

# Ventajas e inconvenientes del filtrado de formas de onda por DSP en osciloscopios

Por Johnnie Hancock  
Agilent Technologies

Todos los osciloscopios de muestreo en tiempo real de alta velocidad que existen actualmente aplican distintas formas de procesamiento digital de señales (DSP) a las formas de onda digitalizadas. A algunos ingenieros les preocupa que el filtrado por software de los datos digitalizados pueda alterar la auténtica naturaleza de la señal capturada. Sin embargo, la forma de onda capturada no es más que una representación de la señal de entrada real y los datos digitalizados, tal y como los captura el osciloscopio, el cual presenta de por sí ciertas alteraciones y distorsiones ocasionadas por la primera etapa de filtrado del hardware del osciloscopio. Lo ideal sería que los osciloscopios tuvieran una frecuencia de muestreo infinita, una respuesta en frecuencia perfectamente plana, una respuesta lineal en fase, ningún ruido y un ancho de banda ilimitado. Pero, en la práctica, tienen limitaciones de hardware que provocan errores. Precisamente, el filtrado por DSP puede llegar a corregir esos errores inducidos por el hardware y, de este modo, mejorar la exactitud de las medidas y la calidad de las representaciones en pantalla.

Los métodos de filtrado por DSP que se utilizan habitualmente en los osciloscopios en tiempo real de alto rendimiento presentan cinco características diferentes (ver cuadro 1)

Cuadro 1

Filtrado por DSP	Efecto que corrige
Reconstrucción de la forma de onda	Frecuencia de muestreo limitada
Aplanamiento del módulo	No planicidad de la respuesta en frecuencia
Corrección de fase	No linealidad de la respuesta en fase
Reducción de ruido	Nivel base de ruido del instrumento
Mejora del ancho de banda	Limitación de ancho de banda

Figura 1. Comparación entre la reconstrucción lineal y por  $\sin(x)/x$

En los osciloscopios de muestreo en tiempo real, cada una de estas características de filtrado puede implementarse mediante un filtro FIR (respuesta al impulso finita) por

software. Este artículo explica para qué sirven las diferentes características de los filtros DSP, y describe las ventajas y posibles compromisos que plantea cada una. No se ofrece información acerca de la implementación de software concreta de los distintos filtros por DSP.

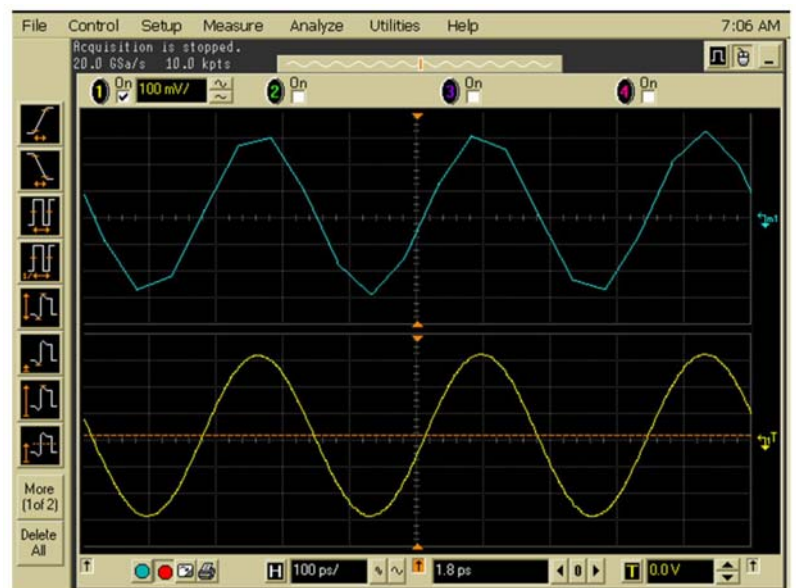
## Filtrado por reconstrucción de la forma de onda

El objetivo de la técnica de filtrado por reconstrucción de la forma de onda es "rellenar" el registro de datos de forma de onda entre los puntos de datos discretos y equidistantes que se capturan en tiempo real. El rellenado de los puntos de datos mejora tanto la precisión de las medidas como la visibilidad de las formas de onda digitalizadas en intervalos de base de tiempos más rápidas. El muestreo repetitivo o por equivalencia temporal puede emplearse para rellenar los datos que faltan pero, en las aplicaciones en tiempo real la técnica de muestreo repetitivo no es una opción. La forma de onda debe capturarse en una sola pasada, por lo que la única posibilidad que queda es el filtrado con

reconstrucción de la forma de onda por software.

El tipo más sencillo de reconstrucción de la forma de onda utiliza un filtro de interpolación lineal. Aunque este tipo de filtro mejora la resolución de la medida, su precisión y la calidad de visualización, el filtrado reconstructivo con la función  $\sin(x)/x$  es más preciso, debido a la simetría del filtro. La figura 1 muestra un ejemplo de onda senoidal de 3 GHz capturada y filtrada mediante reconstrucción lineal (traza superior/azul) y con reconstrucción  $\sin(x)/x$  (traza inferior/amarilla). Con este tipo de reconstrucción, podemos advertir con claridad los puntos discretos equidistantes 50 ps generados por este osciloscopio de 20 GM/s.

