embargo, algunos osciloscopios pueden mostrar en paralelo tres formas de onda por canal, de modo que pueden combinarse los tipos de decimación y la aritmética de la forma de onda para cada forma de onda. Los modos más usuales son:

► Modo de muestreo

Se crea un punto de una forma de onda con una muestra para cada intervalo de forma de onda

► Modo de alta resolución

Para cada intervalo se muestra un promedio de las muestras del intervalo de forma de onda

► Modo de valor de pico

Para cada intervalo se muestra el mínimo y el máximo de los puntos de muestreo dentro de una forma de onda

► Modo de valor eficaz

Se muestra el valor eficaz de las muestras dentro del intervalo de forma de onda. Esto es proporcional a la potencia instantánea

Los modos aritméticos de forma de onda más usuales son:

► Modo de envolvente

Usando las formas de onda capturadas a partir de un mínimo de dos eventos de disparo, el osciloscopio crea un contorno (envolvente) que representa los valores máximo y mínimo para una forma de onda

► Modo de promedio

Se forma el promedio de cada muestra de intervalo de forma de onda a partir de un número de adquisiciones

El sistema de disparo

El disparo es uno de los elementos fundamentales de todo osciloscopio digital, ya que captura eventos de señal para su análisis detallado y proporciona una vista estable de las formas de ondas repetidas. La precisión de un sistema de disparo y su flexibilidad determinan el grado de calidad de su visualización y el análisis de la señal medida. Como ya se ha señalado, el disparo digital aporta ventajas significativas para el usuario del osciloscopio en términos de precisión de medición, densidad de adquisición y funcionalidad.

El disparo analógico

El disparo de un osciloscopio (fig. 4) proporciona una visualización estable de las formas de onda para el monitoreo continuo de las señales repetitivas. Al reaccionar a eventos específicos, resulta útil para aislar y visualizar características específicas de las señales, como los niveles lógicos «runt» que no alcanzan la amplitud necesaria y las perturbaciones de señal causadas por la diafonía, los flancos lentos o una temporización incorrecta entre canales. El número de eventos de disparo y la flexibilidad del disparo han ido mejorando continuamente con los años.

Mientras que en los osciloscopios digitales la señal se muestrea y almacena como una serie continua de valores digitales, el disparo ha sido hasta hace poco un circuito exclusivamente analógico que procesa la señal original. El amplificador de entrada acondiciona la señal para adaptar su amplitud al rango de operación del convertidor A/D y

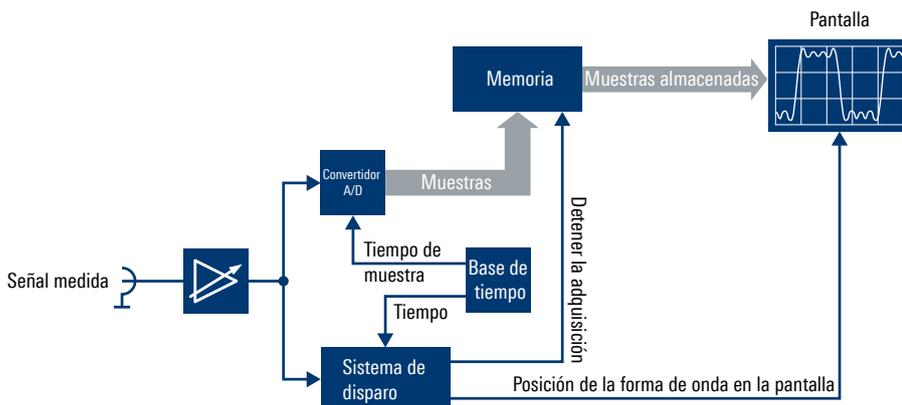


Fig. 4: Sistema de disparo analógico

la pantalla, y la señal acondicionada emitida por el amplificador se distribuye en paralelo al convertidor A/D y al sistema de disparo.

En un trayecto, el convertidor A/D muestrea la señal medida y los valores de muestreo digitalizados se graban en la memoria de adquisición, mientras que en el otro, el sistema de disparo compara la señal con eventos de disparo válidos como el rebase de un umbral de disparo con el disparo por flanco. Cuando se cumple una condición de disparo válida, el convertidor A/D deja de adquirir muestras y la forma de señal adquirida se procesa y se visualiza. El rebase del nivel de disparo por la señal medida da lugar a un evento de disparo válido. Para visualizar de manera correcta la señal en la pantalla, la temporización del punto de disparo debe ser precisa. De lo contrario, la forma de onda mostrada no cruza el punto de disparo (el punto de intersección entre el nivel de disparo y la posición de disparo).

Esto puede deberse a varios factores. En primer lugar, en el sistema de disparo la señal se compara con un umbral de disparo por medio de un comparador, y la temporización del flanco a la salida del comparador debe medirse con precisión usando un convertidor de tiempo a señal digital (TDC). Si el TDC es impreciso, la forma de onda visualizada se desviará respecto al punto de disparo, lo que causará que la desviación cambie con cada evento de disparo, lo que da lugar al denominado «jitter» de disparo.

Otro factor es la presencia de fuentes de error en los dos trayectos de la señal medida. La señal se procesa en dos diferentes trayectos (el trayecto de adquisición del convertidor A/D y el trayecto del disparo), y ambos trayectos contienen diferentes distorsiones, tanto lineales como no lineales. Esto causa desajustes sistemáticos entre la señal mostrada y el punto de disparo determinado. En el peor de los casos, el disparo podría no reaccionar frente a eventos de disparo válidos, aunque estos sean visibles en la pantalla, o podría reaccionar a eventos de disparo que no pueden ser capturados y visualizados por el trayecto de adquisición.

El último factor es la presencia de fuentes de ruido en los dos trayectos, ya que ambos incluyen amplificadores con diferentes niveles de ruido. Esto provoca retardos y variaciones de amplitud que aparecen en la pantalla como desviaciones de la posición de disparo (jitter). Estos errores no se producen cuando se implementa el disparo por vía digital.

El disparo digital

A diferencia de un disparo analógico, un sistema de disparo digital (fig. 5) opera directamente sobre las muestras del convertidor A/D, y la señal no se divide en dos trayectos, sino que se procesa la misma señal que se adquiere y visualiza. Como resultado, se eliminan las deficiencias normales para los sistemas de disparo analógico. Para evaluar un punto de disparo, un disparo digital aplica algoritmos DSP de gran precisión que detectan los eventos de disparo válidos y miden con precisión los sellos de tiempo. El reto consiste en implementar el procesamiento de señales en tiempo real para un monitoreo sin interrupciones de las señales medidas. Por ejemplo, el disparo digital de los instrumentos de la serie R&S®RTO emplea un convertidor A/D de 8 bits que muestrea a 10 GSa/s y procesa datos a 80 Gbit/s.

Dado que el disparo digital utiliza los mismos datos digitalizados que el trayecto de adquisición, puede obtenerse un disparo frente a eventos de señal dentro del rango del convertidor A/D. En un evento de disparo seleccionado, la señal se compara con el umbral de disparo definido. En un ejemplo sencillo (un disparo por flanco), se detecta un evento cuando la señal sobrepasa el umbral de disparo en la dirección especificada, tanto si la pendiente es ascendente como descendente. En un sistema digital, la señal se representa mediante muestras y la velocidad de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia máxima de la señal. Solo entonces es posible la reconstrucción completa de la señal.

Una decisión de disparo basada solamente en muestras de un convertidor A/D no es suficiente porque se pueden perder cuando sobrepasan el umbral de disparo. Por ello se aumenta la resolución de tiempo incrementando la velocidad de muestreo de la señal por medio de un interpolador

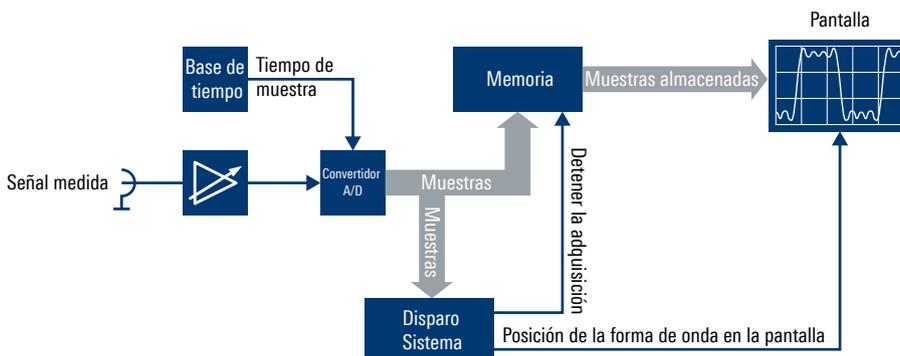


Fig. 5: Sistema de disparo digital

hasta un valor de 20 GSa/s. Después del interpolador, el comparador coteja los valores muestreados con el umbral de disparo definido, y el nivel de salida del comparador cambia si un evento de disparo se detecta.

