

# Los modernos analizadores de redes vectoriales ante la medida de radiofrecuencias y microondas

Por David Ballo

David Ballo División de pruebas de componentes de Agilent Technologies

*La necesidad de caracterizar con precisión el rendimiento lineal y no lineal de componentes de alta frecuencia, junto a la tendencia hacia una mayor integración de subsistemas, está cambiando la forma de comprobar los dispositivos de radiofrecuencias y microondas. Este artículo aborda estas cuestiones en mayor profundidad y analiza la adaptación que están experimentando los analizadores de redes vectoriales (VNA) al incorporar un segundo generador de señales internas y ampliar los puertos del sistema de prueba. Asimismo, describe los progresos realizados en la calibración de VNA que permiten mantener la precisión asociada con las medidas del parámetro S de dos puertos.*

## Importancia de la precisión en medidas lineales y no lineales para una correcta simulación del sistema

La obtención de medidas de magnitud y fase precisas de los componentes de radiofrecuencia (RF) es fundamental en los modernos sistemas inalámbricos y aeroespaciales y de defensa (A/D). En la fase de diseño, las simulaciones del sistema requieren datos precisos de caracterización de los componentes subyacentes para verificar que el sistema funciona totalmente de acuerdo con sus parámetros de diseño. Durante la fabricación, el uso de medidas precisas garantiza que cada componente cumple las especificaciones publicadas. Los componentes básicos de los sistemas de radiofrecuencia son dispositivos que suelen medirse habitualmente, como filtros, amplificadores, mezcladores, antenas, aisladores y líneas de transmisión.

Las medidas de los componentes de RF más utilizadas son los parámetros de dispersión, co-

nocidos simplemente como parámetros S. Estos parámetros caracterizan el complejo rendimiento de reflexión y transmisión (magnitud y fase) de los dispositivos de RF, en los sentidos directo e inverso. Los parámetros S describen plenamente el comportamiento lineal de los componentes de RF, algo necesario, pero no suficiente, para la simulación completa del sistema. La desviación respecto al rendimiento lineal ideal en forma de amplitud no plana frente a frecuencia y de fase de pendiente no constante frente a respuestas de frecuencia puede ocasionar un grave deterioro del sistema.

Los sistemas también pueden verse afectados por el rendimiento no lineal de los componentes de RF. Por ejemplo, los amplificadores presentan compresión de ganancia, conversión de modulación de amplitud a modulación por fases (AM a PM) y distorsión de intermodulación (IMD) si se excitan a niveles de potencia que superan su rango lineal. Es esencial medir también estas características.

El instrumento que más se utiliza para caracterizar componentes de RF es el analizador de redes vectorial (VNA). En este caso, el término "red" se refiere a redes eléctricas, no informáticas. Tradicionalmente, los VNA contenían un generador de señales de RF que se utilizaba como estímulo y múltiples receptores de medida que medían las señales incidentes, reflejadas y transmitidas, tanto en sentido directo como inverso. Los VNA tradicionales incorporaban dos puertos de prueba, ya que la mayoría de los dispositivos sólo tenían uno o dos puertos. Los dispositivos de medida con más de dos puertos obligaban a mover cables y terminales de prueba por los puertos del dispositivo sometido a prueba (DUT) hasta que se medían todos los puertos. Más

adelante analizaremos alternativas más válidas que este sistema.

Los VNA miden los parámetros S mediante el barrido de frecuencias a un nivel fijo de potencia y también miden la compresión de ganancia del amplificador mediante un barrido de potencia a un nivel fijo de frecuencia. De este modo, caracterizan el rendimiento lineal y no lineal simple. Los nuevos VNA con dos generadores de señales de RF incorporados también miden IMD, algo que anteriormente se realizaba con dos generadores de señales independientes y un analizador de espectro. El sistema basado en VNA ofrece una configuración más sencilla, con tiempos de medida más rápidos y mayor precisión. Un ejemplo de estos VNA de nueva generación con dos fuentes de RF internas es el nuevo analizador de redes PNA-L N5230A de 13,5 GHz con la Opción 146.

