Osciloscopios, mucho más que el ancho de banda

El osciloscopio es, sin duda, la herramienta básica del ingeniero eléctrico, electrónico y de comunicaciones en el análisis de las señales que son la base de la tecnología moderna. Su uso se extiende a prácticamente todos los aspectos de la ciencia en áreas tan alejadas como la medicina o la física de altas energías. Y la razón para ello reside, en todos los casos, en su capacidad de presentar la evolución de cualquier variable física, directamente o mediante transductores adecuados, en función del tiempo

Joan Mercadé, Ingeniero de Aplicaciones de Tektronix Española, S.A

De unos inicios analógicos, donde básicamente era posible la observación cómoda de señales repetitivas y obtener una información estadística más bien cualitativa de las mismas, a la actualidad digital, en la que es posible capturar señales transitorias, realizar medidas sobre las mismas de forma objetiva y repetible y post-procesar los datos capturados digitalmente para obtener toda clase de resultados. Sin embargo, para que todo ello sea efectivo, es necesario capturar la señal original de forma fiel y hacerlo cuando en ella se producen los eventos, conocidos o no, que son interesantes. En un osciloscopio digital, ni aún en los de más altas prestaciones, esta capacidad no está en absoluto garantizada de antemano. A continuación se van a analizar dos de las características más importantes a la hora de satisfacer las necesidades de los usuarios: el ancho de banda y la velocidad de captura.

El ancho de banda

El parámetro históricamente más popular en lo que se refiere a la capacidad de captura y visualización de un osciloscopio es, sin lugar a dudas, el ancho de banda (BW). Como es bien sabido, éste parámetro se refiere a la frecuencia a la cual la amplitud de una señal sinusoidal cae 3 dB (o el 70.7%) respecto a la respuesta en DC. Es necesario, además, ser consciente de que este parámetro no es aplicable en todas las circunstancias, ya que puede variar dependiendo del tipo de conexión a la señal (coaxial o sonda), del factor de deflexión vertical y un largo etcétera. Hablar del ancho de banda a 3dB es, sin embargo, una simplificación de la realidad ya que lo realmente importante es la respuesta en frecuencia. De hecho esta misma no es más que una forma indirecta de medir la fidelidad con la cual un osciloscopio será capaz de capturar y presenta una señal con un determinado ancho de banda. En algunos casos, especialmente en equipos de alta frecuencia, es mucho más útil hablar en el dominio natural de un osciloscopio, el del tiempo. Así se hablará de la respuesta impulsional o, más habitualmente, de la respuesta indicial, o al escalón. De la observación de la misma se pueden obtener parámetros como el tiempo de subida (Ts), las sobreoscilaciones (o "ringing") y otros que dicen mucho más de la calidad del conjunto que simplemente el ancho de banda. Idealmente, la repuesta en frecuencia de un osciloscopio debería ser lineal en fase (retardo de grupo constante) y de primer orden, en particular gaussiana. Con ello se consigue una respuesta indicial con un tiempo de subida acotado y sin aberraciones en la respuesta. En esas circunstancias es posible aplicar la popular fórmula que relaciona de forma biunívoca el ancho de banda con el tiempo de subida, BW x Ts = 0.35. Desviarse de estas condiciones es siempre negativo para cualquier osciloscopio cuyo objetivo sea presentar señales en el dominio del tiempo. En los osciloscopios analógicos, conforme se avanzaba en frecuencia, el bloque más problemático en relación con el ancho de banda era sin duda el tubo de rayos catódicos (CRT). Algunos constructores, con el fin de alcanzar el ancho de

La gama TDS7000B de Tektronix con tecnología DPO, con velocidades de captura de 400,000 Formas de Onda por Segundo, 20 GS/s, y un ancho de banda analógico real de 7GHz, es el máximo exponente de la última generación de osciloscopios digitales.

banda requerido con tubos de prestaciones limitadas, realzaban la respuesta del amplificador a altas frecuencias para compensar las pérdidas. Aunque ello, a primera vista, puede parecer aceptable, resultaba en aberraciones en la respuesta al impulso. La razón es que la acentuación de la respuesta en frecuencia en la banda alta de la respuesta viene acompañada de una caída más rápida más allá de la zona realzada. El resultado es una desviación de la respuesta ideal de primer orden y la aparición de aberraciones. En los modernos osciloscopios digitales de altas prestaciones, la limitación en el ancho de banda se ha desplazado al bloque amplificador, ya que los convertidores ADC, con velocidades de muestreo de hasta 20 GMuestras/s (GS/s), son más que suficientes, siempre que tengan la calidad adecuada y que la señal se reconstruya como es debido, para alcanzar los anchos de banda analógicos ofrecidos, incluso en disparo único.