La figura 6 muestra dónde se reducen las zonas ciegas de una señal al aumentar la resolución de muestreo mediante un incremento de la velocidad de muestreo en un factor dos. A la izquierda, las muestras de forma de onda no incluyen el sobreimpulso en la forma de onda y el umbral de disparo por encima de las muestras del convertidor A/D no puede detectar el sobreimpulso. A la derecha, la velocidad de muestreo de la forma de señal se duplica por medio de la interpolación, lo cual hace posible el disparo por sobreimpulso. La frecuencia máxima es de 3.5 GHz, por lo que el sistema de disparo digital puede detectar componentes de frecuencia con el convertidor A/D a una velocidad de hasta 10 GSa/s.

En el caso de los eventos de disparo, como glitch o duración de impulso, condicionados por el tiempo, el disparo digital puede activarse de manera muy precisa, ya que determina los puntos de intersección en el umbral en tiempo real. La temporización de eventos de disparo puede configurarse para una resolución de 1 ps y la mínima duración de impulso detectable es de 100 ps.

Las ventajas específicas de un disparo digital se muestran en la tabla 1.

El proceso de disparo

El barrido activado por disparo se inicia en un punto seleccionado y permite visualizar señales periódicas como ondas senoidales o cuadradas, así como señales aperiódicas como impulsos individuales o impulsos que no se repiten a una velocidad fija. El tipo de disparo más habitual es el disparo por flanco, que se habilita cuando el voltaje sobrepasa algún valor establecido. El usuario puede escoger entre un flanco ascendente o un flanco descendente.

El disparo por glitch permite al instrumento disparar sobre un impulso de un ancho superior o inferior a un intervalo de tiempo especificado. Esto se emplea habitualmente para localizar errores que ocurren de manera aleatoria o intermitente y que por eso resultan muy difíciles de detectar.

El disparo por duración de impulso es muy similar al disparo por glitch en cuanto a su objetivo, que es localizar anchos de impulsos específicos y permite especificar impulsos de cualquier ancho, ya sean negativos o positivos, junto con una posición horizontal de disparo. La ventaja radica en que el usuario puede ver lo que ha sucedido antes o después del disparo, algo muy útil, ya que esta información puede facilitar la comprensión de las causas de un error. Si se ajusta el retardo horizontal a 0, el evento de disparo aparecerá en el centro de la pantalla, los eventos previos al disparo se mostrarán a la izquierda, y los posteriores, a la derecha.

Además de estos disparos, existen otros muchos tipos reservados para situaciones específicas, que permiten detectar eventos de interés. Por ejemplo, dependiendo del instrumento, el usuario puede configurar el disparo para impulsos definidos por amplitud, tiempo (duración de impulso, glitch, velocidad de rotación, configuración «setup&hold», así como tiempo de espera), o bien por estado lógico o patrón. Otras funciones de disparo incluyen el disparo en patrones serie, el disparo A + B y el disparo en bus paralelo o serie.

Los osciloscopios digitales pueden disparar en eventos individuales o retardados, pueden controlar el momento en que deben buscarse dichos eventos, y pueden reiniciar el proceso de disparo para volver a empezar la secuencia después de un tiempo, estado o transición específicos. Como resultado, se pueden capturar eventos incluso en las señales más complejas.

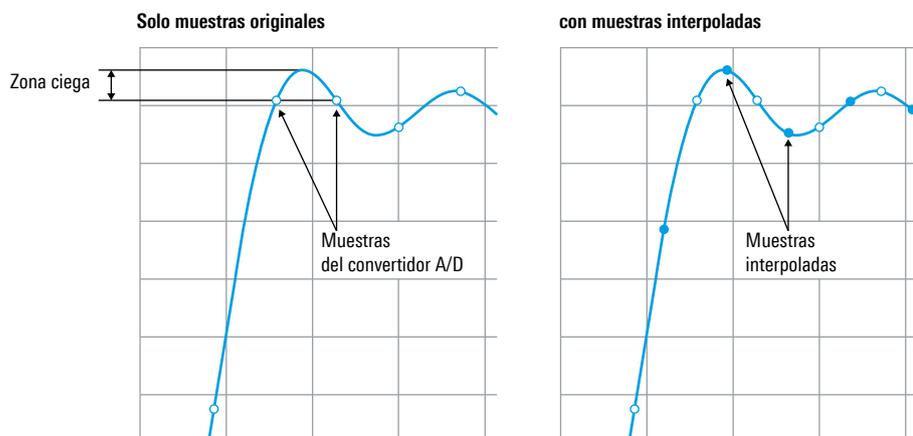


Fig. 6: Reducción de la zona ciega

Los osciloscopios digitales ofrecen un control de posición de disparo, que ajusta la posición horizontal del disparo en el registro de la forma de onda. Al modificarlo, el usuario puede capturar el aspecto que presentaba la señal antes de que se produjera el evento. También determina la longitud de la señal visible antes y después del punto de disparo. El control de pendiente del osciloscopio ajusta en qué lugar de la señal se producirá el disparo (ya sea en el flanco ascendente o en el flanco descendente).

Modos de disparo

El modo de disparo determina si el osciloscopio muestra una forma de onda y cuándo lo hace. Todos los osciloscopios tienen dos modos de disparo: un modo normal y un modo automático (auto). Cuando está ajustado el modo normal, el osciloscopio dispara solo cuando la señal alcanza un punto determinado. En modo automático, el instrumento barre, aunque el disparo no esté definido.

Acoplamiento y retención de disparo

Algunos osciloscopios permiten seleccionar el tipo de acoplamiento (CA o CC) para la señal de disparo y otros además el acoplamiento para el rechazo de alta frecuencia, el rechazo de baja frecuencia y el rechazo de ruido. Las configuraciones más avanzadas están diseñadas para eliminar ruido y otros componentes espectrales de la señal

de disparo a fin de prevenir disparos falsos. Garantizar que el osciloscopio dispare en la parte correcta de la señal, a veces no es fácil, por lo que la mayoría de instrumentos simplifican esta tarea con la función de retención de disparo (holdoff). Se trata de un período de tiempo que se puede definir después de un disparo durante el cual el osciloscopio no puede disparar. Esto resulta útil cuando se dispara en formas de onda complejas, ya que asegura que el osciloscopio solo dispare en el punto deseado.

El sistema de visualización y la interfaz de usuario

Como su nombre indica, el sistema de visualización controla todos los aspectos relacionados con la presentación de la señal al usuario. El conjunto de líneas que divide la pantalla se denomina una cuadrícula o retícula. Los osciloscopios digitales y sus tareas son complejos, por lo que la interfaz de usuario debe ser extensa pero fácil de entender. Por ejemplo, la pantalla táctil de la serie R&S®RTO utiliza elementos de control codificados por color, estructuras de menú planas y teclas para funciones de uso frecuente. En la serie R&S®RTM, basta con presionar un botón para iniciar una función de medición rápida que muestra los valores de una señal activa. También ofrece cuadros de diálogo semitransparentes, ventanas de medición desplazables, una barra de herramientas configurable e íconos de previsualización con formas de onda en tiempo real.