## Uso generalizado de dispositivos multipuerto en la actualidad

Los sistemas modernos de RF contienen actualmente muchos dispositivos que incorporan tres o cuatro puertos, y está aumentando el uso de dispositivos con ocho o más puertos. Dos son las tendencias que han originado este aumento en el número de puertos en los dispositivos: el uso generalizado de componentes balanceados y el aumento de los niveles de integración de subensamblaje, como los módulos de entrada que se encuentran en los teléfonos móviles actuales.

Los circuitos balanceados ofrecen ventajas considerables, ya que reducen la generación y la susceptibilidad a las interferencias electromagnéticas. Los componentes balanceados pueden presentarse en forma de dispositivos

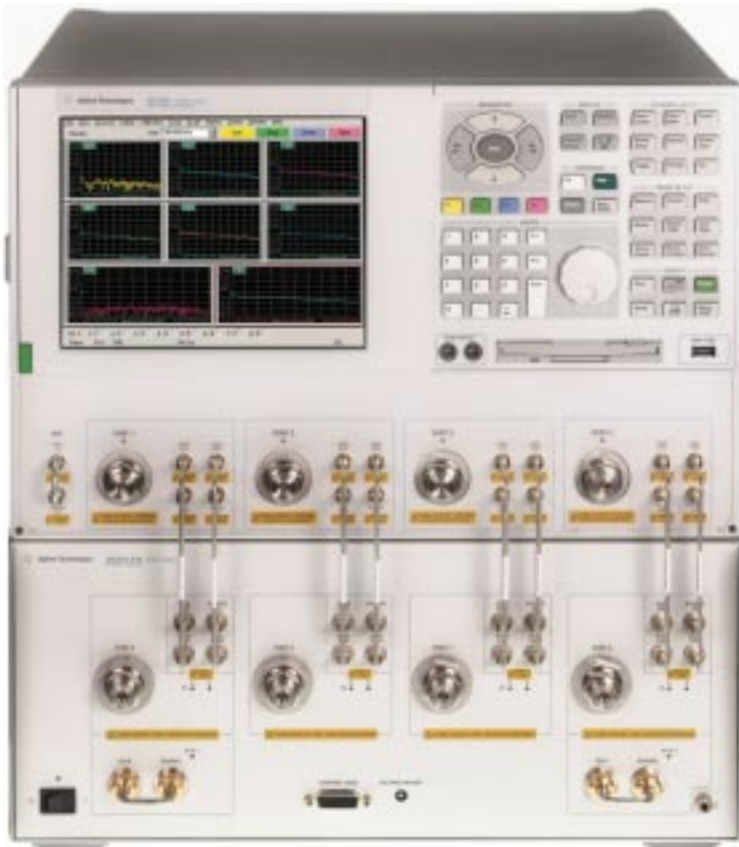


Figura 1

GHz para evitar que produzcan interferencias en otras bandas de frecuencia.

Con el fin de satisfacer la doble necesidad de un alto número de puertos y de pruebas de alta frecuencia, el número de puertos de los VNA puede ampliarse añadiendo un terminal de pruebas externo que contenga conectores adicionales para puertos de prueba y acopladores direccionales, así como los conmutadores necesarios para permitir una perfecta integración con el VNA. De este modo, pueden crearse soluciones de prueba que ofrezcan un elevado número de puertos con capacidad para medir rutas entre cualquier combinación de pares de puertos, y que incluyan rutinas de corrección de errores que eliminen los errores sistemáticos de todos los puertos y rutas de prueba. Un ejemplo de este tipo de productos es el analizador de redes PNA-L N5230A de Agilent con la Opción 145, combinado con el terminal de pruebas K44 Z5623A, que proporciona un sistema de pruebas de ocho puertos y 13,5 GHz (Figura 1). Agilent también ha lanzado recientemente una solución de doce puertos y 20 GHz basada en un analizador de redes PNA-L N5230A con la Opción 225 y el terminal de pruebas U3022AE10.

### La integración de dos fuentes de RF simplifica las medidas de amplificadores y mezcladores

Aunque un VNA sólo necesita una fuente de RF para medir parámetros S, compresión de ganancia y armónicos de componentes, el uso de una segunda fuente interna resulta muy útil para obtener medidas no lineales más complicadas, como IMD, y para comprobar mezcladores y conversores de frecuencias de manera eficaz.