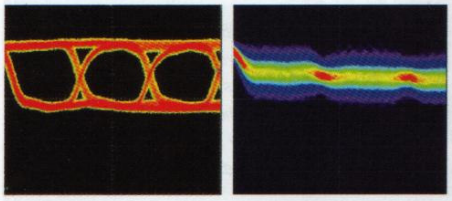
Es curioso observar como la mayor parte de fabricantes de osciloscopios de alta frecuencia (hoy en día los de más de 3 GHz de ancho de banda) no alcanzan ese ancho de banda en el amplificador de entrada. ¿ Cómo se consigue, pues, alcanzar el ancho de banda especificado? La respuesta es el realce digital (o DSP) de la respuesta en frecuencia sobre las muestras capturadas mediante post-proceso. Lo que en principio parece y puede ser una idea brillante para alcanzar prestaciones superiores se convierte, sin embargo, en una trampa para los usuarios, sobre todo si no son conscientes de ese hecho y de las consecuencias que conlleva. Estos son algunos de los efectos a tener en cuenta:

- **Empeoramiento de la respuesta en frecuencia**: De forma similar a lo expuesto anteriormente para los osciloscopios analógicos, el realce en frecuencia en una banda conlleva una caída más rápida más allá de la misma. En un osciloscopio digital ello es aún más necesario ya que si se mantiene un realce digital (p.e. para forzar una respuesta de primer orden) más allá de la frecuencia de corte, el resultado es la amplificación del ruido de cuantización y conversión, que no está afectado por la caída en la respuesta del amplificador, y la acentuación del aliasing. Como consecuencia la respuesta al impulso queda degradada tanto en lo que se refiere al tiempo de subida como a la existencia de aberraciones en la respuesta. Alejarse de la respuesta de primer orden nunca es beneficioso para la fidelidad de la señal.
- **Disminución de los bits efectivos**: Una forma de medir la calidad de un proceso de conversión analógico a digital es compararlo con los resultados obtenidos con un ADC ideal. Es posible hacer la abstracción que un ADC real de un número de bits determinado se comporta como uno ideal con un número de bits menor. Ese parámetro se conoce como bits efectivos y es una función de la velocidad de muestreo. El empleo de realce digital conlleva el empleo de señales analógicas atenuadas a la entrada del ADC. Por ello y de forma intrínseca se produce una degradación en los bits efectivos al emplearse un menor número de niveles de cuantización (o menos bits) para obtener una muestra.
- **Inconsistencia de la respuesta en frecuencia**: Como el post-proceso digital se produce sobre las muestras adquiridas y la capacidad de realzar una determinada banda depende de la velocidad de muestreo de entrada, que a su vez está determinada por la base de tiempos, el resultado es que la amplitud de las señales varía dependiendo de la base de tiempos empleada.
- **Incompatibilidad con ciertos modos de captura y análisis**: El empleo de técnicas de realce digital requiere que las muestras procesadas ocupen posiciones temporales contiguas. Ello sólo se produce en capturas en tiempo real o en capturas en tiempo equivalente sobre señales perfectamente repetitivas en todos los canales. Por esta misma razón el empleo de esta técnica es imposible en situaciones tan populares como la obtención de diagramas de ojo de alta resolución, tan importante en el análisis de calidad de señales de comunicaciones o de buses de alta velocidad, precisamente las aplicaciones más extendidas de este tipo de osciloscopios.

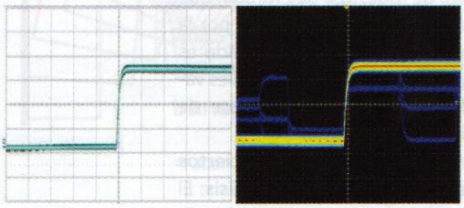
En definitiva, existen muchos anchos de banda y muchas formas de conseguirlos. Conocer las verdaderas capacidades y limitaciones de cualquier osciloscopio es el primer paso para un uso adecuado y la correcta interpretación de las imágenes y los resultados obtenidos.

