

Puesta a cero y calibración internas para sensores de potencia de RF

Por Alan B. Anderson, Agilent Technologies

Alan B. Anderson es jefe del equipo de ingenieros de desarrollo de Agilent Technologies, empresa a la que se incorporó en 1997, cuando todavía se denominaba Hewlett-Packard. Licenciado por la Universidad de Glasgow en 1997 y Máster Europeo en Ingeniería, obtuvo un MBA otorgado por la Edinburgh Business School en 2003. Desde su incorporación ha desarrollado toda su gama de sensores de potencia de RF de banda ancha y de pico. alan_anderson3@agilent.com

La combinación entre un sensor de potencia de RF y un medidor de potencia de RF se utiliza principalmente para obtener una mayor precisión y posibilidad de seguimiento de los sistemas de prueba, así como para poder realizar mediciones precisas de la potencia absoluta de RF. El entorno puede variar dependiendo de si se trata de un banco de pruebas en laboratorio o una línea de producción, o bien se empleen en sistemas de radar, teléfonos móviles o estaciones base. En la mayoría de los casos nos encontraremos con una combinación de sensor y medidor de potencia como medio principal para obtener mediciones de potencia absoluta para las que sea posible efectuar un seguimiento.

Un factor fundamental para obtener mediciones precisas de potencia de RF es el procedimiento de calibración y puesta a cero que, normalmente, el usuario debe efectuar en el sensor o medidor para garantizar la precisión de mediciones posteriores. En este artículo se explicará para qué sirve este proceso y se mostrará cómo aplicarlo a las técnicas de medición de potencia utilizadas actualmente. En particular, se presentará el método innovador de "calibración y puesta a cero internas" introducido por Agilent que elimina la necesidad de conectarse repetidamente a una fuente de calibración externa. Las ventajas de este método se traducen en una menor incertidumbre en las mediciones, así como un menor desgaste de los conectores y una reducción de la duración de las pruebas.

Tecnología y requisitos para la calibración y puesta a cero de sensores

Los sensores disponibles en el mercado utilizan uno de estos tres tipos de detectores de RF: termistores, termopares y diodos. Cada tipo

de sensor suele constar de una interfaz de conectores de RF, que puede incluir un atenuador interno o un condensador de bloqueo de corriente continua, y de un detector de RF al que le siguen distintos componentes de un circuito de procesamiento o acondicionamiento de la señal. La figura 1 muestra este tipo de configuración para un sensor basado en un detector de diodo.

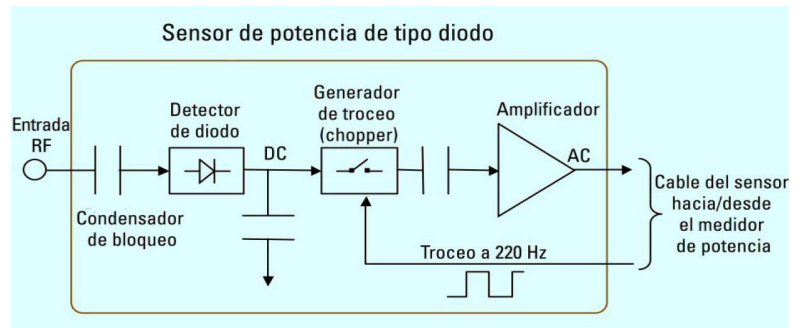
En el caso de un detector de tipo termistor, la detección se basa en la disipación de la potencia incidente de RF que, en forma de energía térmica, calienta el detector y modifica su resistencia eléctrica. Mediante un circuito puente y la sustitución de corriente continua, el detector efectúa una medición en bucle cerrado de la potencia de RF. De esta manera, midiendo la potencia eléctrica que debe aplicarse para

nera durante el proceso de calibración del sensor, ya sea durante su fabricación o dentro de su ciclo de calibración periódica. Su valor suele permanecer constante con la temperatura y con el nivel de potencia.

Por tanto, a la hora de realizar una medición de potencia utilizando un sensor de potencia de tipo termistor, la utilización del método de sustitución de corriente continua evita que el usuario tenga que realizar calibraciones complementarias. Sin embargo, es necesario efectuar una operación de puesta a cero para anular cualquier tipo de desviación ("offset") que pudiera existir en los instrumentos de medición.