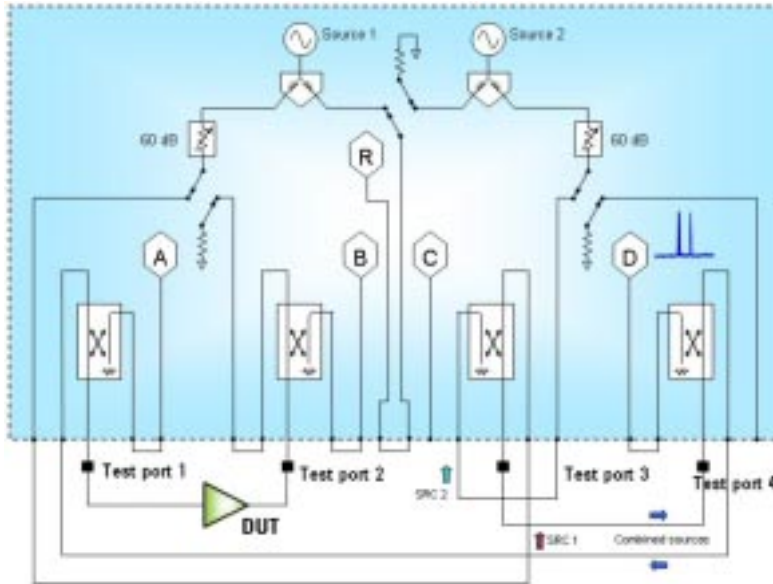
balanceados a unipolares con tres puertos de RF o en forma de dispositivos balanceados a balanceados con cuatro puertos de RF. Los VNA de cuatro puertos son frecuentes en la actualidad y pueden medir fácilmente circuitos balanceados hasta 67 GHz. Estos VNA deben ser capaces de medir las respuestas en modo diferencial y común de los dispositivos balanceados, así como los términos de conversión entre modos.

El mayor nivel de integración es un factor importante en la difusión de dispositivos con un elevado número de puertos. En el sector de la telefonía móvil, puede apreciarse esta situación tanto en los terminales móviles como en las estaciones base. Los teléfonos multibanda que funcionan en varias bandas de frecuencia y pueden incluir funcio-

nes no telefónicas, como GPS o Wi-Fi, presentan a menudo módulos de entrada integrados que incluyen una o dos entradas de antena y múltiples conmutadores, duplexores, filtros y amplificadores, todos ellos integrados en un sustrato común. En cuanto a las estaciones base, a menudo se integran duplexores y amplificadores de bajo ruido en unidades de combinador/divisor con muchos puertos de RF.

Cuando se miden dispositivos de este tipo, el límite superior de frecuencias de prueba suele ser mucho más alto que la banda de operación deseada, ya que la industria impone la necesidad de medir el rendimiento fuera de banda. Por ejemplo, los componentes de telefonía móvil que operan por debajo de 2 GHz se comprueban a menudo hasta 12,5

Figura 2



Para realizar medidas de IMD se suman dos señales (a menudo denominadas “tonos”, como en intermodulación de dos tonos) empleando un combinador de señales, como un splitter de potencia resistiva o un acoplador direccional, y luego se enrutan a la entrada del amplificador sometido a prueba (AUT). En la Figura 2 se muestra un ejemplo de cómo se lleva a cabo este procedimiento

utilizando un VNA de cuatro puertos. Debido a las no linealidades del AUT, los productos de intermodulación aparecen en la salida del amplificador junto a las dos señales de entrada amplificadas. En sistemas de comunicaciones, estos productos no deseados se encuentran en la banda de frecuencias de operación deseada y, por tanto, no se pueden eliminar mediante filtros. Aunque en teoría

existe una serie infinita de productos de intermodulación, generalmente sólo se miden los productos de tercer orden, ya que son los que más afectan a la reducción de la calidad del sistema. La diferencia de frecuencias entre las dos señales de entrada determina dónde estarán los productos de intermodulación de tercer orden. Por ejemplo, si las dos señales de entrada se encuentran en 1,881 GHz y 1,882 GHz, la señal de IMD inferior estará en 1,800 GHz, y la señal de IMD superior, en 1,883 GHz.

