

Medida de AC con muestreo directo

Por Brian Stewart y Conrad Proft

Conrad Proft es jefe de proyectos de I+D para generadores de funciones y multímetros digitales (DMM) en Agilent. Tech.

Brian Stewart, licenciado en Ingeniería trabaja en I+D para Agilent Technologies

Están empezando a comercializarse multímetros digitales de última generación que utilizan una tecnología de muestreo directo para realizar medidas de AC. Los últimos avances que se han producido en convertidores de señales analógicas a digitales (ADC) hacen posible este cambio fundamental en el sistema de medición. Las ventajas del muestreo directo incluyen una mayor rapidez de medida, un incremento en la precisión (especialmente con sinusoides de alta frecuencia) y una corrección sin factor cresta. Si bien la técnica de medida de AC mediante muestreo directo supone sin lugar a dudas una mejora importante, también presenta algunas desventajas tales como un ancho de banda estrictamente limitado y posibles distorsiones digitales tales como espurios de ruido. Este artículo ofrece una introducción a esta técnica de medida de AC y compara su rendimiento con las técnicas analógicas tradicionales.

Los multímetros suelen emplear una de las cuatro técnicas siguientes para realizar medidas de AC de verdadero valor eficaz: *térmica, analógica, submuestreo o muestreo directo*. Las dos primeras convierten la señal de entrada a una tensión DC que representa el valor eficaz de la señal de entrada AC. Las dos últimas técnicas son las que muestrean directamente la forma de onda de entrada.

El método *térmico* mide el incremento térmico en una resistencia de precisión causado por la señal de entrada. Sin embargo, esta técnica ha dejado de emplearse en multímetros de bancos de trabajo. La técnica *analógica* emplea un circuito para generar un nivel de DC proporcional al verdadero valor eficaz de una entrada de AC. La salida de DC del circuito se mide con un ADC y se convierte a una medida de AC. Este método es el más común y se utiliza en multímetros como los Agilent 34401A, Fluke 45 y Keithley 2000. Ninguna de las dos técnicas propor-

ciona información sobre la señal de entrada, aparte de su contenido de valor eficaz.

El método de *submuestreo* utiliza un circuito de seguimiento y retención, así como una base de tiempos de precisión para muestrear uniformemente una forma de onda repetitiva. Este sistema obliga a medir la señal de entrada con incrementos temporales a lo largo de numerosos intervalos. Cada salida de seguimiento y retención se convierte utilizando un ADC y los resultados se combinan digitalmente en una medida de AC. Esta técnica ofrece la ventaja adicional de poder medir la cantidad de frecuencias más altas contenida en la señal de entrada. El Agilent 3458A utiliza este método. El *muestreo directo* digitaliza la entrada de AC con una velocidad de muestreo fija. Captura uno o varios ciclos de la señal de entrada y, a continuación, analiza la forma de onda capturada. Asimismo, realiza digitalmente el cálculo del cuadrado, la media y la raíz cuadrada de las muestras para obtener la medida del valor eficaz. El uso de esta técnica es relativamente nuevo en los multímetros; sin embargo, se emplea comúnmente en los osciloscopios. La mayoría de los osciloscopios ofrecen una combinación de las técnicas de

submuestreo y muestreo directo. Los multímetros 34410A y 34411A de Agilent y 4070 de National Instruments utilizan la técnica de medida de AC con muestreo directo.

Todas estas técnicas pueden aplicarse tanto a medidas de tensión como de corriente alterna. En la mayoría de los casos, las medidas de corriente se realizan convirtiendo la señal en una tensión, utilizando una resistencia shunt de gran precisión. Igualmente, pueden realizarse medidas con acoplamiento AC y DC (también denominadas AC y AC+DC) empleando variantes de estos métodos.

El resto del artículo se centra en la medida de AC con muestreo directo y compara esta técnica con el método de conversión de valor eficaz analógico.