La velocidad de captura

Si el apartado anterior ha estado centrado en la calidad de las capturas, éste lo va estar en la cantidad. Las señales existen de



A la izquierda puede verse una captura con un osciloscopio sin realce DSP del ancho de banda y a derecha uno que utiliza esta técnica. El diagrama de ojo es destruido por el proceso de mejora del ancho de banda al ser aplicado sobre muestras que no son consecutivas en el tiempo.



A la izquierda puede verse el resultado de acumular capturas en un osciloscopio con tecnología APO durante una hora, a la derecha la misma señal en un osciloscopio con tecnología DPO durante 30 segundos. Las anomalías en la señal son invisibles en el osciloscopio APO.

forma continua, aunque sea en un periodo de tiempo limitado. El osciloscopio es la herramienta que permite la observación de la evolución de las señales en el dominio del tiempo. Lo ideal, por tanto, sería que un osciloscopio observase las señales durante la totalidad del tiempo de estudio de las mismas. Los osciloscopios reales, no obstante, sólo observan la realidad durante una fracción del tiempo. En los osciloscopios analógicos, el tiempo de observación está limitado por el retorno del trazo, el tiempo de retención (hold-off) y, naturalmente, la espera necesaria para la aparición de un nuevo evento de disparo. Dado que la suma de estos tiempos puede ser del orden de unos pocos microsegundos, las velocidades de captura de los osciloscopios analógicos puede llegar a ser de unos pocos centenares de miles por segundo. El porcentaje del tiempo observado está muy influenciado por la velocidad de barrido pero puede ser realmente alto. De todas formas las limitaciones en la luminosidad disponible hace virtualmente imposible la observación de señales poco frecuentes, no repetitivas o en disparo único, sobre todo de las de alta frecuencia que requieren, por tanto, de velocidades de barrido elevadas.

Los osciloscopios digitales nacieron, en parte, para acabar con esta limitación. En un osciloscopio digital la captura y visualización de una señal no repetitiva no están en principio limitadas.

Mitigar anomalías

El ciclo captura-procesado-presentación que conlleva la arquitectura clásica de un osciloscopio digital es el factor que limita la velocidad de captura de éstos. Los equipos modernos son capaces de presentar alrededor de las 100 formas de onda por segundo en su modo normal de captura. Para una velocidad de barrido de 1 uS/div el porcentaje de señal visualizado es del 0.1%. Para una velocidad de barrido de 1 nS/div, más acorde con la observación de señales de algunos GHz, el porcentaje es de 0.0001%, o 1 ppm. Como resultado de todo ello, la capacidad de detección de eventos infrecuentes y la validez de cualquier análisis estadístico, como por ejemplo las representaciones de formas de onda con escalas de brillo, se encuentran severamente limitados en los DSO de arquitectura tradicional. Por ejemplo, el tiempo medio para observar una señal anómala que se produce a una media de una vez por segundo es, en estas circunstancias, de un millón de segundos o más de once días. Para mitigar en lo posible el impacto de esta limitación se han empleado diversas técnicas con una suerte muy diversa. Las más importantes son las siguientes:

- **Empleo de memorias de captura extremadamente largas**: Esta estrategia se basa en la reducción relativa del tiempo muerto al hacer la ventana de adquisición más grande. Esta estrategia es del todo inútil en primer lugar porque el tiempo de proceso es en parte proporcional al número de muestras adquirido, por lo que la reducción relativa del tiempo muerto es mucho menor de la esperada. De todas formas no es ésta la limitación fundamental de este método, ya que si el objetivo es visualizar y analizar eventos infrecuentes, es necesario, tras cada adquisición buscar ese evento en la captura. Dado que en la pantalla de un osciloscopio es posible observar visualmente menos de 1000 puntos, la conclusión es que el tiempo muerto entre capturas puede ser de decenas de minutos al tener que recorrer pacientemente cientos de pantallas. El empleo de memorias masivas es interesante en la captura de transitorios largos o para poder disponer de una capacidad elevada de visualización de la señal previa al disparo (pre-trigger), nunca para el incremento de la capacidad de visualización continua de la señal.
- **Modos de captura secuenciales y persistencia analógica (APO)**: Una estrategia más inteligente consiste en la segmentación de la memoria disponible en decenas, cientos o miles de segmentos o tramas donde la señal puede ser capturada con tiempos muertos pequeños ya que no es necesario esperar el tiempo requerido para el proceso y la presentación. Ello permite velocidades de disparo instantáneas muy elevadas (100,000 a 200,000 disparos por segundo en equipos modernos). Las señales así capturadas pueden presentarse después de forma superpuesta o in-