El filtrado mediante la función  $\sin(x)/x$  permite conseguir en casi todos los casos una representación más precisa de la señal de entrada, con algunas salvedades. En primer lugar, para que el filtrado por reconstrucción mediante  $\sin(x)/x$  sea absolutamente preciso, la señal de entrada digitalizada no debe presentar ningún componente a frecuencias superiores a la de Nyquist ( $f_N$ ). La frecuencia de Nyquist se define como  $\frac{1}{2}$  de la frecuencia de muestreo ( $f_S$ ).



Para un osciloscopio capaz de muestrear a 20 GM/s, la frecuencia de Nyquist es 10 GHz. Para conseguir el máximo ancho de banda y garantizar al mismo tiempo que no llegue a muestrearse nunca ningún componente de frecuencia por encima de los 10 GHz, en teoría el osciloscopio debería poseer un filtro hardware con respuesta perfectamente abrupta a 10 GHz como máximo. Lamentablemente, este tipo de filtros ideales son irrealizables por hardware. La traza roja (superior) de la figura 2 representa las características de un filtro con respuesta ideal ("filtro de pared"): todos los componentes de frecuencia por debajo de la de Nyquist atraviesan perfectamente el filtro, mientras que todos los de frecuencias superiores a la de Nyquist se eliminan perfectamente.

("aliasing"). Si una señal digitalizada presenta un fuerte efecto de "aliasing" en el caso en que la frecuencia de entrada fundamental es superior a la frecuencia de Nyquist, la forma de onda mostrada parecerá no haberse disparado cuando se estén visualizando capturas de datos repetitivas en tiempo real, y las medidas de los puntos digitalizados pueden presentar errores de varios órdenes de magnitud. Cuando la frecuencia de entrada fundamental de la señal de entrada está por debajo de la frecuencia de Nyquist, pero existen armónicos de esa señal por encima de dicha frecuencia de Nyquist, puede observarse en la pantalla del osciloscopio una forma de onda con flancos "ondulantes". Por este motivo, Agilent Technologies ha limitado tradicionalmente el ancho de banda de

roll-off del hardware empieza a aproximarse a un filtro perfecto teórico. En la mayoría de los tipos de medidas que se realizan con un osciloscopio, esta característica resulta deseable. Este tipo de filtro hardware, denominado filtro máximo plano de orden superior, aparece representado en la figura 2 con la traza azul (central). Con este tipo de filtro por hardware, la mayoría de las frecuencias pertenecientes a la banda de paso atraviesan el filtro con una atenuación mínima, mientras que la mayoría de las frecuencias ajenas a la banda se ven atenuadas considerablemente. Con una respuesta máxima plana de orden superior, el ancho de banda del osciloscopio puede comenzar a aproximarse al límite de Nyquist. Agilent recomienda que, en los osciloscopios con respuesta máxima plana de orden superior, el ancho de banda del osciloscopio esté limitado a un máximo de 0,4 veces la frecuencia de muestreo. En otras palabras, para que la reconstrucción de una forma de onda mediante filtrado con función  $\text{sen}(x)/x$  resulte precisa y eficaz, el ancho de banda de un osciloscopio que muestree a 20 GM/s no debe superar los 8 GHz.

¿Cuáles son los inconvenientes que plantea el uso de un filtro de reconstrucción por software de la función  $\text{sen}(x)/x$  en un osciloscopio? Prácticamente ninguno si la señal de entrada está limitada en banda desde el principio, o si el hardware del osciloscopio es capaz de limitar correctamente los componentes frecuenciales muestreados por encima de la frecuencia de Nyquist. Pero si la señal de entrada presenta componentes de alta frecuencia considerables más allá del límite de ancho de banda del sistema, un efecto indeseable del filtrado por  $\text{sen}(x)/x$  es que pueden aparecer en la forma de onda reconstruida puntos de preoscilación (preshoot) o de sobreoscilación (overshoot). Este efecto es básicamente un fenómeno de Gibbs. La sobreoscilación provocada por software queda