La Figura 3 muestra un ejemplo de medida de IMD realizada en un VNA. El gráfico superior muestra el barrido que se realizaría empleando un analizador de espectros. Este método es conocido e intuitivo, pero recoge datos innecesarios, lo que supone un aumento del tiempo de prueba. El gráfico inferior muestra un método más conveniente, en el que los datos se recogen fundamentalmente para los productos de IMD y las dos señales de prueba.

El uso de un VNA para estas medidas ofrece dos ventajas significativas sobre otros métodos. En primer lugar, con un único instrumento de prueba y un solo juego de conexiones es posible conseguir una serie completa de medidas: parámetros S, compresión de ganancia, armónicos de salida e IMD. En segundo lugar, al aprovechar las calibraciones basadas en medidores de potencia del VNA, la precisión de estas medidas es muy superior a la que se obtiene con un analizador de espectros.

También resulta muy deseable disponer de una segunda fuente interna en un VNA para comprobar dispositivos de conversión de frecuencias, como mezcladores o convertidores, ya que estos dispositivos requieren una señal adicional del oscilador local (LO), especialmente en pruebas de LO de barrido, donde se realiza el barrido

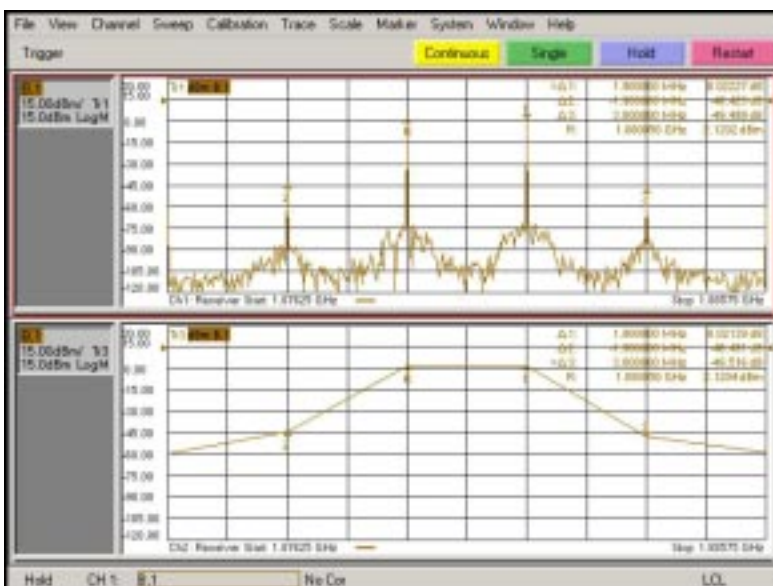


Figura 3

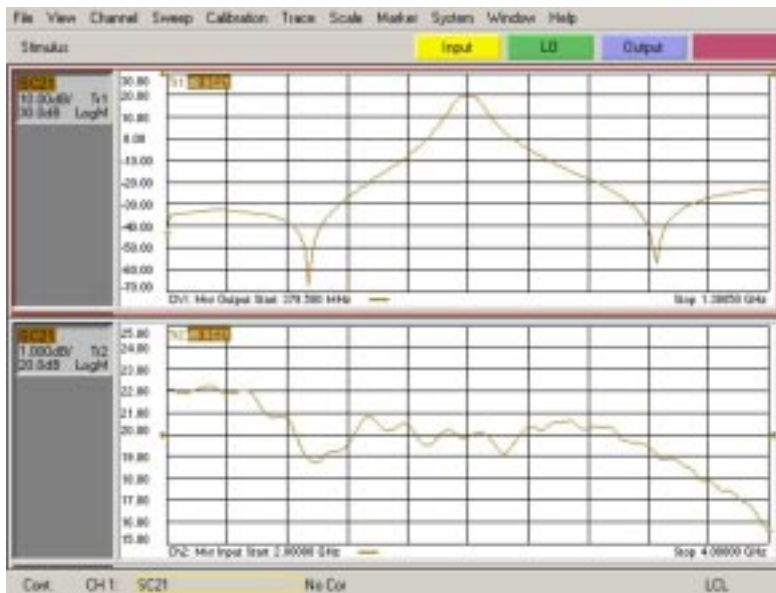


Figura 4

do de la señal del LO junto con la señal de entrada de RF, pero con un valor de desviación fijo. Este tipo de pruebas es común para que los convertidores de frecuencias de banda ancha midan la respuesta de frecuencia de los componentes de entrada del convertidor. El uso de una señal del LO obtenida de un generador interno de señales del VNA proporciona un aumento considerable de la velocidad. Por ejemplo, en comparación con el uso de un generador avanzado de señales PSG externo de Agilent, el N5230A con la Opción 246 puede aumentar hasta 35 veces la velocidad de barrido de las medidas de LO de barrido. La Figura 4 muestra una medida en un convertidor de frecuencias de una etapa. El gráfico superior ilustra una medida de LO fijo que muestra la respuesta de frecuencia del filtro de IF del convertidor. El gráfico inferior ilustra una medida de LO barrido que muestra la forma plana de entrada del convertidor.

Agilent ofrece también rutinas avanzadas de corrección de errores diseñadas específicamente para medidas de mezclador y con-

vertidor. Estas rutinas minimizan el rizado de desadaptación de las medidas de pérdida o ganancia de conversión corrigiendo la desadaptación que se produce en la frecuencia de entrada entre la adaptación de entrada del DUT y la adaptación de la fuente del sistema de prueba, así como la desadaptación que se produce en la frecuencia de salida entre la adaptación de salida del DUT y la adaptación de carga del sistema de prueba. También se ha desarrollado una técnica similar para realizar medidas absolutas de bajo rizado de retardo de grupo de mezclador y convertidor.