Tabla 1: Ventajas del sistema de disparo digital

Bajo nivel de jitter en tiempo real	Cuando se utilizan valores de muestra idénticos tanto para el proceso de adquisición como de disparo, puede obtenerse un nivel muy bajo de jitter de disparo (valor eficaz inferior a 1 ps). A diferencia de sistemas de disparo mejorados por software e implementados con métodos de posprocesamiento, el disparo digital no necesita periodos de tiempo ciego después de cada adquisición. Como resultado, el R&S®RTO puede alcanzar una velocidad máxima de adquisición y análisis de 1 millón de formas de onda por segundo.
Sensibilidad óptima del disparo	La sensibilidad del disparo analógico está limitada a una división vertical mayor que uno, y el modo de rechazo de ruido del instrumento permite seleccionar una histéresis mayor para lograr un disparo estable con señales ruidosas. Sin embargo, el disparo digital permite ajustar la histéresis de disparo entre 0 y 5 divisiones a fin de optimizar la sensibilidad a las características de cada señal. De este modo puede obtenerse un disparo preciso con un valor tan bajo como 1 mV/div. sin limitación de ancho de banda.
Sin enmascaramiento de eventos de disparo	Un disparo analógico requiere un cierto tiempo después de la decisión de disparo a fin de rearmar el circuito de disparo antes de poder volver a disparar. Durante ese tiempo, el osciloscopio no puede reaccionar ante nuevos eventos de disparo, por lo que estos quedan enmascarados. En cambio, un disparo digital puede evaluar cada evento de disparo en intervalos de 400 ps con una resolución de 250 fs.
Filtrado flexible de señales de disparo	En los instrumentos R&S®RTO, un ASIC de adquisición y disparo permite la programación flexible de la frecuencia de corte de un filtro digital de paso bajo en el trayecto de tiempo real, y puede usarse para la señal de disparo, la señal de medición o ambas. Este filtrado suprime el ruido de alta frecuencia al tiempo que captura y visualiza la señal de medición no filtrada.
Reconocimiento de disparo con compensación de skew de canal	La sincronización de los canales de entrada del osciloscopio es importante para las condiciones de medición y disparo entre dos o más señales. Los disparos analógicos proporcionan una función para compensar los retardos en diferentes entradas (deskew de señal), que tiene lugar en el trayecto de adquisición después del convertidor A/D. Esta operación resulta invisible, por lo que el sistema de disparo visualiza y evalúa señales incoherentes. Un sistema de disparo digital utiliza datos digitalizados y procesados idénticos, por lo que las formas de onda que se ven en la pantalla y las señales procesadas por la unidad de disparo son consistentes incluso cuando se aplica la compensación de skew de canal.

SONDAS

La misión de una sonda consiste en transportar la señal desde el circuito hasta el osciloscopio con la mayor transparencia posible. Es más que un simple accesorio del osciloscopio, ya que es el punto de contacto entre este y el dispositivo o circuito medido. Sus características eléctricas, el modo en que está conectada y su interacción con el osciloscopio y el circuito tienen un impacto decisivo sobre la medición.

Una sonda ideal es fácil de conectar, tiene contactos confiables y seguros, no degrada ni distorsiona la señal en transmisión, tiene un comportamiento de fase lineal y ninguna atenuación, un ancho de banda infinito, alta inmunidad contra ruido y no carga la fuente de la señal. Sin embargo, en la práctica, es imposible conseguir todos estos atributos y de hecho no son necesarios para la mayoría de mediciones. La señal a ser medida a menudo no es fácil de alcanzar, su impedancia puede variar ampliamente, la configuración general es sensible al ruido y dependiente de la frecuencia, el ancho de banda es limitado y las diferencias en la propagación de las señales crean leves desviaciones de tiempo (skew) entre los múltiples canales de medición.

Afortunadamente, los fabricantes de osciloscopios hacen todo lo posible para minimizar los problemas provocados por las sondas y las hacen más fáciles de conectar al circuito y más confiables una vez colocadas. Por ejemplo, manejar un osciloscopio con una mano mientras se sostiene una sonda con la otra siempre ha sido una tarea difícil. Las sondas activas para los osciloscopios R&S®RTO tienen un botón que permite a los usuarios cambiar entre las funciones del osciloscopio y que puede asignarse a varias funciones. Además, tienen un voltímetro integrado denominado R&S®ProbeMeter, que permite realizar mediciones precisas de CC con más exactitud que un canal de osciloscopio tradicional.

Los dos tipos básicos son las sondas de voltaje y las sondas de corriente CA o CA/CC. Sin embargo, existen muchos otros tipos (fig. 7) dedicados a mediciones específicas, entre las que figuran las sondas lógicas, diseñadas

para la resolución de problemas de estado lógico en un circuito digital. Las sondas ambientales están diseñadas para funcionar en amplios rangos de temperatura. Miden la temperatura de los componentes y puntos de un circuito donde es probable que se registren altas temperaturas. Existen también sondas diseñadas para usarse a nivel de oblea en estaciones de sondeo y sondas ópticas, que convierten señales ópticas a eléctricas y hacen posible visualizar señales ópticas en el osciloscopio, así como sondas específicas para medir voltajes muy altos.

Sondas pasivas

El tipo de sonda más simple y más económico, la sonda pasiva, ofrece la mayor parte de las funciones de medición necesarias. Están compuestas de cables, conectores, y, si se requiere atenuación, también resistencias y condensadores. Las sondas pasivas no incluyen componentes activos, por lo que pueden funcionar sin energía procedente del instrumento y son por naturaleza robustas.

Una sonda 1X (una vez) tiene el mismo rango dinámico que el osciloscopio, y una sonda atenuante amplía (multiplica) el rango del instrumento atenuando el nivel de la señal 10 veces, 100 veces o más. El tipo de sonda más versátil es 10X, ya que causa menos carga y presenta un mayor rango de voltaje. Es la típica sonda «estándar» que se suministra con numerosos instrumentos.

Una sonda pasiva de alta impedancia 1X, conectada a la entrada de 1 M Ω del osciloscopio, tiene una alta sensibilidad (baja atenuación), mientras que una sonda pasiva de alta impedancia 10:1, conectada también a la entrada de 1 M Ω del osciloscopio, ofrece un amplio rango dinámico,



Fig. 7: Diversos tipos de sondas y sus accesorios

así como mayor resistencia de entrada y baja capacitancia en comparación con la sonda 1X. Una sonda pasiva 10:1 de baja impedancia, conectada a la entrada de 50 Ω del osciloscopio, posee baja variación de impedancia en frecuencia, pero carga la fuente en gran medida debido a su impedancia nominal de 500 Ω .

Las sondas 1X son útiles cuando la amplitud de la señal es baja, pero cuando la señal es una mezcla de componentes de amplitud bajos y moderados, es más conveniente una sonda 1X/10X conmutable. El ancho de banda típico de las sondas pasivas abarca desde menos de 100 MHz hasta 500 MHz. En los entornos de 50 Ω asociados a las señales de alta velocidad (alta frecuencia), se requiere una sonda de 50 Ω con un ancho de banda que puede alcanzar varios gigahercios y un tiempo de subida de 100 ps o incluso más.

Las sondas pasivas incluyen un control de ajuste de baja frecuencia que se utiliza cuando la sonda está conectada al osciloscopio. La compensación de baja frecuencia adapta la capacitancia de la sonda a la capacitancia de entrada del osciloscopio. El control de ajuste de alta frecuencia se utiliza solo para operar con frecuencias por encima de unos 50 MHz aproximadamente. Las sondas pasivas de proveedores específicos para frecuencias mayores se ajustan de fábrica, de modo que basta con realizar el ajuste de baja frecuencia. Las sondas activas no requieren este tipo de ajustes, ya que sus propiedades y su compensación se determinan de fábrica.

Sondas activas

Las ventajas de las sondas activas (fig. 8) incluyen una baja carga en la fuente de señal, desviación de CC ajustable en la punta de la sonda, que permite aumentar la resolución en señales de CA pequeñas superpuestas sobre niveles de CC, y la detección automática por el instrumento, que elimina la necesidad de ajuste manual. Las sondas activas están disponibles en versiones de un solo extremo o diferenciales. Utilizan componentes activos como transistores de efecto campo, que permiten obte-



Fig. 8: Sondas activas

ner capacitancia de entrada muy baja, lo que tiene la ventaja de proporcionar alta impedancia de entrada que se mantiene a lo largo de una amplia gama de frecuencias. También permiten medir circuitos en donde se desconoce la impedancia, así como usar cables de puesta a tierra más largos. Dado su nivel de carga extremadamente bajo, las sondas activas son esenciales para la conexión a circuitos de alta impedancia, que las sondas pasivas cargarían hasta un límite inaceptable.

Sin embargo, el amplificador búfer integrado en las sondas activas funciona en un rango de voltaje limitado, y la impedancia de estas depende de la frecuencia de la señal. Además, aunque pueden llegar a manejar miles de voltios, las sondas activas no dejan de ser dispositivos activos, y no son mecánicamente tan robustas como las sondas pasivas.

Sondas diferenciales

Aunque para sondear y medir una señal diferencial podría usarse una sonda para cada señal, el mejor método es usar una sonda diferencial. Esta utiliza un amplificador diferencial integrado para sustraer las dos señales, de modo que solo ocupa un canal del osciloscopio, y además ofrece un rendimiento muy superior de CMRR (factor de rechazo en modo común) en una gama de frecuencias más amplia que las mediciones de un solo extremo. Pueden usarse para aplicaciones de un solo extremo o diferenciales.