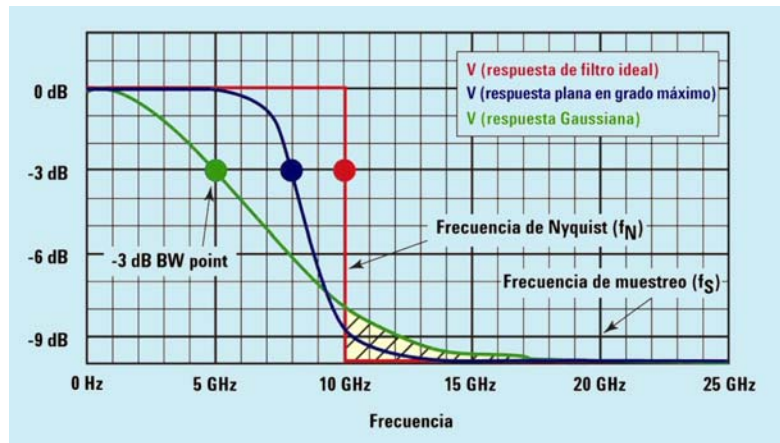


Figura 2. Respuestas de distintos filtros hardware

En el pasado, los osciloscopios de menor ancho de banda solían presentar características de atenuación en frecuencia de tipo Gaussiano, como muestra la traza verde (inferior) de la figura 2. Cuando se están digitalizando señales muy rápidas con esta característica de roll-off lenta, lo normal es que existan bastantes componentes de la señal por encima del punto de ancho de banda de -3 dB. Los componentes de frecuencia por encima de la frecuencia de Nyquist (representados en este gráfico por el área rayada) resultarán falseados

los osciloscopios en tiempo real en los modelos de menor ancho de banda que presentan características de atenuación (roll-off) de tipo Gaussiano a  $1/4$  de la frecuencia de muestreo, que corresponde a  $1/2$  de la frecuencia de Nyquist. Con ello se limita considerablemente la energía capturada de las señales con contenido armónico por encima de la frecuencia de Nyquist.

En algunos de los osciloscopios en tiempo real más modernos y con mayor ancho de banda, de entre 2 GHz y 6 GHz, la característica de

enmascarada a menudo por la sobreoscilación inherente a la propia señal de entrada, y por la que introduce el propio hardware de filtrado del osciloscopio. Como la preoscilación no suele estar presente en la señal, los usuarios de osciloscopios a menudo se cuestionan la validez del filtrado por  $\text{sen}(x)/x$ . Pero los errores inducidos por software, como la preoscilación, son nimios si los comparamos con los inducidos por hardware no corregidos, que aparecen al medir señales fuera de banda.

No hay que olvidar que medir una señal fuera de banda significa únicamente que se está intentando capturar una señal que presenta componentes de frecuencia situados por encima del ancho de banda especificado del osciloscopio. Y eso implica que los resultados medidos pueden incluir componentes de error considerables, debidos a las limitaciones del hardware. Por ejemplo, si se intenta medir una señal de entrada con una velocidad de flanco de 20 ps (del 10% al 90%), un osciloscopio de 6 GHz presentará velocidades de flanco medidas del orden de los 70 ps, lo que significa un error del 250 por ciento. Aunque en apariencia los fenómenos de preoscilación y sobreoscilación provocados por el filtrado por software puedan parecer alarmantes, en realidad estas fuentes de error apenas tienen importancia en comparación con los errores de sobreoscilación y de velocidad de flanco debidos al hardware, a los que a menudo no se presta ninguna atención.

Para reducir el efecto de preoscilación inducido por el software, los diseñadores de osciloscopios pueden aplicar filtrado por reconstrucción de  $\text{sen}(x)/x$  sin corrección de fase a la forma de onda fuera de banda capturada. Aunque la forma de onda filtrada resultante, que presentará bastante sobreoscilación pero muy poca preoscilación, pueda parecer más aceptable, la exactitud de las medidas de amplitud y de velocidad de

flanco se verá degradada. Un filtrado por DSP adecuado con corrección de fase lineal producirá las medidas más precisas con flancos de subida y de bajada rápidos. (La técnica de filtrado con corrección de fase se describirá con más detalle más adelante).

Lo mejor es procurar pasar por alto el fenómeno de la preoscilación y considerar este "culebreo" antiintuitivo que aparece al principio de los pulsos de subida rápida como un signo de que el osciloscopio en tiempo real está utilizando un filtro por DSP que representa con más precisión las características globales de la señal de entrada fuera de banda. También puede considerarse como un indicio de que el osciloscopio en tiempo real se está empezando a utilizar más allá de los valores límite de medida de ancho de banda para los que está diseñado. En tal caso, quizás resulte conveniente plantearse el uso de un osciloscopio de muestreo de mayor ancho de banda, como el 86100C de Agilent, para la aplicación de medida. Si el muestreo repetitivo no resulta factible, tal vez no haya más remedio que aceptar que los resultados de las medidas en tiempo real son los mejores que pueden obtenerse con la tecnología de filtrado y muestreo en tiempo real disponible hoy en día.