Un detector de tipo diodo o termopar no posee por sí mismo la capacidad de medir la potencia de RF sin que se proceda previamente a la calibración de los dispositivos de

Figura 1. Diagrama de bloques de un sensor de potencia del tipo diodo



equilibrar el efecto de calentamiento provocado por la señal de RF, se obtiene una lectura de la potencia que debería disiparse a una carga de 50 ohmios.

Para mejorar la precisión de esta medición se aplica un factor de calibración. Éste tiene en cuenta la pérdida por disparidad (que se debe a que el termistor en sí no representa una carga exacta de 50 ohmios), así como la eficacia real (que se debe a que no toda la potencia de RF se disipa necesariamente en el propio termistor y, por tanto, es medible¹). Este factor de calibración varía según el rango de frecuencias de RF del sensor y se ge-

medición. Por esta razón, estos detectores suelen denominarse de "bucle abierto", ya que antes de utilizarlos hay que calibrarlos.

Cada uno de estos detectores emite un voltaje que es proporcional a la potencia de RF recibida; sin embargo, para que dicho voltaje sea útil, se necesita también un factor de escala que el usuario puede obtener conectando el sensor a una fuente de RF calibrada (generalmente un dispositivo de calibración de 50 MHz a 0 dBm, también conocido como oscilador de referencia) que proporciona un sistema en bucle cerrado y con la que es posible calcular el factor de escala. En

¹ Los términos en cursiva son términos específicos utilizados comúnmente para mediciones de potencia y están definidos de manera más detallada en la Hoja de aplicación 1449-3 titulada "Fundamentos para las mediciones de potencia de RF y microondas (parte 3ª). Incertidumbre en las mediciones de potencia según las guías internacionales de Agilent Technologies.

adelante, denominaremos a este proceso "calibración de usuario".

Considérese un voltaje de salida de 2 mV procedente de un sensor de potencia de tipo diodo o termopar. Este voltaje se produce al aplicar una potencia incidente desconocida a una frecuencia de 50 MHz. El valor de salida sólo tiene utilidad cuando el sensor ha sido calibrado aplicando una señal de 0 dBm a 50 MHz, produciéndose un voltaje de salida de por ejemplo 1 mV. Por consiguiente, si se calcula como factor de escala un valor de 1 vatio por voltio y se aplica a la salida de 2 mV, se obtendrá una lectura de 2 mW. Para transferir este factor de escala a otras frecuencias se aplicarán también factores de calibración como los descritos anteriormente para el sensor de potencia de tipo termistor. Sin embargo, en este caso, antes de aplicar esos factores deberá llevarse a cabo la calibración en bucle cerrado.

Además, tanto los sensores de tipo diodo como los de tipo termopar deberán ponerse a cero antes de realizar una medición de potencia. La función de puesta a cero elimina las desviaciones residuales ("offsets") que pudieran existir en los instrumentos de medición que no están recibiendo potencia. Por lo general, las operaciones de puesta a cero y calibración de usuario se realizan simultáneamente y suelen denominarse "Puesta a cero y calibración" ("Zero & Cal").

Para que el proceso de calibración sea válido, es imprescindible realizar la puesta a cero. En este caso, cuando no existe potencia de RF que incida en el detector, el medidor de potencia mide el valor de salida del sensor. Continuando con el ejemplo anterior, si el valor medido durante la puesta a cero mostrase 0,2 mV, el valor de calibración posterior a la puesta a cero (que antes era de 1 mV) debería ser igual a $1 \text{ mV} - 0,2 \text{ mV} = 0,8 \text{ mV}$. Este valor se utilizaría más tarde para gene-

rar un factor de escala de 0,8 vatios por voltio.

En la mayoría de los sensores de potencia, el proceso de calibración y puesta a cero por el usuario se aplica inmediatamente antes de realizar una medición de potencia. Esto se debe a la característica particular que poseen los instrumentos de prueba de RF: el sensor y el medidor de potencia son independientes y el plano de medida está situado lejos del medidor, en el lugar donde se encuentra el sensor. Los motivos principales por los que el sistema se divide en medidor y sensor son los siguientes:

- Para situar el plano de referencia de medición lo más cerca posible del dispositivo sometido a prueba y poder minimizar el deterioro en la exactitud de medición debido a las pérdidas en el cableado, así como a la incertidumbre por disparidad adicional ocasionada por una asociación incorrecta de impedancias.
- Para facilitar la compatibilidad del sensor de RF, proporcionando así mayor flexibilidad en el rango de potencias y en la cobertura de frecuencias, además de reducir el coste debido a la posibilidad de sustituir únicamente una parte del sistema.