Sondas de corriente

La misión de las sondas de corriente consiste en sondear la intensidad de un campo de flujo electromagnético cuando fluye corriente a través de un conductor. A continuación, este campo se convierte al voltaje correspondiente para su medición y análisis mediante un osciloscopio. Cuando se usan en combinación con las funciones matemáticas y de medición de un osciloscopio, las sondas de corriente permiten al usuario realizar una gran variedad de mediciones de potencia.

Sondas de alto voltaje

El máximo voltaje para sondas pasivas de uso general oscila normalmente en torno a 400 V. Cuando se trabaja con circuitos que presentan voltajes muy altos, de hasta 20 kV, pueden usarse sondas específicas que permiten medirlos con seguridad. Obviamente, cuando se realizan mediciones a voltajes tan altos, la primera prioridad es la seguridad, que este tipo de sondas suele garantizar cuando se usan cables mucho más largos.

VENTAJAS DE UN CONVERTIDOR A/D NO ENTRELAZADO

Después de las sondas, el convertidor A/D es el primer principal componente del osciloscopio que la señal atraviesa, y el modo en que actúa sobre la señal determina qué tan bien funcionan los elementos de procesamiento posteriores. Estos convertidores A/D suelen construirse a partir de varios convertidores que se intercalan en paralelo y forman conjuntamente el osciloscopio. Sin embargo, la alternativa que consiste en utilizar un solo convertidor A/D tiene ventajas importantes y fue escogida por Rohde & Schwarz para la serie R&S®RTO.

Incluso cuando se entrelazan solo unos pocos convertidores centrales, es esencial que sus características de ruido, fase y respuesta en frecuencia varíen lo menos posible. Además, la temporización del entrelazado resulta crítica cuando los intervalos de medición son de decenas de picosegundos, y el reloj de muestreo distribuido a cada uno de los convertidores debe tener también unas características de fase extraordinariamente precisas en toda la gama de frecuencias del osciloscopio, lo cual representa un reto nada fácil. La temporización de cada convertidor dentro del convertidor A/D varía hasta cierto punto respecto a los otros, así que, si hay cinco convertidores entrelazados, habrá cinco relojes de muestreo ligeramente divergentes, lo cual se reflejará en el dominio de la frecuencia en forma de componentes de la frecuencia fundamental.

Estos componentes de frecuencia suelen encontrarse 40 o 50 dB por debajo de la escala real (pero sin embargo son claramente visibles) y aparecen de manera periódica, por lo tanto, no pueden promediarse como el ruido. Son producidos por la temporización, amplitudes no coincidentes o por ambas. Ya que existen tanto en el dominio de la frecuencia como en el del tiempo, pueden aparecer como ruido a causa de los numerosos armónicos a diferentes frecuencias que, juntos aparecen como señal aleatoria en el tiempo.

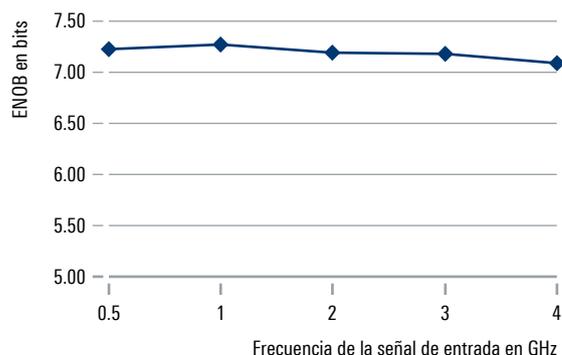
Esta es la razón por la que algunos fabricantes utilizan un gran número de convertidores, ya que todos juntos producen resultados que parecen ruido y pueden identificarse y mitigarse hasta cierto punto. Sin embargo, la entrada de señal de datos de banda ancha al osciloscopio se mezcla con el contenido espurio de estos convertidores, produciendo contenido espurio adicional. En resumen, el nivel general de ruido del osciloscopio (ruido más distorsión) limita el número de bits efectivos que pueden derivarse de un convertidor A/D. Dado que en muchos convertidores el entrelazado es una de las principales causas del nivel de ruido, la mejor manera de resolver este problema es utilizar un solo convertidor A/D en lugar de muchos.

Rohde & Schwarz optó por este enfoque en la serie R&S®RTO. Es un convertidor tipo flash único con 8 bits de resolución que muestrea a 10 GSa/s para obtener un ENOB de 7 (sobre un máximo de 8). El resultado disminuye el ruido de fondo en el sistema en aproximadamente 6 dB, lo que mejora la relación señal-ruido (SNR) y el rango dinámico para que se puedan distinguir de manera muy fácil voltajes muy pequeños.

Además, las mediciones en el dominio de la frecuencia como potencia de canal, la distorsión armónica total y la relación de potencia de canal adyacente pueden determinarse con más precisión porque el espectro no está contaminado por ruido generado por el osciloscopio. Un ASIC específico usa este rendimiento para aumentar drásticamente la velocidad a la que el instrumento es capaz de pasar de las muestras enteras brutas del convertidor A/D a la forma de señal medida. Con 40 millones de formas de onda muestreadas, un osciloscopio típico puede necesitar varios minutos para completar la adquisición, mientras que el R&S®RTO realiza esta operación en fracciones de segundo.

Número efectivo de bits (ENOB)

El ENOB permanentemente elevado de los convertidores A/D de los osciloscopios R&S®RTO garantiza una representación fidedigna de los detalles de la señal y alto rango dinámico.



Aspectos a tener en cuenta sobre las sondas

Carga de circuitos

La característica primordial que la sonda aporta al circuito es la carga, que puede ser resistiva, capacitiva o inductiva. La carga resistiva atenúa la amplitud, al desplazar la desviación de CC y al cambiar la polarización del circuito. La carga resistiva es importante si la resistencia de entrada de la sonda es la misma que la de la señal sondeada, ya que una parte de la corriente que fluye por el circuito penetra en la sonda. Esto reduce el voltaje en el punto donde el circuito contacta con la sonda y permite que un circuito defectuoso funcione de manera correcta, pero más a menudo provoca un mal funcionamiento. Para reducir el efecto de la carga resistiva, es conveniente utilizar una sonda con una resistencia 10 veces superior a la resistencia del circuito bajo prueba.

La carga capacitiva reduce la velocidad del tiempo de subida, reduce el ancho de banda e incrementa el retardo de propagación. Está causada por la capacitancia en la punta de la sonda. Provoca errores de medición dependientes de la frecuencia, y representa el mayor problema a la hora de realizar mediciones de retardo y tiempo de subida. La carga capacitiva se debe a que la capacitancia de la sonda actúa como filtro de paso bajo a altas frecuencias, al desviar la información de alta frecuencia a tierra y reducir notablemente la impedancia de entrada de la sonda a altas frecuencias. Por eso es muy recomendable usar sondas con puntas de baja capacitancia.

La carga inductiva distorsiona la señal y se debe a la inductancia del bucle formado por la punta de la sonda y el cable de tierra de la sonda. La sobreoscilación de la señal, causada por la carga inductiva en el cable de tierra junto con la capacitancia de la punta de la sonda, puede mitigarse con una puesta a tierra adecuada. Esto incrementa la frecuencia de sobreoscilación hasta por encima del ancho de banda del instrumento. El cable de tierra siempre debe ser lo más corto posible para reducir el tamaño del bucle y minimizar la inductancia. Una inductancia más baja minimiza la sobreoscilación en la parte superior de la forma de onda.

Puesta a tierra

Una puesta a tierra apropiada es esencial ya que garantiza la precisión de las mediciones y la seguridad del operador, en especial cuando se trabaja con altos voltajes. El instrumento debe estar puesto a tierra a través de un cable de poder y nunca debe operarse con la tierra de protección desconectada. Se puede dar un zumbido de baja frecuencia indeseado si la señal del dispositivo bajo prueba se conecta a tierra por la red eléctrica en un lugar distinto y causa así un bucle de tierra. El remedio habitual consiste en aislar la conexión a tierra de la señal respecto a la de

la red eléctrica y crear una conexión con la tierra de señal cerca de la clavija de la señal.

Proceso de selección de sondas

Dos factores son importantes a la hora de elegir la sonda (de voltaje): el ancho de banda necesario para capturar la forma de onda sin distorsión y la impedancia mínima deseada para minimizar la carga del circuito. El ancho de banda de osciloscopio especificado es válido solo para una impedancia de entrada de 50 Ω y un rango de voltaje de entrada limitado. Debe ser al menos cinco veces mayor que la máxima frecuencia del impulso que debe medirse, a fin de preservar los armónicos y, por lo tanto, la integridad de la forma de señal.