Como indicábamos con anterioridad, el sistema de filtrado por DSP con  $\text{sen}(x)/x$  mejora considerablemente la resolución de las medidas y su precisión, situándola muy por encima del intervalo de muestreo en tiempo real (1/frecuencia de muestreo). Con el osciloscopio en tiempo real de 20 GM/s 54855A de Agilent, es posible mejorar la precisión de las medidas de tiempo incrementales hasta  $\pm 7$  ps (de pico) utilizando la técnica de filtrado  $\text{sen}(x)/x$  en capturas en una sola pasada. En algunos casos, la utilización del filtrado  $\text{sen}(x)/x$  reduce ligeramente la rapidez de las medidas. En otras palabras, la intervención del filtro ralentiza la actualización de la pantalla del

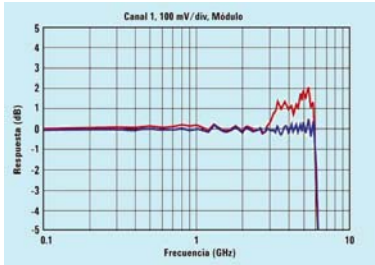
osciloscopio. Sin embargo, por lo general la mayor precisión que se consigue con el filtrado  $\text{sen}(x)/x$  compensa sobradamente todos sus inconvenientes.

Todos los osciloscopios actuales en tiempo real permiten decidir si se utiliza o no el filtrado  $\text{sen}(x)/x$ . Este modo de funcionamiento está seleccionado por defecto en los osciloscopios de Agilent, pero esta selección puede anularse si se prefiere.

### Filtrado por aplanamiento del módulo

El objetivo del filtrado por aplanamiento del módulo es corregir la falta de planicidad de la respuesta en frecuencia debida a las características del hardware del osciloscopio. Lo ideal sería que el hardware de los osciloscopios tuviera una respuesta en frecuencia perfectamente plana en todo el intervalo que llega hasta la banda de atenuación característica del equipo, como muestran las trazas de la figura 2. Eso significa que, si medimos una onda senoidal con amplitud constante, pero variamos la frecuencia, mediremos siempre la misma amplitud hasta alcanzar las frecuencias superiores de corte. Lamentablemente, a medida que nos acercamos al límite de ancho de banda de un osciloscopio, la planicidad de la respuesta en frecuencia tiende a empeorar. A menudo se combinan efectos de atenuación inducida por el hardware y picos a determinadas frecuencias.

De hecho, los ingenieros de diseño de osciloscopios suelen inducir intencionadamente efectos de pico en la respuesta en frecuencia del hardware del osciloscopio en las proximidades del límite de ancho de banda, con el fin de compensar los efectos menores de atenuación dependientes de la frecuencia y hacer llegar la respuesta en frecuencia del osciloscopio hasta un ancho de banda mayor.



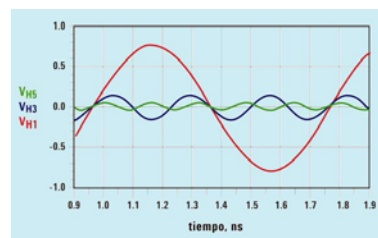
La traza roja (superior) de la figura 3 muestra un ejemplo típico de respuesta en frecuencia analógica del hardware de un osciloscopio en tiempo real de 6 GHz 54855A de Agilent. Como puede observarse, la respuesta del hardware de este osciloscopio cumple el criterio de ancho de banda a  $-3$  dB de 6 GHz, pero la respuesta muestra también un pico de aproximadamente  $+1$  dB a unos 3,5 GHz, y casi  $+2$  dB a unos 5,5 GHz. En la actualidad, los fabricantes de osciloscopios no especifican la planicidad de la respuesta en frecuencia de sus osciloscopios. El único punto del dominio de la frecuencia que los fabricantes de osciloscopios especifican es el punto de ancho de banda a  $-3$  dB. Incluso si un osciloscopio presentase un pico de  $+6$  dB, que significaría un error de amplitud del 60 por ciento a esa frecuencia concreta dentro de la banda, el osciloscopio seguiría considerándose dentro de la especificación siempre y cuando el punto a  $-3$  dB esté por encima del ancho de banda especificado. Pero, del mismo modo que la atenuación a frecuencias más elevadas puede degradar la exactitud de las medidas, la amplificación y la presencia de picos puede empeorarla.

La traza azul (inferior) de la figura 3 muestra la respuesta en frecuencia del modelo 54855A con corrección en módulo utilizando la técnica de filtrado con aplanamiento del módulo. Con este filtro por software o DSP, la respuesta en frecuencia corregida del osciloscopio no suele desviarse más de  $\pm 0,5$  dB hasta que la respuesta natural llega a su punto de corte en las proximidades del

ancho de banda especificado de 6 GHz. Esta característica particular del filtro FIR del osciloscopio no es seleccionable por el usuario, sino que interviene permanentemente mientras se está muestreando a la frecuencia de muestreo máxima que permite el osciloscopio, para corregir los inevitables errores del filtrado por hardware. La combinación del filtrado por software y por hardware produce datos más precisos que los que se consiguen empleando únicamente el filtrado por hardware.