Debido a ello, a menudo suele ocurrir que el sensor, el cable y el instrumento de medición se utilizan juntos la primera vez, o bien se desconectan y se vuelven a conectar al montar una configuración de instrumentos de prueba. Por lo tanto, para conseguir la máxima precisión, antes de realizar una medición se debe efectuar una puesta a cero y una calibración de usuario.

Evolución del proceso de calibración y puesta a cero

En los sensores de potencia de RF modernos², el detector es no lineal en todo su rango de utilización (es decir, el voltaje de salida detec-

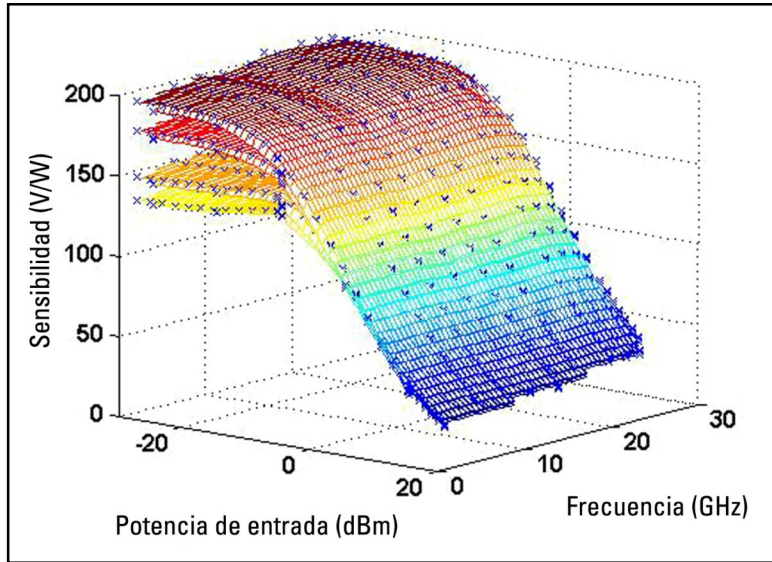
tado no siempre es linealmente proporcional a la potencia de entrada). Ello obliga a aplicar niveles de corrección complementarios además de los factores de calibración de frecuencia, debido a que los factores de calibración ya no son constantes en todo el rango de valores de potencia y temperatura.

Por ejemplo, los detectores de tipo diodo que cuentan con un amplio rango dinámico aplican una corrección de linealidad en relación a los niveles de potencia que suele consistir en una caracterización de la linealidad a 50 MHz y que después se aplica a todas las demás frecuencias. La forma más cómoda de combinar la corrección del factor de calibración y de la linealidad es relacionando todas las correcciones con la frecuencia y nivel de potencia de la fuente de RF empleada para la calibración de usuario. También pueden aplicarse correcciones adicionales de linealidad a distintas frecuencias (esta corrección se conoce como "Corrección de Linealidad Dependiente de la Frecuencia" o FDLC, del inglés "*Frequency Dependent Linearity Correction*"). También se han tenido en cuenta las variaciones de linealidad en relación a la temperatura, y para ello se han utilizado distintas correcciones de linealidad a diferentes temperaturas. Esta superposición de linealidad, factor de calibración y corrección FDLC³ supone en la práctica que para asociar un voltaje de salida del sensor a un nivel de potencia de RF de entrada es necesario aplicar un factor de corrección diferente para cada temperatura, frecuencia y nivel de potencia. A efectos de implementación, estas correcciones se realizan en comparación con la fuente de referencia de calibración de usuario y se basan en los datos de calibración generados al fabricar el sensor o durante su ciclo de calibración periódica. La calibración de usuario equivale a tomar unas coordenadas GPS de referencia para determinar

³ Consulte la referencia "Cómo medir los niveles de potencia en los sistemas modernos de comunicación" (*Measuring Power Levels in Modern Communication Systems*) disponible en la página: www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/All/EPSC090442.pdf. Consulte también la referencia "Microondas y RF" (*Microwaves & RF*) publicada en octubre de

² Los sensores de RF modernos se consideran sensores con memoria interna (EEPROM) capaces de almacenar datos de calibración y de factor de corrección y que suelen poseer una amplia gama de funcionamiento.