La impedancia de CC especificada es irrelevante para las mediciones de CA. Al aumentar la frecuencia, la impedancia decrece, y en el caso de las sondas pasivas, de manera muy drástica. Cuando se trata de mantener la impedancia de entrada a un nivel por lo menos 10 veces superior al de la impedancia de la fuente con la frecuencia de señal más alta, la elección entre una sonda activa o una pasiva es simple. Esto puede reducir la elección a solo uno o dos modelos, los más capaces de cumplir con los requisitos de la configuración de medición. Las sondas activas son imprescindibles para usar al máximo el ancho de banda de un osciloscopio en la región de microondas.

Recuerde que la impedancia a baja frecuencia es más alta en sondas pasivas 10X, y por lo general, no generan desviaciones de CC ni generan ruido. Las sondas activas ofrecen una impedancia constante a frecuencias de cientos de kilohercios y máxima impedancia hasta varios cientos de megahercios. Las sondas de baja impedancia ofrecen impedancia constante hasta 1 GHz, y aunque se espere impedancia a una frecuencia, una impedancia constante pero más baja evita la distorsión armónica de las señales.

En resumen, las sondas activas son recomendables para señales con componentes de frecuencia por encima de 100 MHz, y baja capacitancia de entrada da lugar a mayor frecuencia de resonancia. Las conexiones a sondas activas deben ser lo más cortas posible para obtener un gran ancho de banda. Además, si el nivel base se muestra inestable, puede ser necesaria una sonda diferencial.

Es importante utilizar el modelo recomendado de sondas pasivas según cada instrumento, aunque la especificación de ancho de banda de la sonda pueda parecer mayor de lo necesario. Baja capacitancia de entrada da lugar a mayor frecuencia de resonancia. El cable de tierra debe ser corto para minimizar la inductancia. Preste especial atención al medir tiempos de subida abruptos, ya que la frecuencia de resonancia puede ser mucho menor que el ancho de banda del sistema. La impedancia de la sonda debe ser unas diez veces superior a la del punto medido del circuito, para evitar cargarlo excesivamente.

ESPECIFICACIONES CLAVE DE LOS OSCILOSCOPIOS

Como sucede con todos los equipos electrónicos de prueba y medición, los osciloscopios digitales tienen una serie de especificaciones clave. Algunas son sencillas, pero otras se especifican de diferentes maneras dependiendo del fabricante, o pueden tal vez dar pie a confusión. En consecuencia, las definiciones que siguen están formuladas de modo más bien genérico.

Ancho de banda

El ancho de banda máximo es la especificación más importante de cualquier fabricante de osciloscopios digitales y por una buena razón, ya que determina la gama de frecuencias que el osciloscopio es capaz de medir con precisión. Si el ancho de banda no es el adecuado para una aplicación específica, no se cuenta con un instrumento preciso y útil, ya que no habrá contenido suficiente para mostrar la señal. El ancho de banda de un osciloscopio se define como la frecuencia más baja a la que la señal se atenúa en 3 dB, es decir, en la que una onda senoidal se atenuaría hasta el 70,7% de su amplitud real.

Seleccionar el ancho de banda adecuado para una determinada aplicación no siempre es tarea fácil. Obviamente, la manera más sencilla de satisfacer este requisito es seleccionar un instrumento con el mayor ancho de banda posible. Sin embargo, los osciloscopios de ancho de banda muy alto pueden ser excesivamente caros. Además, al aumentar el ancho de banda, se incrementa el nivel de ruido y se reduce notablemente el rango dinámico. Esto puede incrementar la incertidumbre de medición tanto como un ancho de banda inadecuado. La mejor opción es un osciloscopio con el mínimo ancho de banda necesario para las aplicaciones y señales que probablemente se adquieran.

Los osciloscopios principalmente miden impulsos digitales y una onda cuadrada es un impulso ideal con un ancho de banda infinito. El espectro de frecuencia de esta señal consiste en una señal a la frecuencia fundamental y armónicos impares. La amplitud de los armónicos sigue una función $\sin(x)/x$ en frecuencia, de modo que el tercer armónico es 13,5 dB inferior a la fundamental y el quinto armónico, 27 dB inferior a ella. El siguiente armónico, el séptimo, es de 54 dB y está por debajo del ruido de fondo de la mayoría de los osciloscopios. Una regla de oro para elegir el ancho de banda de un osciloscopio es la denominada «la regla del quinto armónico», que se basa en el espectro de la onda cuadrada. Esta regla a menudo conduce a elegir un ancho de banda excesivo.

El espectro descrito anteriormente se aplica a una onda cuadrada perfecta, pero todas las señales digitales tienen un tiempo de subida finito que modifica el espectro de la onda cuadrada y reduce la amplitud de los armónicos de orden superior. En muchos casos, el nivel del quinto armónico está muy por debajo del ruido de fondo del osciloscopio, y resulta preferible un menor ancho de banda. Esto suele suceder en el caso de las señales con un ancho de banda de 3 Gbit/s o superior, tales como las señales de datos serie, cuyo tiempo de subida relativo al intervalo de bits es cercano al 30%. En ese caso, un ancho de banda menos de cinco veces del fundamental es aceptable para obtener mediciones precisas.

El ancho de banda alcanzable también depende directamente de la sonda, que no es un dispositivo ideal, y, por lo tanto, tiene su propio ancho de banda, que debe tenerse en cuenta. El ancho de banda de la sonda siempre debe ser mayor que el ancho de banda del osciloscopio por un factor de aprox. 1.5 veces. Se necesita una sonda con un ancho de banda de 1.5 GHz para que el rendimiento del osciloscopio sea completo. Es importante que el ancho de banda de la sonda sea mayor para que las señales examinadas estén dentro de la región de respuesta en frecuencia plana de la sonda. En un osciloscopio típico con un ancho de banda de 1 GHz, esta región sería normalmente un tercio de la especificación máxima de ancho de banda de la sonda, o 300 MHz.

Más concretamente, la mayoría de las señales examinadas son más complejas que una simple onda senoidal, e incluyen diversos componentes espectrales, como los armónicos. Para visualizar señales digitales, el osciloscopio debe proporcionar un ancho de banda aproximadamente cinco veces mayor que la frecuencia del reloj. Para señales analógicas, la máxima frecuencia del dispositivo al que se conecta el osciloscopio determina el ancho de banda de osciloscopio necesario.

Número efectivo de bits (ENOB)

El número efectivo de bits (ENOB) es una especificación que puede ser confusa, ya que puede referirse tanto a los bits de la resolución máxima del convertidor A/D como también al número total efectivo de bits que este puede alcanzar cuando forma parte de un instrumento completo. El primer valor es necesariamente mayor que el segundo, y ninguna de las dos especificaciones aparece en la hoja de datos de un osciloscopio. Sin embargo, el ENOB es un acrónimo que vale la pena conocer. El ENOB se define por muchos factores, varía con la frecuencia, el ruido del front-end, la distorsión armónica y la distorsión entrelazada. Los proveedores de osciloscopios promocionan la proximidad de sus ENOB al valor bruto (como por ejemplo más de 7 u 8 bits para el R&S®RTO) y eso no es trivial (véase: Ventajas de un convertidor A/D no entrelazado, página 12).

Canales

Hasta hace algún tiempo, la mayoría de los osciloscopios digitales tenían 2 o 4 canales, pero hoy en día pueden llegar a tener 20, debido a la necesidad de medir señales analógicas y señales digitales complejas. A la hora de adquirir un osciloscopio, es fundamental calcular correctamente el número de canales que se necesitarán, ya que la alternativa es construir hardware externo de disparo. Cuando se utiliza en aplicaciones de depuración integradas, un osciloscopio de señal mixta, entrelazará 16 canales de temporización lógica con los 2 o 4 canales tradicionales.

Velocidad de muestreo

La velocidad de muestreo del osciloscopio es el número de muestras adquiridas durante 1 s y debe ser al menos 2.5 veces mayor que el ancho de banda de osciloscopio. Como los osciloscopios digitales más modernos tienen velocidades de muestreo extremadamente altas y anchos de banda superiores a 6 GHz, normalmente son diseñados para adaptarse a eventos transitorios de disparo único de alta velocidad. Lo logran al sobremuestrear a velocidades que pueden multiplicar por cinco el ancho de banda especificado. Aunque los fabricantes especifican una velocidad de muestreo máxima para sus osciloscopios, esta solo puede alcanzarse cuando se utiliza uno o dos canales. Si se utilizan más canales en simultáneo, puede que la velocidad de muestreo disminuya. Por lo tanto, el factor clave es cuántos canales pueden utilizarse al mismo tiempo para mantener la velocidad de muestreo máxima del instrumento. Al igual que cualquier sistema donde las señales analógicas se convierten en digitales, a mayor velocidad de muestreo, mayor la resolución y en el caso de los osciloscopios digitales, mejor serán los resultados que se visualicen.