### Filtrado por corrección de fase

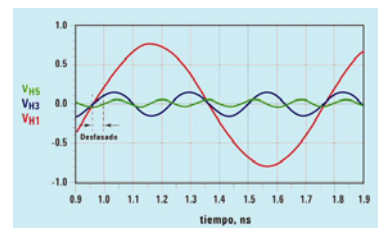
Las señales digitales de alta velocidad están formadas por múltiples componentes de frecuencia entre los que se encuentran la fundamental y sus armónicos. Lo ideal sería que la fundamental y los armónicos de una señal digital estuviesen totalmente en fase y sin retardo alguno entre los distintos componentes de frecuencia, como muestra la figura 4.



Lamentablemente, el hardware del osciloscopio añade una desviación de fase indeseada a los componentes de mayor orden de las señales de alta velocidad, que sólo puede eliminarse incrementando considerablemente el ancho de banda del instrumento, o bien corrigiéndolo mediante la técnica de filtrado por DSP con corrección de fase. La figura 5 muestra un ejemplo en el que el 5º armónico (traza verde) está retrasado tanto respecto a la fundamental como al 3er armónico. El resultado será una forma de onda digital

distorsionada en la pantalla del osciloscopio. Sin corrección de fase, esta distorsión suele manifestarse como una sobreoscilación excesiva en la forma de onda digitalizada, junto con una menor velocidad en los flancos.

Los diseñadores de sistemas digitales de alta velocidad a menudo pasan por alto el componente de sobreoscilación de la distorsión, creyendo que la sobreoscilación medida está presente realmente en la señal de entrada medida. Pero puede que eso no sea así, sino que en realidad se deba a un efecto secundario de la incapacidad del hardware para mantener a todas las frecuencias de entrada.



La traza roja de la figura 6 muestra un ejemplo típico de error de fase dependiente de la frecuencia inducido por el hardware del 54855A a frecuencias de entrada más elevadas. La traza azul de este gráfico muestra la respuesta en fase corregida mediante la técnica de filtrado por software/DSP con corrección de fase. Como puede observarse, este filtro de software corrige todos los errores de fase

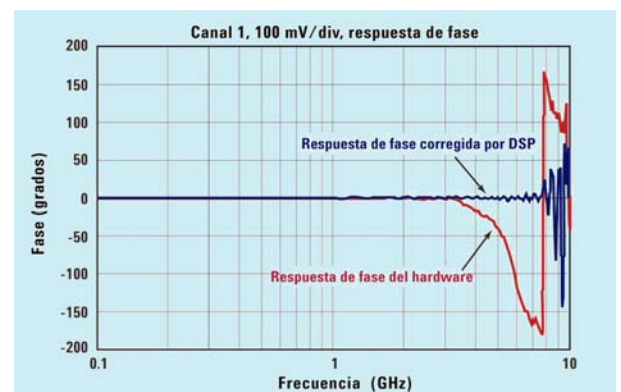


Figura 3. Respuesta del filtro de aplanamiento del módulo

Figura 5. 5º armónico desfasado

Figura 4. Armónicos en fase

Figura 6. Respuesta en fase corregida y no corregida

Figura 7. Respuesta al impulso con y sin corrección de fase



hasta muy por encima del ancho de banda máximo para el que está especificado el instrumento.

La figura 7 muestra una simulación de señal digitalizada con flanco rápido, con y sin corrección de fase, para un sistema de hardware de 6 GHz basado en una respuesta máxima plana de orden superior. El único efecto indeseable que podrá advertirse en la forma de onda corregida en fase (traza roja/izquierda) es la presencia de una mínima preoscilación y sobreoscilación en la forma de onda. Tampoco en este caso la preoscilación o la sobreoscilación aparecen en realidad en la señal de entrada simulada, que tenía un tiempo de subida infinitamente rápido, sino que son efectos colaterales de la respuesta del sistema lineal en fase y del contenido de la señal por encima de la frecuencia a  $-3$  dB. Pero no hay que pasar por alto un exceso de sobreoscilación en la forma de onda sin corrección de fase (traza derecha/azul).

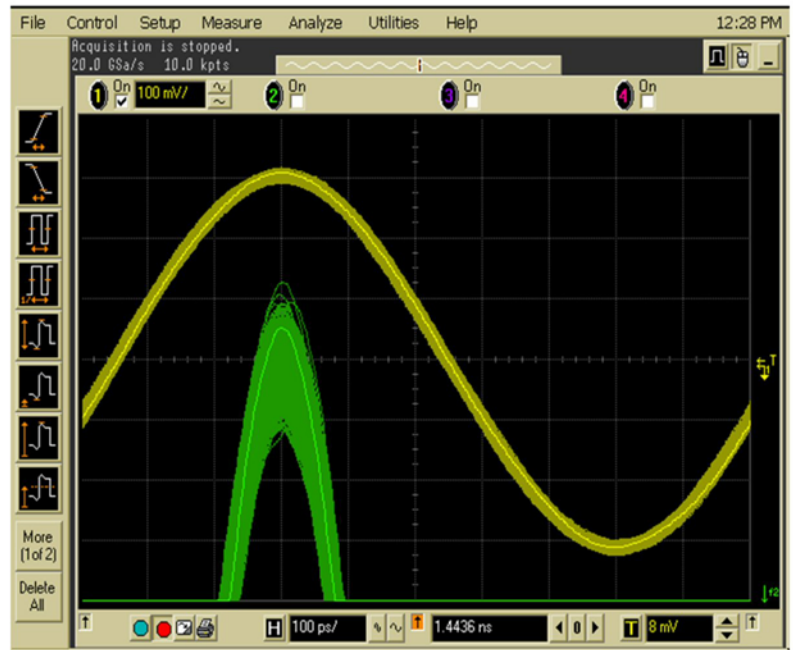
Con la corrección de fase se consigue mejorar los errores globales por perturbación, tanto en la cúspide como en la base de esta forma de onda. Pero lo más importante es que las medidas de temporización, como las de tiempo de subida y de bajada, son mucho más precisas cuando se aplica corrección de fase, tanto para señales en banda como fuera de banda. También en este caso, el filtro de corrección de fase no es seleccionable por el usuario en el osciloscopio 54855A de Agilent, sino que funciona permanentemente para corregir los errores de fase del hardware adicionales.