Figura 2. Factores de corrección cuatridimensionales de los sensores de potencia de la Serie P.
(Caracterización del voltaje detectado en relación a la potencia, temperatura y frecuencia.)



nuestra posición y utilizarlas para fijar nuestra posición en un mapa: el hecho de que conozcamos nuestra posición cuando nos encontramos en un punto del mapa no garantiza que conozcamos el terreno cuando nos desplazamos a otros lugares. La única forma de conseguirlo es fiándonos de la información proporcionada por el mapa para determinar la altitud y la posición a la que nos encontramos a medida que nos desplazamos. El GPS actúa como calibración de usuario mientras que los detalles del mapa representan la caracterización del sensor: nuestro conocimiento de la posición en la que nos encontramos (la medición) está en función de la exactitud con la que conocemos nuestra posición inicial de referencia, así como de lo apto que sea el mapa y de lo actualizado que esté.

Los sensores convencionales, cuando funcionan dentro de su zona de ley cuadrática, son como una llanura con una superficie limitada. Sin embargo, los sensores modernos de potencia pico y media que cuentan con un rango dinámico más amplio, son como grandes valles y colinas que se extienden sobre una superficie más extensa. Por este motivo, en los sensores más modernos, la precisión del mapa (los factores de corrección y caracterización) adquiere más importancia que la simple lectura inicial de la posición GPS (la calibración de usuario). La figura 2 muestra el comportamiento de la respuesta o "mapa" del sensor de potencia de la Serie P de Agilent. La calibración periódica del sensor consiste básicamente en una comprobación o actualización de los detalles del mapa.

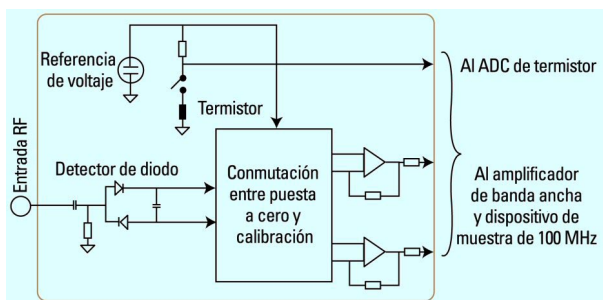
Durante la reciente evolución de los sensores de potencia se ha producido un cambio importante ya que, en vez de seguir efectuando una calibración de usuario para obtener la precisión y capacidad de seguimiento necesarias para las mediciones de potencia, ahora se recurre cada vez más a la caracterización en fábrica y al ciclo de calibración periódica para mejorar dicha precisión.

Una idea equívoca que suele tenerse en relación con la calibración de usuario es que dicha calibración puede detectar cambios en la respuesta de un sensor y aplicar los ajustes necesarios. Lo cierto es que, debido a que la combinación sensor-midido puede asimismo haber cambiado, no es posible llegar a una conclusión acerca de un posible cambio en el comportamiento de los detectores de RF. El bucle cerrado incluye también la interfaz del conector, el circuito de amplificación, el cableado y el instrumento de medición de potencia. Por tanto, la función principal de la calibración de usuario es combinar el sensor, el medidor y el cable, y no, como se cree, detectar cambios en el comportamiento de los detectores.

Teniendo en cuenta esta realidad, la última generación de sensores de potencia de banda ancha de la Serie P N1921/2A de Agilent aplica un nuevo concepto a la calibración de usuario. Ya no es necesario desconectar el sensor del dispositivo sometido a prueba y conectarlo a una señal de referencia de 50 MHz y 0 dBm. A partir de ahora, se introduce una señal conocida de corriente continua de referencia después del proceso de detección de RF a DC, consiguiéndose así todas las ventajas de una calibración de usuario, pero sin sus inconvenientes. Profundizando aún más en esta idea, se han introducido conmutadores transistorizados inmediatamente detrás del detector para poder realizar una puesta a cero mientras la señal de radiofrecuencia continúa incidiendo sobre el detector de RF (véase la figura 3). Este método, cuya patente está en trámite, se ha denominado "Puesta a cero y calibración internas" ("Internal Zero & Cal").

Esta característica evita la necesidad de tener que conectarse y desconectarse de la fuente de calibración, con lo cual se reduce la duración de las pruebas, la incertidum-

Figura 3. Diagrama de bloques del sistema de puesta a cero y calibración internas de los sensores de potencia de banda ancha N1921A/22A serie P



bre de las medidas y el desgaste de los conectores. Además, resulta especialmente útil en entornos de fabricación y pruebas automatizadas.