Profundidad de memoria

Esta especificación es importante porque, a medida que la velocidad de muestreo se incrementa, crece también el volumen de memoria necesario para almacenar las señales capturadas. Cuanto mayor sea la memoria del instrumento, más formas de señal podrá capturar a su máxima velocidad de muestreo. En términos generales, los periodos de captura prolongados requieren mayor profundidad de memoria, pero puede reducirse drásticamente la velocidad de actualización cuando se selecciona el ajuste de memoria más profundo.

Mientras se lleva a cabo la adquisición de señales, los osciloscopios convencionales guardan, procesan y visualizan datos de manera continua. Mientras todo esto ocurre, el instrumento está básicamente ciego a las características de la señal que está siendo medida. A velocidades de muestreo más altas, el tiempo ciego puede normalmente ser mayor al 99,5% del tiempo total de adquisición por lo que las mediciones se llevan a cabo en menos del 0,5% del tiempo, y por lo tanto se ocultan fallas de la señal. Quizá el ejemplo más obvio de la necesidad de contar con suficiente memoria de captura es cuando un evento se produce de manera aleatoria o muy infrecuente. Si no hay suficiente memoria, la probabilidad de que el evento pase desapercibido aumenta drásticamente. Además de una memoria de alta velocidad, los osciloscopios como los de la serie R&S®RTO emplean un circuito integrado de aplicación específica (ASIC) que ejecuta múltiples procesos en paralelo, lo que reduce de manera radical el tiempo ciego y permite alcanzar una velocidad de análisis cercana a 1 millón de formas de onda por segundo, 20 veces más rápida que la de otros instrumentos.

Tipos de disparo

Afortunadamente para las personas interesadas en comprar un osciloscopio, la mayoría de modelos ofrecen una gran variedad de funciones de disparo tradicionales, así como también algunas dedicadas a aplicaciones comunes. Esto es importante debido a la gran cantidad de tipos de disparo posibles, que no siempre son adecuados para algunas aplicaciones. Prácticamente, todos los osciloscopios digitales incluyen disparo por flanco, glitch y patrón. Los osciloscopios de señal mixta permiten disparar tanto en canales lógicos como en canales del osciloscopio. Los ingenieros que trabajan con buses de interfaz serie comunes requerirán protocolos de disparo para SPI, UART/RS-232, CAN/LIN, USB, I²C, FlexRay™ y otros, por eso se incluyen otros posibles tipos de disparo en las especificaciones del osciloscopio.

Tiempo de subida

Hoy en día, la gran mayoría de las aplicaciones requieren de la medición de tiempo de subida, especialmente cuando se mide señales digitales con tiempo de subida muy rápido, por lo que este parámetro es más importante que nunca. El tiempo de subida del osciloscopio determina la gama de frecuencias útiles reales que puede alcanzar. Un osciloscopio con un tiempo de subida más rápido puede representar de manera más precisa los detalles de las transiciones de alta velocidad. Al aplicarlo a una sonda, su respuesta a una función escalonada indica el periodo más rápido que la sonda puede transmitir a la entrada del osciloscopio. La regla general aquí es que, para obtener mediciones precisas de tiempo de subida y bajada de un impulso, la velocidad de subida del sistema completo (osciloscopio y sonda) debe ser entre tres y cinco veces mayor que la de la transición más rápida.

Respuesta en frecuencia

La respuesta en frecuencia es una de las muchas características que determinan el rendimiento del osciloscopio digital y es también una de las más importantes, aunque nunca se incluya en las hojas de datos de los fabricantes. Se le suele pasar por alto sobre todo porque cuando los osciloscopios y las señales eran analógicos, se asumía que la respuesta en frecuencia sería siempre gaussiana. Un osciloscopio digital puede tener curvas de respuesta en frecuencia máximamente planas, de Chebyshev, de Butterworth, gaussiana u otras, y cada tipo afecta de manera diferente al sobreimpulso y la sobreoscilación que provocan errores en la amplitud y el tiempo de subida. Por lo tanto, es importante entender esta misteriosa especificación.

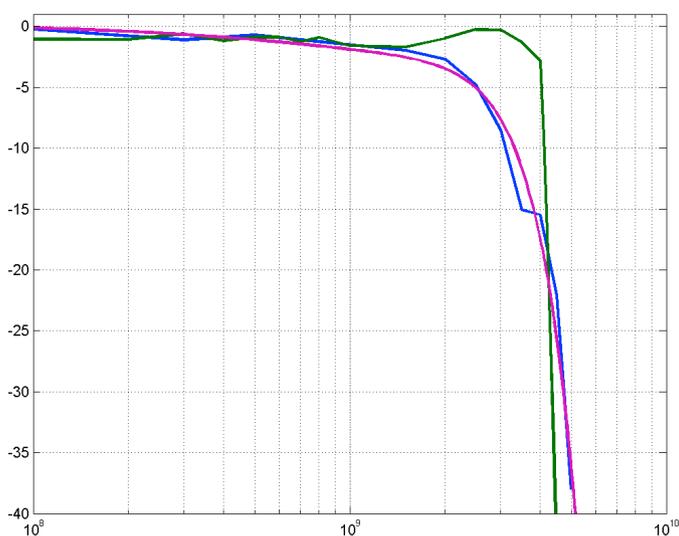


Fig. 9: La curva de respuesta en frecuencia gaussiana del R&S®RTO1024 (azul) y la de un osciloscopio con respuesta máximamente plana (verde), superpuestas sobre una respuesta gaussiana ideal (violeta), muestran hasta qué punto la primera se aproxima a una respuesta ideal.

Todas las señales son una suma de ondas senoidales a diferentes frecuencias y fases que aparecen en el dominio de la frecuencia como líneas espectrales, cada una de ellas ponderada por separado por la respuesta en frecuencia del osciloscopio. Sería ventajoso conocer cómo la respuesta en frecuencia pondera cada componente de la señal, pero el usuario puede solo hacer conjeturas al respecto, ya que la hoja de datos solo indica un ancho de banda de 3 dB y un determinado tiempo de subida.

Cada fabricante tiene su propio ideal para la curva de respuesta en frecuencia. Algunos creen que una respuesta máximamente plana ofrece los mejores resultados, ya que no se desvía hasta llegar a la frecuencia de corte del instrumento, y entonces cae de manera repentina. La gama de frecuencias del instrumento también se puede ampliar para obtener características de pendiente muy nítidas.

La respuesta en frecuencia máximamente plana conlleva importantes sacrificios. Por ejemplo, existen inconvenientes en cuanto a la frecuencia de transición, ya que no hay manera de que una respuesta sea perfectamente plana y que se produzca una transición sin complicaciones en la respuesta a frecuencias más altas. Butterworth, Chebyshev y otros tipos de respuesta también producen algunas irregularidades en la banda pasante, incluso con filtros digitales de última generación.

Rohde&Schwarz cree que la respuesta gaussiana tradicional es la mejor elección entre especificaciones opuestas y proporciona la mejor precisión general y la menor sobreoscilación y sobreimpulso. Tiene la cualidad única de poder implementarse tanto en el dominio de la frecuencia como en el del tiempo, sin oscilaciones en ninguno de los dos. La respuesta en frecuencia del osciloscopio R&S®RTO de 2 GHz con la respuesta máximamente plana de un osciloscopio de 4 GHz (fig. 9) muestra que la respuesta del R&S®RTO tiene una forma gaussiana casi de manual. En la figura 10 se compara la respuesta en escalón de ambos osciloscopios, el sobreimpulso del R&S®RTO es del 1% mientras que el osciloscopio con la respuesta máximamente plana tiene 8% de sobreimpulso. La adopción de la respuesta gaussiana implica el inconveniente de un ancho de banda de 3 dB más estrecho, ya que la respuesta se atenúa de manera gradual. Sin embargo, obtiene la máxima precisión (especialmente en los flancos de señal), elimina la sobreoscilación y presenta un sobreimpulso de menos 1%, muy inferior al promedio de la industria, que alcanza entre el 5 y el 10% o incluso más. La reducción del sobreimpulso (el máximo desvío de amplitud, expresado en porcentaje de la amplitud final) es sumamente importante, ya que de otro modo se oscurecerían las características del dispositivo examinado y sería imposible realizar mediciones precisas de amplitud.