## Filtrado antirruído

Como puede imaginarse, el filtrado antirruído reduce el efecto del nivel base de ruido del osciloscopio. Los osciloscopios son instrumentos de banda ancha, y cuanto mayor es el ancho de banda, mayor será el nivel base de ruido. Este componente de error inducido por el hardware es inevitable en los instrumentos de banda ancha. Con el osciloscopio 54855A de Agilent, es posible utilizar selectivamente el filtrado antirruído para mejorar la precisión de las medidas, pero eso tiene su precio. Cuando el filtro FIR del osciloscopio incluye características de filtrado antirruído, el ancho de banda del instrumento se ve reducido.

nivel base de ruido del hardware. Con esta configuración, la medida del ruido inducido por el instrumento arroja un resultado de unos 2,8 mV RMS. La traza superior/amarilla muestra la señal de entrada ampliada casi hasta el fondo de escala, a 100 mV/div. La traza inferior, de color verde, muestra una ampliación 10X de esta forma de onda en las proximidades de su valor de pico.

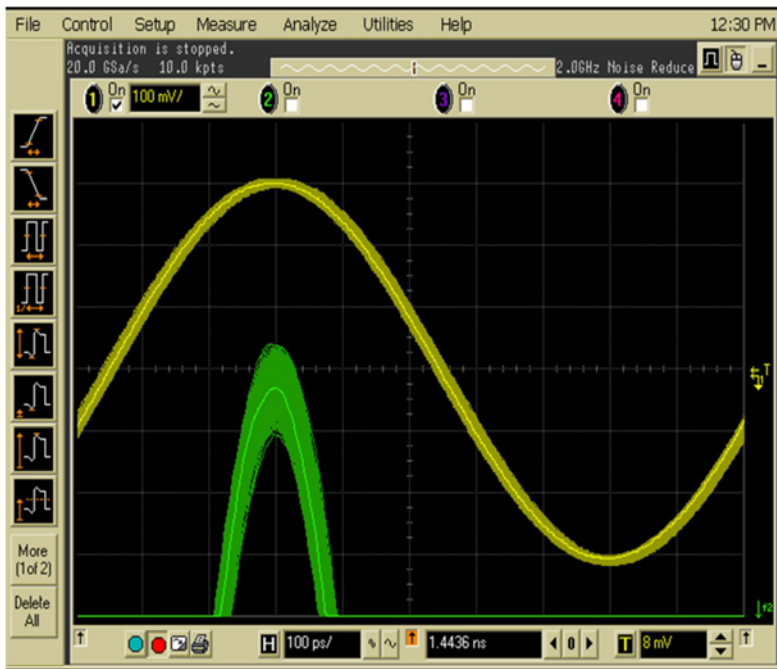
La figura 9 muestra la misma onda senoidal de 1 GHz, pero en esta ocasión capturada utilizando la técnica de filtrado antirruído con un ancho de banda de 2 GHz. Después de acumular 1.000 capturas, podemos observar una forma de onda mucho más limpia, debido a una reducción de casi 2:1 en el nivel base



La figura 8 muestra un ejemplo de captura de una onda senoidal de 1 GHz utilizando el osciloscopio 54855A, con un ancho de banda de 6 GHz, sin filtrado antirruído. En el modo de pantalla de persistencia infinita, al cabo de 1.000 capturas acumuladas puede observarse una banda de ruido en esta onda senoidal capturada que está inducida por el

de ruido del sistema. Una vez más, la traza superior de color amarillo muestra la señal de entrada ampliada a 100 mV/div, y la inferior de color verde muestra una ampliación de detalle de la forma de onda en las proximidades de su valor de pico, que nos permite apreciar con mayor claridad el efecto de un menor nivel base de ruido del osciloscopio que se

Figura 8. Modo de ancho de banda por defecto de 6 GHz con 2,8 mV RMS de nivel base de ruido del osciloscopio



consigue con la técnica de filtrado antinúido.