### Los sistemas de prueba multipuerto combinan alta velocidad de prueba con una gran precisión

Los sistemas de prueba multipuerto permiten realizar muchas medidas con un único conjunto de conexiones a un DUT multipuerto, lo que supone una importante mejora en los tiempos de prueba en comparación con el uso

de un VNA tradicional de dos puertos. Los primeros sistemas de prueba multipuerto basados en VNA eran sencillas matrices de conmutadores colocadas delante de los puertos de prueba del VNA. A pesar de que este sistema es sencillo y rentable, no proporciona el alto rendimiento a frecuencias elevadas que a menudo requieren los dispositivos modernos. Un método más conveniente consiste en utilizar terminales de pruebas con acopladores direccionales en cada puerto de prueba. Los conmutadores necesarios para devolver las señales al VNA se sitúan entre los acopladores y los receptores del VNA. Este tipo de terminales de prueba ofrece una mejor sensibilidad y una mayor estabilidad, dos atributos que se agradecen especialmente para medidas en frecuencias de microondas.

Los conmutadores del terminal de pruebas pueden ser electrónicos o mecánicos. Los conmutadores electrónicos tienen dos ventajas: mayor velocidad de conmutación y vida útil ilimitada, pero tienen más pérdida y su capacidad de potencia es limitada. Además, suelen ser más caros y más difíciles de utilizar con doce o más puertos de prueba. Los conmutadores mecánicos ofrecen las mejores características de RF: baja pérdida y alta capacidad de potencia. También suelen ser más económicos que los conmutadores electrónicos. La principal desventaja de los conmutadores mecánicos es que sus contactos tienen una vida útil limitada. Si bien los conmutadores de alta fiabilidad suelen estar garantizados para 5 millones de ciclos o más, las aplicaciones de fabricación en grandes volúmenes pueden agotar estos conmutadores en menos de un año. Agilent ofrece terminales de pruebas basados en conmutadores electrónicos y mecánicos. La selección depende del rango de frecuencias, del nú-



mero de puertos y de la aplicación. Muchos terminales de pruebas tienen conmutadores adicionales que permiten la conexión de otros componentes, como combinadores de señales, o de otros equipos de prueba, como analizadores de la figura de ruido. Estos conmutadores adicionales aumentan considerablemente la flexibilidad del sistema de prueba global.