Disponer de una ancho de banda y una velocidad de muestreo adecuados no garantiza que un osciloscopio resuelva los problemas a los que los ingenieros se enfrentan

dividual. A partir de esta información es posible incluso la confección de representaciones estadísticas en escalas de brillo. Este es el modo de trabajo APO (Analog Persistence Oscilloscope) de algunos osciloscopios digitales del mercado. De todas formas la velocidad de captura continuada que permite este método es de alrededor de mil formas de onda por segundo, debido al largo tiempo de proceso y presentación necesario para dar cuenta de la totalidad de la información contenida. En el ejemplo que se ha empleado anteriormente, el tiempo de espera medio quedaría reducido a más de un día. Los modos APO o de secuencia son útiles para el análisis estadístico (eso sí, limitado) y para la captura individualizada secuencial de eventos, pero no solucionan en absoluto el problema de la velocidad de captura.

- **Modo de captura DPO (Digital Phosphor Oscilloscope):** La conclusión que se puede extraer es que conservando totalmente o en parte la arquitectura tradicional de un DSO, tal como se hace en los métodos anteriormente expuestos, es imposible alcanzar velocidades de captura ni siquiera cercanas a las de un osciloscopio analógico. Hace algunos años Tektronix introdujo en el mercado los primeros osciloscopios digitales con velocidades de captura sostenidas de 400,000 formas de onda por segundo, de hecho mayores que las conseguidas por cualquier osciloscopio analógico en el pasado. Para conseguir este hito fue precisa la creación de una nueva arquitectura de osciloscopio digital sin perder por ello la capacidad de captura tradicional, la arquitectura DPO (Digital Phosphor Oscilloscope, Osciloscopio de Fósforo Digital)), exclusiva de Tektronix. El modo de captura DPO se basa, tal como indica su nombre, en la creación de una pantalla de fósforo virtual con medios digitales.

Para ello se requiere de procesadores especializados (los DPX) que son capaces de realizar la labor de rasterización en tiempo real, sin post-proceso. En este esquema cada muestra en lugar de ser almacenada en una memoria secuencial de captura, es posicionada en un mapa de bits que representa la pantalla del osciloscopio, el así llamado fósforo digital. Cada píxel de este mapa está representado por un contador que se incrementa cada vez que una muestra incide en ese punto. Cada 1/60 segundos se extrae esta información, compuesta por más de 6000 formas de onda, y se presenta en la pantalla del osciloscopio, que se limita a interpretar la base de datos tridimensional como una imagen en escala de grises o colores. El resultado es una velocidad de captura sostenida de más de 400,000 formas de onda por segundo, con todas las ventajas de un osciloscopio analógico (velocidad de captura, información en escala de grises) pero sin sus inconvenientes, ya que la luminosidad de las formas de onda puede fijarse de forma arbitraria.

Otra ventaja importante de este método es que la base de datos tridimensional ofrece una información estadística con una muy alta población que facilita y acorta enormemente la evaluación de parámetros como el jitter o el ruido y la obtención de diagramas de ojo, sobre los cuales es posible, por fin, realizar ajustes interactivos. La información de brillo deja de ser cualitativa ya que se compone de números objetivos de total validez estadística. El modo de captura DPO es el único método que permite visualizar de forma rápida y fiable eventos infrecuentes y desconocidos. A partir de esa visualización es cuando es posible definir disparos avanzados que los aíslen, haciendo posible su captura y análisis mediante métodos tradicionales. En el ejemplo anteriormente expuesto, el tiempo de intercepción de la anomalía se reduce ahora a unos segundos.