Al medir señales de menor ancho de banda, o con velocidades de flanco relativamente bajas, la activación del filtrado antinúido suele mejorar la precisión de las medidas tanto de amplitud como de tiempo. Un ejemplo es la medida de jitter. Uno de los componentes de error más importantes, y que a menudo se pasa por alto en las medidas de jitter, es la participación del ruido vertical en los errores de jitter o de temporización. Existe una relación directa entre el ruido vertical y el error de temporización, que es función de la velocidad de las transiciones de la señal o pendiente de las transiciones ("slew rate"). Aunque puede parecer antiintuitivo, reducir el ancho de banda del sistema de medida puede en realidad mejorar la precisión de las medidas de jitter al medir señales en banda. Activando el filtrado antinúido se reduce automáticamente el jitter inducido por el instrumento cuando el nivel base de ruido de éste es excesivo. Debido a los compromisos evidentes que plantea (ancho de banda

frente a ruido), en el osciloscopio 54855A de Agilent, el filtrado antinúido es una opción seleccionable por el usuario.

### Filtrado de mejora del ancho de banda

El filtrado de mejora del ancho de banda, denominado también "reforzamiento del ancho de banda", es quizás el tipo menos intuitivo de filtrado por DSP. Actualmente se utiliza en ciertos modelos de osciloscopio en tiempo real de gran ancho de banda.

¿Cómo puede mejorarse el ancho de banda de un sistema una vez que éste ha atenuado la señal? La respuesta más sencilla es, volviendo a reforzarla por software. Una vez que una señal digitalizada se ha descompuesto en sus distintos componentes frecuenciales sinusoidales, puede utilizarse el software para "amplificar" selectivamente los distintos componentes de frecuencia que han resultado atenuados, basándose en características de filtrado por software que reflejan fielmente

(hasta el punto reforzado a  $-3$  dB) las características de corte del hardware del osciloscopio, como muestra la figura 10. La traza roja (inferior) de esta gráfica muestra un ejemplo típico de respuesta en frecuencia del hardware. La traza verde (superior) representa el filtro de mejora de ancho de banda, y la azul (central) la respuesta con mejora del ancho de banda del sistema, que, como puede apreciarse, se ha visto "reforzado" hasta llegar a una frecuencia más alta. Además de un mayor ancho de banda, este filtro concreto genera una característica de reducción más acusada para el osciloscopio, que contribuye a reducir el ruido de alta frecuencia y eliminar el efecto de aliasing al medir señales de entrada fuera de banda.

También en este caso hay un inconveniente importante. Como mencionábamos anteriormente, un osciloscopio es un instrumento de banda ancha, y el nivel base de ruido del instrumento puede degradar considerablemente los resultados de la medida.

Con la técnica de filtrado de mejora del ancho de banda, el nivel de ruido del osciloscopio también se amplifica selectivamente. Por tanto, la utilización de estas características de mejora del ancho de banda del filtro FIR por el procesador digital de señales (DSP) del osciloscopio plantea un compromiso entre señal y ruido.

Aunque el filtrado de mejora del ancho de banda sea una característica relativamente nueva de algunos osciloscopios en tiempo real modernos con mayor ancho de banda, no

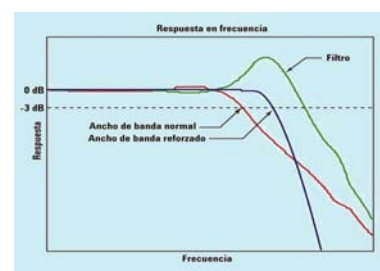


Figura 9. Modo con reducción de ruido a 2 GHz con 1,6 mV RMS de nivel base de ruido del osciloscopio

Figura 10: Filtrado de mejora del ancho de banda

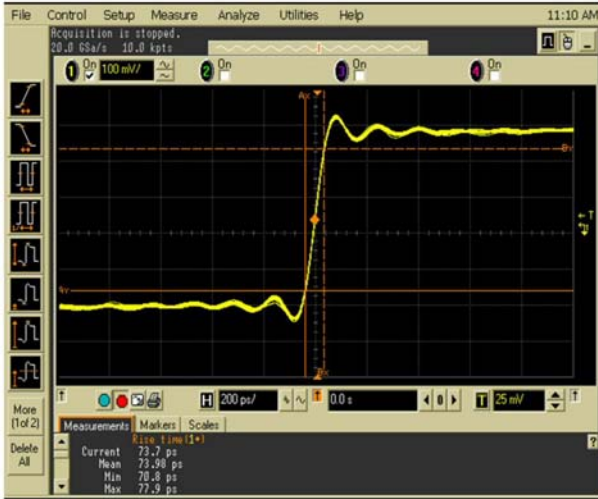
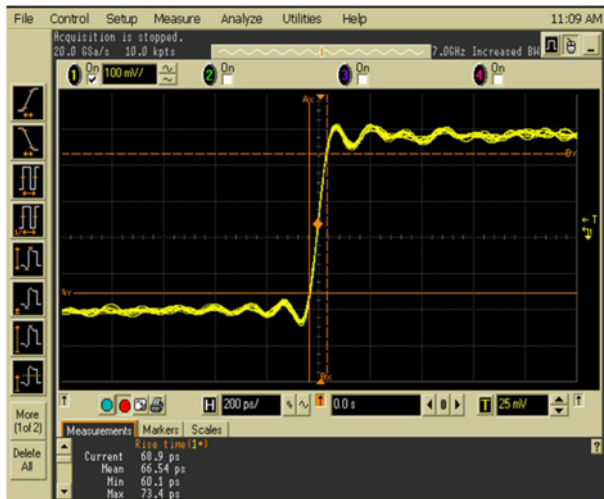