La corrección de errores en sistemas de prueba multipuerto es una parte fundamental de la solución completa. Las rutinas básicas de calibración de VNA corrigen todos los errores sistemáticos de la ruta sometida a prueba. En un entorno multipuerto, la adaptación de carga de los puertos de prueba que no se encuentran en la ruta específica que se está midiendo puede producir un error de medida significativo. Cuanto mayor sea el número de puertos de prueba, mayor será la posibilidad de error. El índice de error que se produce está relacionado con el aislamiento entre los puertos del DUT. Los VNA modernos tienen capacidad para corregir la degradación del rendimiento que causan todos los puertos de prueba, con independencia de qué puertos se encuentren en la ruta de medida. Es lo que se denomina corrección de errores en N puertos, donde N es el número de puertos del DUT y el sistema de prueba. La corrección de errores en N puertos proporciona la mayor precisión, pero a costa de un mayor número de barridos y de una ralentización del tiempo de prueba. Los dispositivos con bajo aislamiento entre puertos o con aislamiento alto pero que debe verificarse por medida suelen requerir corrección de errores en N puertos. Algunos ejemplos son: splitters, híbridos, conmutadores y combinaciones de aislador/multiplexor.

Una aplicación emergente que requiere corrección de errores en N

puertos es la medida de la diafonía de estructuras o conectores de la capa física en conexiones de redes digitales, y la medida de la diafonía de cables multiconductores de interconexión de redes. Por ejemplo, un par de líneas de transmisión diferencial es esencialmente un dispositivo de ocho puertos. En medidas de telediafonía (FEXT) se simula un extremo de una línea diferencial y se mide la respuesta en el otro extremo de la línea diferencial. La adaptación de carga de los cuatro puertos de prueba que no se utilizan en la medida de FEXT pueden ocasionar un error considerable si no se aplica la corrección de errores en N puertos. También se realizan medidas de diafonía similares en un punto de línea diferencial "víctima" entre dos líneas diferenciales "agresoras" adyacentes. Estas medidas requieren sistemas de doce puertos y corrección de errores en doce puertos. A menudo, las pruebas avanzadas de la capa física requieren comprobaciones de hasta 50 GHz y, en algunos casos, hasta 67 GHz.

Para mejorar los tiempos de medida, los dispositivos multipuerto se comprueban con frecuencia como varios grupos de medidas de M puertos y calibraciones en M puertos, donde  $M < N$ . Por ejemplo, los módulos de entrada para terminales móviles se comprueban a menudo midiendo únicamente tres o cuatro puertos cada vez, incluso aunque el módulo de entrada tenga un total de ocho o más puertos. Esto se debe a que hay suficiente aislamiento entre los componentes de una banda de frecuencias y los componentes de otra. En este ejemplo, la corrección de errores en tres o cuatro puertos es suficiente. En un sistema de pruebas multipuerto es altamente deseable tener flexibilidad para elegir un nivel de corrección de errores que se ajuste al DUT.

## Conclusión

Los sistemas de pruebas basados en VNA proporcionan el dispositivo de medida central para los componentes de radiofrecuencia y microondas que se utilizan actualmente en los sistemas de A/D y comunicaciones inalámbricas, y a nivel de la capa física de redes. El uso de dos generadores de señales incorporados simplifica y acelera las medidas de amplificadores, mezcladores y convertidores, al tiempo que mantiene la alta precisión asociada con los VNA. Para comprobar amplificadores pueden utilizarse las fuentes para medir parámetros S, compresión de ganancia y armónicos, y para generar las señales necesarias para medir IMD. Para comprobar mezcladores y convertidores, uno de los generadores de señales se utiliza para la señal de entrada al mezclador o convertidor, mientras que el otro se utiliza para proporcionar una señal de LO. Las medidas de LO fijo y de LO barrido pueden realizarse con un solo conjunto de conexiones.

Aunque los VNA de cuatro puertos son comunes ahora, el aumento de los niveles de integración está incrementando la necesidad de sistemas de prueba con ocho o más puertos de prueba. Esto se obtiene fácilmente combinando un VNA con un terminal de pruebas externo compuesto por conmutadores, acopladores y puertos de prueba adicionales. La precisión a la que se han acostumbrado los usuarios de VNA con corrección de errores de dos puertos se ha ampliado a estos sistemas de prueba multipuerto mediante el uso de corrección de errores en N puertos. El nivel de corrección de errores puede seleccionarse para optimizar la precisión de medida global y los tiempos de prueba para cualquier dispositivo específico.