El dispositivo de referencia de voltaje de precisión posee una precisión inicial de ± 3 ppm. Tras aplicar una atenuación y pasar por los búferes, dicha precisión se estabiliza en ± 500 ppm ($\pm 0,05\%$). Esta cifra supera con creces la precisión de 0 dBm a 50 MHz que suele obtenerse con la mayoría de los instrumentos de medición de potencia. El nuevo instrumento de medición de potencia N1911/2A posee una especificación de precisión de $\pm 0,4\%$ (25 ± 10 °C) y $\pm 1,2\%$ ($0 - 55$ °C) respectivamente. Por lo tanto, además de eliminar la incertidumbre por disparidad de impedancias existente entre el sensor y la referencia de potencia, esta calibración interna proporciona al proceso de calibración una mayor precisión.

Los sensores de potencia N1921/2A no necesitan para su calibración el calibrador externo incorporado en los medidores de potencia N1911/2A (éste se incluye en los instrumentos de medición de potencia utilizados para calibrar los sensores actuales de Agilent), por lo que si se siguen conectando a este dispositivo se contará con una manera de comprobar la integridad del circuito del detector y del conector. Sin embargo, este método tiene sus limitaciones ya que no sirve para garantizar que el sistema esté funcionando con la máxima precisión en todo su rango de valores de funcionamiento.

¿Cuáles son los errores que puede detectar el proceso de calibración?

La mejor manera de explicarlo es a través de varios ejemplos:

Es posible que un sensor de potencia haya estado expuesto a una potencia de entrada superior a

su valor nominal máximo (umbral de daño físico), lo que puede haber ocasionado varios efectos:

- El atenuador interno del sensor situado frente al detector puede haber sufrido una avería que impide la propagación de potencia de RF al detector. Este fallo puede detectarse efectuando una calibración de usuario o bien, en el caso del sensor de potencia Serie P, realizando una medición en una fuente apropiada de valor conocido (por ejemplo, un calibrador).

- Es posible que el detector se haya visto sometido a condiciones límite que hayan provocado un fallo catastrófico o su desgaste prematuro. El fallo catastrófico puede detectarse conectándolo a una fuente de valor conocido. Sin embargo, los efectos de desgaste pueden ser más leves y difíciles de detectar inmediatamente, ya sea mediante una calibración de usuario o utilizando una fuente apropiada de valor conocido.

- En el caso de un termopar, si se supera la potencia máxima, puede que el "factor de escala" del sensor se vea modificado. Aunque esto puede corregirse repitiendo la calibración de usuario, lo más probable es que disminuya la vida útil del sensor.

La configuración combinada de sensor y medidor de potencia se utiliza en una gran variedad de situaciones y entornos, algunos de los cuales requieren varias conexiones y desconexiones, como es el caso de las calibraciones del sistema y las pruebas de instalación. Una conexión y desconexión reiterada puede provocar un desgaste excesivo de los conectores. El impacto de este desgaste puede manifestarse de dos maneras distintas:

- Como una degradación del coeficiente de ondas estacionarias (VSWR) del sensor, lo cual provoca una mayor incertidumbre por disparidad de impedancias.

- Como una modificación del acoplamiento de radiofrecuencia con el circuito detector, que puede llegar a invalidar los factores de corrección aplicados. Por lo tanto, aunque la medida pueda seguir pareciendo exacta a 50 MHz, con un calibrador el efecto a distintas frecuencias puede ser muy importante.

Para transferir los estándares de los conectores a un plano de referencia se utiliza un kit de calibración para analizadores de redes y hay que tener cuidado, no sólo de no apretar demasiado una conexión, sino también de que el conector del dispositivo sometido a prueba esté en buen estado y no provoque ningún daño en el conector del instrumento. El mismo cuidado habrá que tener con un sensor de potencia cuando se utilice para transferir la exactitud de potencia a un dispositivo bajo prueba.

Conclusión

La función de calibración y puesta a cero internas para sensores y medidores de potencia de los dispositivos de Agilent evita la conexión reiterada a una fuente de calibración externa, lo cual se traduce en una menor incertidumbre en las mediciones, un menor desgaste de las conexiones y una menor duración de las pruebas. Todas las tecnologías de detección de potencia de RF requieren algún tipo de corrección para conseguir una precisión óptima en las mediciones de potencia.

La calibración de usuario de un sensor (ya sea utilizando una fuente interna o externa) no garantiza la validez de las correcciones aplicadas con posterioridad ni la exactitud global de la medición. Esto se consigue cuando la calibración va unida a una caracterización precisa (cuando se generan los factores de corrección) y cuando el sensor y su interfaz de RF se utilizan y manipulan con cuidado.