Comparación de conversiones

Las diferencias entre los muestreos analógico y directo se aprecian inmediatamente a partir de los diagramas de bloque del sistema. La figura 1 muestra el diagrama de bloques básico del sistema de medida de AC para la conversión del valor eficaz analógico. En este diagrama se da por sentado que el multímetro

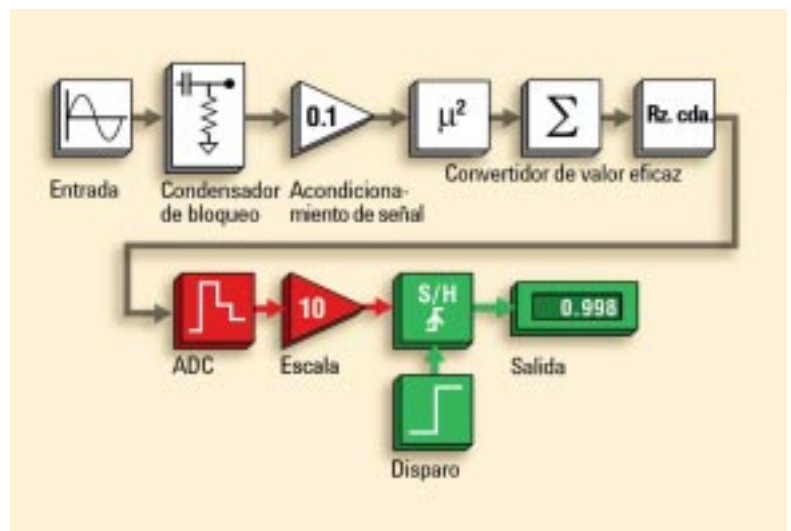


Figura 1.

está configurado para una medida con acoplamiento AC. El acoplamiento AC permite medir pequeñas variaciones en la señal de AC en presencia de grandes señales de DC. Por ejemplo, esta configuración se utiliza para comprobar el rizado de la fuente de alimentación DC.

Se aplica acoplamiento AC a la entrada empleando un simple circuito con condensador de bloqueo. Inmediatamente después del condensador de bloqueo, un circuito de acondicionamiento de señal escala la entrada a un rango adecuado para el convertidor de valor eficaz. La ganancia del acondicionamiento de señal depende del rango de medida seleccionado. El convertidor de valor eficaz realiza el cálculo del cuadrado, la media y la raíz cuadrada utilizando una técnica analógica. Para ello suele emplearse un dispositivo monolítico (por ejemplo, un dispositivo analógico AD637) y un condensador promediador externo. El resultado es un nivel de DC que corresponde al valor de verdadero valor eficaz de la entrada. El ADC muestrea la salida del convertidor de valor eficaz. Debido a que la señal de AC se ha convertido a un nivel de DC equivalente, el ADC sólo tiene que funcionar con suficiente rapidez como para producir velocidades de lectura razonables. La velocidad de muestreo del ADC suele encontrarse dentro del rango de 200 Hz a 2 kHz, independientemente del valor de la frecuencia máxima de la señal de entrada. Las muestras del ADC se escalan para tener en cuenta la ganancia de entrada, y se genera un resultado cuando se dispara el multímetro.

Para el muestreo directo, el diagrama de bloques cambia de las dos maneras que se indican a continuación (ver figura 2). En primer lugar, el valor eficaz analógico se sustituye por una estimación del valor eficaz digital realizada después de efectuarse el muestreo con el ADC. En segundo lugar, se añade un filtro

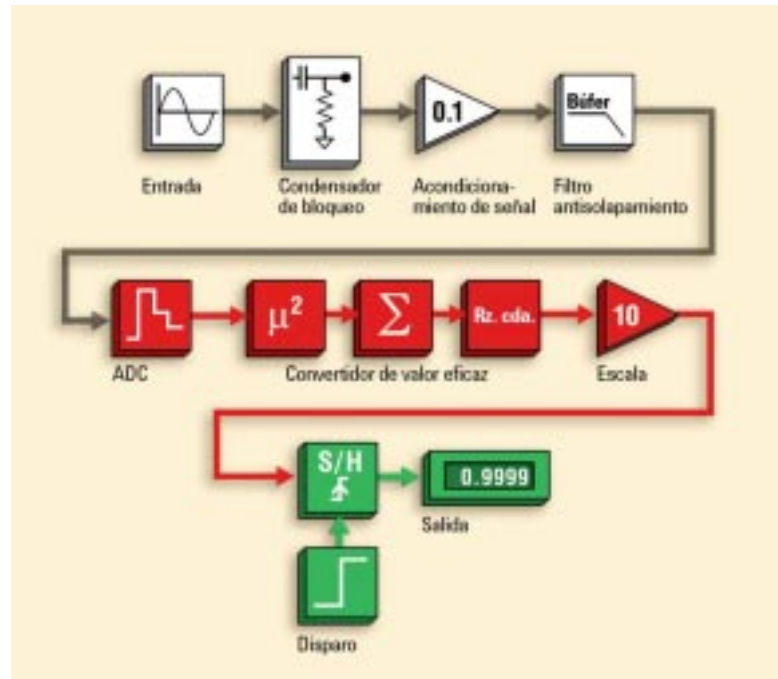


Figura 2.

antisolapamiento delante del ADC. El acondicionamiento de señal y los otros componentes pueden ser prácticamente idénticos para ambas técnicas.