Precisión de ganancia (vertical) y base de tiempo (horizontal)

La precisión de ganancia del osciloscopio determina la exactitud con la que su sistema vertical puede variar la amplitud de la señal de entrada, y la precisión horizontal define la capacidad de su sistema horizontal para visualizar la temporización de la señal.

Resolución vertical del convertidor A/D

La resolución vertical mide la precisión con la que el convertidor A/D convierte voltajes analógicos a bits digitales. Por ejemplo, un convertidor A/D de 8 bits convierte una señal a 256 niveles de voltaje discretos, que se distribuyen en la configuración seleccionada de voltios por división. Con 1 mV/división, el bit menos importante es 39 μ V. Esto se diferencia del número efectivo de bits, ya que no considera las características que no son ideales que están presentes en el convertidor A/D y en el front-end del osciloscopio.

Sensibilidad vertical

La capacidad del amplificador vertical para amplificar una señal se denomina sensibilidad vertical, y suele estar próxima a 1 mV por división vertical de la pantalla. No todos los osciloscopios alcanzan una sensibilidad de 1 mV por división, y muchos compensan este déficit mediante software, lo cual reduce el número efectivo de bits del osciloscopio. Para solucionar este problema también se limita a veces el ancho de banda, especialmente en las configuraciones de bajo voltaje por división.

Pantalla e interfaz de usuario

Mientras que las especificaciones individuales definen el rendimiento del osciloscopio, la pantalla y la interfaz de usuario determinan la facilidad de uso de un osciloscopio y la calidad en la presentación de sus resultados. Los fabricantes de osciloscopios definen características muy similares en lo que respecta a la pantalla, normalmente utilizan una pantalla TFT LCD de alta resolución y a veces con retroiluminación LED. Sin embargo, la interfaz en sí misma varía mucho de un fabricante a otro y está siendo redefinida de manera constante con cada nueva generación de osciloscopios. La facilidad para realizar mediciones, así como también la velocidad y la precisión de su interpretación son factores subjetivos, por lo que es aconsejable evaluar minuciosamente cada instrumento antes de elegir alguno.

Funciones de comunicación

Hoy en día, los osciloscopios digitales tienen una amplia diversidad de interfaces de comunicación, desde las tradicionales GPIB y RS-232 hasta Ethernet y USB. Mientras que antes se utilizaba una unidad CD-RW para transportar los datos, actualmente una simple memoria USB puede hacer el trabajo de manera más fácil; para transferencias más remotas se utiliza la conexión a internet. También permite descargar actualizaciones de firmware, opciones y otras funciones. Ethernet también permite controlar el instrumento, así como transferir datos con una conexión a internet. Además, permite que el osciloscopio sea parte de un sistema ATE más complejo.

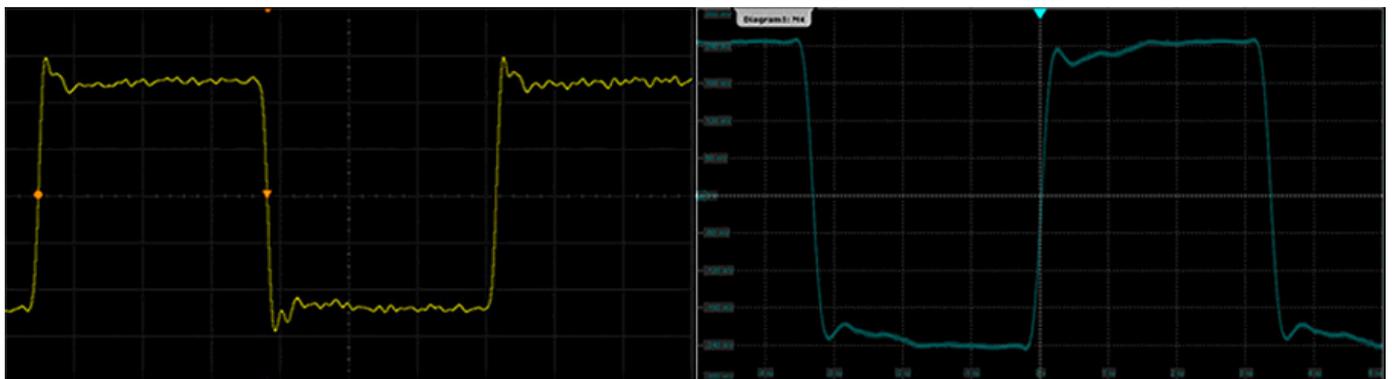


Fig. 10: Las respuestas escalonadas de ambos osciloscopios muestran que el R&S®RTO1024 presenta un sobreimpulso de aprox. el 1%, mientras que su equivalente de respuesta máximamente plana exhibe un sobreimpulso del 8%.

MEDICIONES TÍPICAS CON OSCILOSCOPIO

Ya sea analógico o digital, el osciloscopio es un instrumento de medición versátil. Aunque su función básica sea medir y mostrar voltajes, puede hacer mucho más. Además de las mediciones descritas a continuación, se dispone de muchas más mediciones para aplicaciones específicas con notas de aplicación y otros documentos en internet que las describen ampliamente. Abarcan desde la automatización de las mediciones descritas aquí hasta la detección y el análisis de señales en los sistemas comerciales, de defensa, y muchos otros.

Mediciones de voltaje

La medición básica de voltaje es en realidad solo el paso fundamental que permite la realización de muchos otros cálculos. Por ejemplo, la medición de un voltaje pico a pico (V_{pp}) se utiliza para calcular la diferencia de voltaje entre los puntos bajos y altos una forma de onda. Las mediciones pueden incluso utilizar voltaje eficaz para determinar los niveles de potencia.

Mediciones de desplazamiento de fase

Un osciloscopio proporciona una manera fácil de medir el desplazamiento de fase con una función denominada «modo XY». Esta función toma una señal de entrada en el sistema vertical y otra en el sistema horizontal. El resultado es una curva de Lissajous que nos muestra las frecuencias y fases relativas de los voltajes alternos. La forma permite determinar los desplazamientos de fase y las relaciones de frecuencia entre dos señales.

Mediciones de tiempo

Un osciloscopio puede utilizarse para medir el tiempo en la escala horizontal, lo que es muy útil para evaluar las características de los impulsos. La frecuencia es el inverso multiplicativo del periodo, de modo que, si se conoce el periodo, basta dividir 1 por este periodo para obtener la frecuencia. La claridad de la información visualizada se puede mejorar al ampliar la parte deseada de la señal.

Mediciones de duración de impulso y tiempo de subida

La evaluación de la duración y el tiempo de subida de los impulsos es importante para muchas aplicaciones, ya que sus características cruciales pueden alterarse, lo cual, a su vez, puede provocar la degradación o la falla total de un circuito digital. La duración de un impulso se define como el tiempo requerido para que la forma de onda suba desde el 50% de su voltaje de pico a pico hasta su voltaje máximo y baje de nuevo hasta el nivel inicial. La medición de la duración de un impulso negativo determina el tiempo requerido para que la forma de onda decline desde el 50% de su valor de pico a pico a un punto mínimo. Otro parámetro relacionado con las señales pulsadas es su tiempo de subida, el cual se define como el tiempo requerido para que el impulso pase del 10% al 90% de su voltaje total. Este estándar de la industria asegura que se eliminen las variaciones en los bordes de transición de los impulsos.

Decodificación de buses serie

La decodificación de protocolos serie, como I²C, SPI, UART/RS-232, CAN, LIN y FlexRay™, es otro grupo común de mediciones que suelen realizarse con un osciloscopio. Suelen formar parte de una o varias opciones de software de un osciloscopio que pueden agregarse a voluntad.

Análisis de frecuencia, estadística y funciones matemáticas

Además de las funciones estadísticas como histograma, valor medio o promedio, el usuario puede aplicar funciones matemáticas a las señales medidas. Esto simplifica el análisis de las formas de onda al permitir al usuario mostrar los resultados de una manera comprensible. Combinando y transformando formas de onda originales y otros datos en formas de onda matemáticas, los usuarios pueden obtener la visualización de datos necesaria para una aplicación.

La mayoría de osciloscopios tienen funciones matemáticas para sumar, restar, multiplicar o dividir señales en diferentes canales. Otras funciones matemáticas básicas incluyen la transformada de Fourier, que permite visualizar en la pantalla la composición de frecuencia de la señal, y determinar el valor absoluto para mostrar el valor de voltaje de la forma de onda.