En definitiva, disponer de una ancho de banda y una velocidad de muestreo adecuados no garantiza en absoluto que un osciloscopio resuelva realmente los problemas de medida a los que los ingenieros se enfrentan. La fidelidad de la señal y la capacidad de captura son, de hecho, los parámetros más críticos para la depuración de los problemas de los circuitos digitales ultrarrápidos de la actualidad. Aplicación ésta que es la causa última de la demanda y la aparición de los osciloscopios de alta frecuencia (>1GHz).

Referencias:

Nota de Aplicación: "DPOs Deliver More Signal Information for Faster Design and Troubleshooting Answers", Tektronix. Nº 55W-16965-0. Disponible en ww.tek.com.

Nota de Aplicación: "Triggering: The Key to Fast Answers in Compliance Measurements and Troubleshooting", Tektronix. Nº 55W-16964-0. Disponible en ww.tek.com.

Nota de Aplicación: "Bandwidth and the Influence of Digital Signal Processing", Tektronix. Disponible bajo demanda.

Tabla osciloscopios digitales

Fabricante	Modelo	Canales	Ancho de banda digital	Velocidad de muestreo en tiempo real	Interfaz	Memoria	Resolución	Tamaño cm	Peso	Comentarios
Fluke	123	2	20MHz	25 MS/s	SI	SI		23,2x11,5x5,0	1,2 kg	Mantenimiento industrial
Fluke	124	2	40MHz	25 MS/s	SI	SI		23,2x11,5x5,0	1,2 kg	Mantenimiento industrial
Fluke	192B	2+ canal externo	60MHz	500 MS/s	SI	SI		25,6x16,9x6,4	2 kg	Mantenimiento industrial Eléctrico
Fluke	196B	2+canal externo	100MHz	1GS/s	SI	SI		25,6x16,9x6,4	2 kg	Mantenimiento industrial Eléctrico
Fluke	199B	2+canal externo	200MHz	2,5 GS/s	SI	SI		25,6x16,9x6,4	2 kg	Mantenimiento industrial Eléctrico
Fluke	196C	2+canal externo	100MHz	1GS/s	SI	SI		25,6x16,9x6,4	2 kg	Mantenimiento industrial Eléctrico
Fluke	199C	2+canal externo	200MHz	2,5 GS/s	SI	SI		25,6x16,9x6,4	2 kg	Mantenimiento industrial Eléctrico
Fluke	196BM	2+canal externo	100MHz	1GS/s	SI	SI		25,6x16,9x6,4	2 kg	Electromedicina
Fluke	196CM	2+canal externo	100MHz	1GS/s	SI	SI		25,6x16,9x6,4	2 kg	Electromedicina
Fluke	199BM	2+canal externo	200MHz	2,5 GS/s	SI	SI		25,6x16,9x6,4	2 kg	Electromedicina
Fluke	199CM	2+canal externo	200MHz	2,5 GS/s	SI	SI		25,6x16,9x6,4	2 kg	Electromedicina
Tektronix	TDS1002	2	60 MHz	1000 MS/S	R,G,C,M	2,5	8	32x15x12	2 kg	Mono
Tektronix	TDS1012	2	100 MHz	1000 MS/S	R,G,C,M	2,5	8	32x15x12	2 kg	Mono
Tektronix	TDS2002	2	60 MHz	1000 MS/S	R,G,C,M	2,5	8	32x15x12	2 kg	Color
Tektronix	TDS2012	2	100 MHz	1000 MS/S	R,G,C,M	2,5	8	32x15x12	2 kg	Color
Tektronix	TDS2014	4	100 MHz	1000 MS/S	R,G,C,M	2,5	8	32x15x12	2 kg	Color
Tektronix	TDS2022	2	200 MHz	1000 MS/S	R,G,C,M	2,5	8	32x15x12	2 kg	Color