Con el muestreo directo, el ADC digitaliza la entrada directamente y las operaciones del cálculo del cuadrado, la media y la raíz cuadrada se realizan mediante el procesador de señales digitales (DSP). En teoría, esto debería requerir que el ADC muestrease al doble del valor de frecuencia máxima contenido en la señal de entrada. En la práctica, la velocidad de muestreo del ADC suele ser de cinco a diez veces mayor que el valor de frecuencia máxima contenido en la señal de entrada (por ejemplo, una velocidad de muestreo de entre 1,5 y 3 MHz para un ancho de banda de AC de 300 kHz). El filtro antisolapamiento es necesario para prevenir el ruido procedente de las señales de entrada que contienen frecuencias superiores a la mitad del valor de la velocidad de muestreo.

El Agilent 34401A emplea una técnica híbrida que combina un convertidor de valor eficaz analógico,

digitalización de velocidad de muestreo baja y cálculo de valor eficaz para mejorar la velocidad y el rendimiento de la medida. Los multímetros de última generación utilizan una técnica de muestreo directo puro sin convertidor de valor eficaz analógico.

Por qué razón y por qué ahora

Dos tecnologías clave son las que hacen posible la medida de AC con muestreo directo en multímetros: una mayor velocidad de muestreo del ADC y un procesamiento económico de las señales digitales. La tecnología básica de ADC utilizada en multímetros ha mejorado considerablemente en los cinco últimos años. Estos avances han hecho especial hincapié en conseguir medidas de DC más rápidas y en añadir funciones de digitalización. La incorporación de conceptos de diseño Delta-Sigma como el sobremuestreo ha contribuido al diseño de unos ADC muy precisos y adecuados para multímetros de banco de trabajo y

que, además, permiten realizar un muestreo continuo a velocidades lo suficientemente rápidas como para poder ser utilizados en operaciones de muestreo directo. El otro requisito clave para efectuar medidas de AC con muestreo directo es el procesamiento del flujo de datos continuo. Actualmente, incluso aquellas matrices de puertas programables (FPGA) relativamente modestas proporcionan suficientes recursos DSP como para implementar los filtros necesarios.

La adopción de la técnica de medida de AC con muestreo directo permite obtener medidas de AC más rápidas, lecturas más precisas (en determinadas condiciones), así como una arquitectura de sistemas más flexible.

La ventaja más importante es la obtención más rápida de medidas de AC. En un voltímetro típico, la configuración de medida más lenta es la AC con ancho de banda bajo. El muestreo directo permite un funcionamiento más rápido debido a dos razones esenciales. En primer lugar, el filtro paso bajo empleado para realizar la fase promediadora del cálculo de valor eficaz puede ser de un orden mucho mayor que el paso bajo de primer orden que suele emplearse en un convertidor analógico. Esto supone una mejora en el tiempo de estabilización cuatro veces superior, o incluso más. En segundo lugar, puede reducirse la estabilización debida al acoplamiento de AC para conseguir una mejora en el caudal durante la exploración del canal.

La ventaja obtenida en la precisión se debe a las diferencias básicas existentes en la técnica de medición utilizada. Una de las mayores fuentes de imprecisión para medidas de AC es la respuesta en frecuencia del circuito de acondicionamiento de señal de entrada. En el método analógico, este circuito se ajusta para hacer que la respuesta sea lo más plana posible. En el método de mues-

treo directo, es posible cancelar la frecuencia de acondicionamiento de señal aplicando un filtro de aplanamiento digital a los datos muestreados antes de realizar el cálculo de valor eficaz. Este filtro de aplanamiento digital proporciona una corrección más precisa que la obtenida con un circuito de entrada ajustado, lo que permite alcanzar una mayor precisión con sinusoides de alta frecuencia.