Las operaciones matemáticas, las pruebas de máscara, los histogramas, la visualización del espectro y las mediciones automáticas reducen la potencia de cálculo en software, incrementan el tiempo ciego y ralentizan las respuestas del instrumento. Rohde & Schwarz utiliza su experiencia en hardware de análisis de espectro para implementar estas funciones en el hardware, lo cual, combinado con front-ends de bajo ruido y el elevado número de bits efectivos en el convertidor A/D, ofrece un potente análisis de espectro basado en FFT.

La función FFT es rápida y una elevada velocidad de adquisición permite visualizar el espectro en tiempo real. Gracias a ello se puede ver con claridad los cambios rápidos de señal, las interferencias y las señales débiles superpuestas.

En los instrumentos de la serie R&S®RTO las funciones de prueba de máscara se implementaron también en el hardware a fin de preservar las altas velocidades de adquisición, al tiempo que se registra un gran número de formas de onda, suficiente para producir datos estadísticamente relevantes. Dado que las formas de onda almacenadas están disponibles para el análisis, pueden detectarse los defectos de señal e identificar sus causas de manera rápida y con un alto nivel de confiabilidad.

RESUMEN

Un osciloscopio es un instrumento muy versátil que se utiliza en una amplia variedad de entornos de ingeniería. De modo general, puede afirmarse que, cuanto más eficazmente se implementen los sistemas horizontal y vertical, mayor será la fidelidad de la señal. Además, la flexibilidad de disparo permite al usuario configurar el osciloscopio para la captura de señales que aparecen de manera aleatoria e infrecuente. Una buena sonda o conjunto de sondas es esencial para transferir la señal examinada al sistema de medición.

Como ya hemos comentado, existen numerosas aplicaciones para osciloscopios digitales, y sus fabricantes publican sin falta notas de aplicación y otros documentos que las describen. También existe mucha más información que en algunos casos puede ser útil para los distintos temas que se abordan en este documento. Gracias a ello, una vez adquirido un osciloscopio, uno de los primeros pasos debe ser obtener toda la información posible acerca de las aplicaciones específicas que el usuario prevé abordar.

GLOSARIO

A

Adquisición de valor pico: un modo de adquisición de osciloscopio digital que permite visualizar señales críticas y difíciles de detectar.

Ancho de banda: la gama de frecuencias de un osciloscopio restringida por el punto en el cual su respuesta se reduce por 3 dB (por lo tanto, 3 dB de ancho de banda).

B

Barrido horizontal: el proceso ejecutado por el sistema horizontal del instrumento, que crea la forma de onda visualizable.

Base de tiempo: circuitos del instrumento que controlan los tiempos de barrido.

C

Carga de circuito: la consecuencia de la interacción de la sonda con el dispositivo o el circuito bajo prueba, cuyo grado determina la transparencia de la sonda tanto para el instrumento como para el circuito.

Convertidor de señal analógica a digital (A/D): el dispositivo y el osciloscopio que convierten señales de entrada analógicas a bits digitales, cuya efectividad determina el rendimiento que el osciloscopio puede lograr.

Cuadrícula: las líneas verticales y horizontales que aparecen en la pantalla del osciloscopio.

D

Disparo: el subsistema del osciloscopio que determina cuándo se visualizará el primer evento de una señal.

Disparo único: un evento transitorio captado por el osciloscopio que se produce una sola vez durante el flujo de la señal.

División: líneas verticales y horizontales que aparecen en la pantalla del osciloscopio.

E

Envolvente: los puntos máximo y mínimo de una señal después de que esta haya sido capturada a lo largo de un gran número de repeticiones de forma de onda.

G

Glitch: un evento breve, normalmente transitorio, que se corrige por sí mismo, lo que hace extremadamente difícil eliminar la causa que lo provoca.

M

Modo de

adquisición: el modo en que se crean puntos de una forma de onda a partir de puntos de muestreo. Los modos estándar son el de muestreo, la detección de pico, el de adquisición con alta resolución, el de adquisición de valor promedio y el de adquisición de envolvente.

Muestreo: el proceso de adquisición de muestras discretas de una señal de entrada que a continuación se convierten a formato digital y posteriormente son almacenadas y procesadas por el osciloscopio.

Muestreo en tiempo real: un modo de muestreo que permite capturar un gran número de muestras a partir de un solo disparo.

N

Nivel de

disparo: el nivel de voltaje que la señal de entrada debe alcanzar antes de que se produzca un disparo.

Número efectivo

de bits (ENOB): el número real de bits en un convertidor A/D u osciloscopio digital, uno de los determinantes de la resolución tras convertir una señal analógica al dominio digital. En un convertidor A/D suele ser inferior al número de bits especificado en el instrumento.

O

Osciloscopio

digital: un osciloscopio que convierte una señal de entrada analógica en su representación digital mediante el uso de un convertidor A/D.

Osciloscopio

digital de muestreo: un osciloscopio capaz de analizar señales con frecuencias superiores a su velocidad de muestreo.

Osciloscopio de

señal mixta: un osciloscopio digital provisto de dos o cuatro canales analógicos y 16 canales digitales, que funciona normalmente en combinación con un analizador lógico.

P

Pendiente:

la proporción entre la distancia vertical y la horizontal en la pantalla, que es positiva cuando aumenta desde la parte izquierda hacia la parte derecha de la pantalla y negativa cuando disminuye.

Precisión

de ganancia: la capacidad del sistema vertical del osciloscopio para atenuar o amplificar la señal.

Predisparo:

la capacidad de un osciloscopio digital de adquirir las características de la señal antes y después de la activación de un disparo.

Promediado:

una técnica basada en el procesamiento de señales digitales en un osciloscopio que puede reducir el ruido en la señal y en la pantalla.

Punto de forma

de onda: el voltaje de la señal en un punto del tiempo calculado mediante puntos de muestreo.

Punto de

muestreo: los datos adquiridos por un convertidor A/D que se utilizan para calcular puntos de una forma de onda.

R

Resolución

vertical:

la precisión con la que un convertidor A/D y un osciloscopio pueden convertir una señal de entrada analógica al dominio digital.

Respuesta en

frecuencia:

una trama que muestra el grado de precisión con el que el osciloscopio representa la amplitud de la señal de entrada dentro de una determinada gama de frecuencias. La respuesta ideal es absolutamente plana, pero en la práctica resulta casi imposible de obtener.

Retención de

disparo:

el intervalo mínimo entre disparos, definido por el usuario, que se usa cuando se desea que el disparo se produzca al inicio de una señal y no en un punto arbitrario de la forma de onda.

S

Señal

analógica:

una señal eléctrica continua que varía en amplitud o frecuencia en respuesta a los cambios de voltaje.

Señal digital:

una señal cuya información es una cadena de bits, a diferencia de una señal analógica, que es un rango continuo de voltajes.

Sensibilidad

vertical:

la proporción en la que el amplificador vertical puede amplificar una señal.

Sonda:

dispositivo de entrada al osciloscopio que se conecta con el aparato o circuito examinado.

T

Tiempo de

subida:

el tiempo, entre el 10% y el 90%, necesario para que el flanco ascendente de un impulso aumente desde su valor mínimo hasta su valor máximo.

Transitorio:

también denominado evento de disparo único, es una señal que se produce una sola vez durante la captura de señales.

V

Velocidad de

muestreo:

la frecuencia con la que un osciloscopio digital muestrea la señal, definida en muestras por segundo.

Valor añadido con nuestros servicios

- ▶ Red de alcance internacional
- ▶ Servicio local a medida
- ▶ Personalizado y flexible
- ▶ Calidad incondicional
- ▶ Fiabilidad a largo plazo

Rohde & Schwarz

El grupo tecnológico Rohde&Schwarz es uno de los pioneros en sentar las bases para un mundo más seguro y conectado con sus soluciones innovadoras de prueba y medición, sistemas tecnológicos, redes y ciberseguridad. Fundado hace más de 85 años, es un aliado confiable para clientes de la industria y del gobierno alrededor del mundo. La compañía de propiedad familiar mantiene su sede central en Múnich, Alemania, y cuenta con una extensa red de ventas y servicios con oficinas en más de 70 países.

www.rohde-schwarz.com

Diseño sostenible de productos

- ▶ Compatibilidad ambiental y huella ecológica
- ▶ Eficiencia energética y bajas emisiones
- ▶ Longevidad y costo total de propiedad optimizado

Certified Quality Management

ISO 9001

Certified Environmental Management

ISO 14001

Rohde & Schwarz training

www.rohde-schwarz.com/training

Rohde & Schwarz customer support

www.rohde-schwarz.com/support