Tektronix	TDS2024	4	200 MHz	1000 MS/S	R,G,C,M	2,5	8	32x15x12	2 kg	Color
Tektronix	TDS3012B	2	100 MHz	1250 MS/S	R,G,C,E	10	9	37x15x15	3,2 kg	DPO; Baterías
Tektronix	TDS3014B	4	100 MHz	1250 MS/S	R,G,C,E	10	9	37x15x15	3,2 kg	DPO; Baterías
Tektronix	TDS3032B	4	300 MHz	2500 MS/S	R,G,C,E	10	9	37x15x15	3,2 kg	DPO; Baterías
Tektronix	TDS3034B	4	300 MHz	2500 MS/S	R,G,C,E	10	9	37x15x15	3,2 kg	DPO; Baterías
Tektronix	TDS3052B	2	500 MHz	5000 MS/S	R,G,C,E	10	9	37x15x15	10 kg	DPO; Baterías
Tektronix	TDS3054B	4	500 MHz	5000 MS/S	R,G,C,E	10	9	37x15x15	10 kg	DPO; Baterías
Tektronix	TDS5032	2	350 MHz	5000 MS/S	R,G,C,E	8000	8	28x44x28	10 kg	WIndows, DPO; 100KW/s
Tektronix	TDS5034	2	350 MHz	5000 MS/S	R,G,C,E	8000	8	28x44x28	10 kg	WIndows, DPO; 100KW/s
Tektronix	TDS5052	2	500 MHz	5000 MS/S	R,G,C,E	8000	8	28x44x28	10 kg	WIndows, DPO; 100KW/s
Tektronix	TDS5154	4	1000 MHz	5000 MS/S	R,G,C,E	8000	8	28x44x28	18 kg	WIndows, DPO; 100KW/s
Tektronix	TDS6404	4	4000 MHz	20000 MS/S	R,G,C,E	250	8	45x27x42	18 kg	WIndows, DPO; 100KW/s
Tektronix	TDS7054	4	500 MHz	50000 MS/S	R,G,C,E	16000	8	45x27x42	19 kg	WIndows, Jitter, HS Digital
Tektronix	TDS7104	4	100 MHz	10000 MS/S	R,G,C,E	16000	8	45x27x42	19 kg	WIndows, Jitter, HS Digital
Tektronix	TDS7154B	4	1500 MHz	20000 MS/S	R,G,C,E	64000	8	45x27x42	19 kg	WIndows, DPO; 400KW/s
Tektronix	TDS7254B	4	2500 MHz	20000 MS/S	R,G,C,E	64000	8	45x27x42	19 kg	WIndows, DPO; 400KW/s
Tektronix	TDS7404B	4	4000 MHz	20000 MS/S	R,G,C,E	64000	8	45x27x42	19 kg	WIndows, DPO; 400KW/s
Tektronix	TDS7704B	4	7000 MHz	20000 MS/S	R,G,C,E	64000	8	45x27x42	19 kg	WIndows, DPO; 400KW/s
Tektronix	CSA7154B	4+optico	1500 MHz	20000 MS/S	R,G,C,E	32000	8	45x27x42	20 kg	WIndows, DPO; 400KW/s
Tektronix	CSA7404B	4+optico	4000 MHz	20000 MS/S	R,G,C,E	64000	8	45x27x42	20 kg	WIndows, DPO; 400KW/s
Tektronix	THS720A	2+DMM	100 MHz	500 MS/S	R	2,5	8	17x21x5	1,5 kg	WIndows, DPO; 400KW/s
Tektronix	THS720P	2+DMM	100 MHz	500 MS/S	R	2,5	8	17x21x5	1,5 kg	WIndows, DPO; 400KW/s
Tektronix	THS730A	2+DMM	200 MHz	1000 MS/S	R	2,5	8	17x21x5	1,5 kg	WIndows, DPO; 400KW/s
Tektronix	TDS8000B	8/2 opticos	70000 MHz	0,2 MS/S	R,G,C,E	4	14	45x34x42	19 kg	WIndows, DPO; 400KW/s
Tektronix	CSA8000B	8/2 opticos	70000 MHz	0,2 MS/S	R,G,C,E	4	14	45x34x42	19 kg	WIndows, DPO; 400KW/s
Aries Ingeniería y Sistemas	Gage CS14100C	2	50 MHz	100 M/s			14			
Aries Ingeniería y Sistemas	Gage CS85GC	2	500 MHz	5 GS/s			8			
Aries Ingeniería y Sistemas	Gage CS82GC	2	400 MHz	2 GS/s			8			
Aries Ingeniería y Sistemas	Gage CS12100	2	50 MHz	100 M/s			12			
Aries Ingeniería y Sistemas	Gage	2	25 MHz	50 MS/s			12			