Otras fuentes de imprecisión en el método analógico se deben a las limitaciones existentes en los convertidores de valor eficaz analógico. En primer lugar, la precisión de la conversión de valor eficaz se ve reducida cuando la forma de onda de entrada tiene una figura distinta de la sinusoidal. Una forma de caracterizar la forma de onda es mediante el factor de cresta. Éste se define como la relación entre el valor pico y el valor eficaz. Los convertidores analógicos suelen precisar una corrección de precisión basada en el factor de cresta de entrada, independientemente del valor de la frecuencia de entrada. En segundo lugar, el ancho de banda del convertidor suele decaer a medida que el nivel de entrada se sitúa por debajo del 10% del rango, lo que introduce una no linealidad en las frecuencias altas. El muestreo directo es más preciso para las señales no sinusoidales que contienen frecuencias dentro del ancho de banda de medida de la arquitectura, y permite un rango de señales dinámicas más amplio.

La última ventaja proporcionada por el sistema de medida de AC con muestreo directo es que la digitalización de la entrada mantiene la información de la señal por encima del valor eficaz. El convertidor de valor eficaz analógico reduce la forma de onda de entrada a un nivel de DC de valor eficaz equivalente antes de que se produzca la adquisición digital. El muestreo directo permite calcular características adicionales de la señal (como el valor de pico a

pico o el valor medio, cuando hay acoplamiento DC) junto con el valor de AC, obteniéndose así más información sobre la señal. Por ejemplo, la detección de picos que superan un nivel definido puede ser muy útil a la hora de comprobar determinados dispositivos inductivos.

Si bien la medida de AC con muestreo directo ofrece claras ventajas, no hay que descartar algunos inconvenientes. El más importante es que el ancho de banda de medida está limitado por el filtro antiso-lapamiento, ya que éste depende de la velocidad de muestro del ADC. El marcado descenso del filtro antiso-lapamiento limita estrictamente el ancho de banda e introduce un error de gran magnitud en el caso de señales con contenido de frecuencia por encima de la frecuencia de corte. Por ejemplo, un filtro antiso-lapamiento exhaustivo con un corte de 300 kHz excluye el 1,2% de la potencia de señal para una onda cuadrada de 20 kHz. En el caso del valor eficaz analógico, el ancho de banda suele descender gradualmente más allá del ancho de banda de medida especificado, por lo que las señales con contenido fuera de banda se miden con mayor precisión. Si seguimos con el corte de 300 kHz del ejemplo anterior, un convertidor de valor eficaz analógico podría seguir detectando contenidos de hasta 1 MHz.

El muestreo directo introduce algunas distorsiones digitales debido al proceso de muestreo. El problema más frecuente es que frecuencias de entrada específicas pueden poseer un ruido de medida más alto debido a la correlación con la velocidad de muestreo. Por ejemplo, el ruido de medida puede saltar de unas pocas P.P.M. a decenas de P.P.M. cuando la frecuencia de entrada resulte ser un divisor de la velocidad de muestreo del ADC. Estos efectos suelen ser mínimos en comparación con las especificaciones requeridas, pero pueden resultar sor-

prendentes para un usuario que mide una señal que contiene dichas frecuencias. Las ventajas que ofrecen la obtención de medidas más rápidas y una precisión en el cálculo de frecuencias más altas compensan este efecto.

Por último, el procedimiento de calibración que compensa la respuesta de frecuencia del circuito de acondicionamiento de señal suele requerir más puntos de calibración si se compara con la técnica analógica y puede incrementar el tiempo necesario para efectuar dicha calibración.

Comparación

A continuación se utilizarán los modelos Agilent 34401A y 34410A como ejemplo de las diferencias de rendimiento existentes entre las medidas de AC efectuadas con muestreo analógico y directo.

La tabla 1 muestra las especificaciones principales de precisión de tensión AC medidas durante un año con ambos modelos para entradas sinusoidales: Dicha tabla muestra las mejoras de precisión para señales de entre 100 kHz y 300 kHz y el mayor rango dinámico del 34410A debido al muestreo directo.

Tanto el 34401A como el 34410A admiten tres anchos de banda que permiten un equilibrio entre el tiempo de estabilización y la frecuencia de entrada mínima. La tabla 2 muestra el tiempo de estabilización requerido para multímetros que utilizan anchos de banda de 3 Hz, 20 Hz y 200 Hz, respectivamente.