Figura 11: Medida de tiempo de subida sin mejora de ancho de banda

es una técnica nueva en el sector de medida y prueba. Agilent lleva años utilizando técnicas de mejora del ancho de banda en los analizadores de redes y de espectro. De hecho, Agilent utilizó esta técnica por primera vez en un osciloscopio para simular flancos de subida más rápidos al realizar medidas de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) con un osciloscopio de muestreo de 20 GHz. Esta técnica se conoce como "normalización" en los osciloscopios de muestreo modernos capaces de realizar medidas de TDR.

Figura 12: Medida de tiempo de subida con mejora de ancho de banda hasta 7 GHz

La figura 11 muestra un ejemplo de medida de una señal fuera de banda con un osciloscopio de 6 GHz.



La señal de entrada tiene un tiempo de subida de unos 50 ps (para un criterio de medida desde el 10% al 90%). Sin embargo, dado que el hardware básico del osciloscopio tiene una especificación de tiempo de subida de 70 ps, mediremos un tiempo de subida de sólo 74 ps. Con la función de filtrado por mejora de ancho de banda a 7 GHz, podemos realizar ahora una medida más precisa en esta señal de unos 66 ps, como muestra la figura 12. Sin embargo, puede apreciarse un aumento en el nivel base de ruido tanto en la cúspide como en la base de esta forma de onda.

En el modo estándar de ancho de banda a 6 GHz, el nivel base de ruido del osciloscopio es de unos 3 mV RMS en la escala de 100 mV/div. Cuando se utiliza la técnica de filtrado por mejora del ancho de banda hasta 7 GHz, ese nivel de ruido aumenta hasta unos 6 mV RMS.

Otra ventaja de la función de filtrado por DSP con mejora de ancho de banda que ofrecen los osciloscopios 54855A de Agilent es que permiten realizar medidas con sondas activas de alta impedancia hasta un ancho de banda de sistema de 7 GHz. La sonda activa diferencial ha dejado de ser el eslabón más débil de la cadena de medida del osciloscopio.

## Conclusión

En la actualidad, muchos ingenieros tienden a confiar en el filtrado por hardware, pero son escépticos en cuanto al filtrado por DSP por estar basado en software. Sin embargo, como muestra este artículo, el filtrado por DSP de las formas de onda de un osciloscopio sirve precisamente para corregir los errores introducidos por el filtrado por hardware. En lugar de pensar en el filtrado por software como en una manipulación de los datos, tiene más sentido considerarlo como una "desmanipulación".

El software lleva años utilizándose para corregir los errores de hardware en los osciloscopios, por ejemplo para la calibración de ganancia y de offset, o para la anulación del retardo entre canales. Tiene sentido utilizarlo también para corregir fuentes de error de hardware más complejas y dependientes de la frecuencia mediante filtrado por DSP.

Algunas de las características de filtrado descritas en este artículo apenas tienen inconvenientes, como ocurre con el filtrado por aplanamiento del módulo y por corrección de fase. Por eso, estas características de filtrado concretas no son seleccionables por el usuario, sino que se activan por defecto cuando el osciloscopio 54855A de Agilent muestrea a la frecuencia de muestreo máxima especificada (20 GM/s). Creemos que el filtrado por reconstrucción de la forma de onda mediante la función  $\text{sen}(x)/x$  mejora también la exactitud de las medidas y la calidad de la imagen en pantalla, y debido a ello las características de este filtro concreto se activan por defecto en el osciloscopio, pero pueden desactivarse fácilmente si se desea. Los inconvenientes del filtrado por  $\text{sen}(x)/x$  tienen que ver sobre todo con la rapidez de realización de las medidas, no con su precisión.

Otras características del filtro FIR por DSP del osciloscopio, como la reducción de ruido y el filtrado de mejora del ancho de banda, plantean compromisos muy concretos en términos de ruido y ancho de banda. Por eso ninguna de estas características de filtrado funciona por defecto en el osciloscopio, sino que debe activarse explícitamente para utilizarla.

Siempre y cuando se conozcan los compromisos que plantean los distintos tipos de filtrado, tiene sentido utilizar el filtrado por DSP para mejorar la exactitud y resolución de los osciloscopios en tiempo real modernos. o