La tabla 3 muestra el error de medida adicional típico debido al factor de cresta y el ancho de banda para tres formas de onda de entrada comunes.

Esta tabla indica que el muestreo directo ofrece un rendimiento mejor en el caso de no sinusoides, pero únicamente cuando el contenido de frecuencia de la señal de en-

Frecuencia	Especificaciones de precisión ± (% de lectura + % de rango)	
	Agilent 34401A ¹	Agilent 34410A ²
3 Hz - 5 Hz	1.00 + 0.03	0.50 + 0.03
5 Hz - 10 Hz	0.35 + 0.03	0.10 + 0.03
10 Hz - 20 Hz	0.06 + 0.03	0.06 + 0.03
20 kHz - 50 kHz	0.12 + 0.05	0.10 + 0.05
50 kHz - 100 kHz	0.60 + 0.08	0.40 + 0.08
100 kHz - 300 kHz	4.00 + 0.50	1.20 + 0.50

Tabla 1.

¹ Para rangos de 1 Vrms y superiores y para señales entre el 5 y el 120% del rango.
² Para rangos de 1 Vrms y superiores y para señales entre el 0.3 y el 120% del rango.

Frecuencia de entrada mínima	Tiempo de estabilización (segundos) ¹	
	Agilent 34401A	Agilent 34410A
3 Hz	8.0	2.50
20 Hz	1.5	0.50
50 Hz ²	1.5	0.33
200 Hz	0.15	0.025

Tabla 2.

¹ Al 0,01% del rango para un paso de AC del 100 al 1% del rango sin cambio en el valor de DC.
² Medido con el ancho de banda de 20 Hz.

Frecuencia	Factor cresta y error de ancho de banda (% de la lectura) ¹					
	Agilent 34401A			Agilent 34410A		
	Sinusoide	Triángulo	Cuadrado	Sinusoide	Triángulo	Cuadrado
200 Hz	-0.01	-0.02	0.02	0.00	0.00	-0.01
1 kHz	0.00	-0.01	0.03	0.00	0.00	-0.05
2 kHz	0.00	-0.01	0.04	0.00	0.00	-0.11
5 kHz	0.00	-0.01	0.08	0.00	0.00	-0.27
10 kHz	0.01	-0.01	0.13	0.00	0.00	-0.55
20 kHz	0.02	0.01	0.25	0.00	0.00	-1.11
50 kHz	0.08	0.04	0.55	-0.03	-0.05	-2.88
100 kHz	0.21	0.08	1.08	-0.06	-0.18	-4.82

Tabla 3.

¹ Además de la precisión básica de 1 kHz.

trada se encuentra dentro del ancho de banda del multímetro. Para señales con contenido fuera de banda, el método de muestreo directo presenta un error significativamente superior.

Conclusiones

Los últimos avances en tecnología de ADC para multímetros han permitido abandonar la realización de medidas de AC utilizando un convertidor de valor eficaz analógico, para pasar a muestrear y calcular directamente el valor eficaz. Este artículo ha demostrado que la técnica de muestreo directo mejora categóricamente la velocidad y la precisión de la medida de AC para señales que se encuentran dentro del ancho de banda de medida.

Los inconvenientes que derivan del uso de la técnica de muestreo directo son mínimos en comparación con las mejoras globales que se obtienen en el rendimiento de la medida.

Sobre los autores

Conrad Proft trabaja para HP/Agilent desde hace 27 años y ha dedicado casi la mitad de ese tiempo a I+D y marketing, especializándose en instrumentación de uso general para medidas de bancos de trabajo y sistemas. Con una carrera que abarca desde ingeniería de aplicación hasta jefe de proyectos de I+D para generadores de funciones y DMMs, su actividad le ha permitido adquirir una gran experiencia en diversos ámbitos, así como un amplio repertorio de éxitos. Conrad Proft es Licenciado en ciencias de ingeniería electrónica (BSEE) y cuenta con un Máster en ciencias de ingeniería electrónica (MSEE).

Brian Stewart obtuvo un Máster otorgado por la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, así como la licenciatura de la Universidad Carnegie Mellon, ambos en Ingeniería Eléctrica e Informática. Ha trabajado en Agilent Tech. y QUALCOMM en el diseño y prueba de DSP.