

# Mediciones con analizadores vectoriales de redes de altas prestaciones en entornos de I+D y producción

Por Steve Reyes

**Anritsu**

www.eu.anritsu.com



Steve Reyes es el Director de Marketing de productos (Product Marketing Manager) de Analizadores vectoriales de redes (VNA) de la División de Medición por microondas de Anritsu. Steve lleva más de 20 años diseñando y comercializando equipos de pruebas por microondas, y formó parte del equipo de lanzamiento de productos de la empresa Wiltron que puso en el mercado el modelo VNA 360. Ha dado numerosas conferencias e impartido talleres sobre pruebas y mediciones por microondas, como mediciones de potencia y técnicas de carga de salida, para diversos talleres de RF organizados por el Automatic Radio Frequency Techniques Group (ARFTG) y el National Institute of Standards and Technology (NIST). Steve cuenta con titulaciones académicas otorgadas por la Davis and Santa Clara University, University of California.

*A medida que las redes de comunicaciones inalámbricas están cada vez más atestadas de usuarios, la realización de un análisis exacto de todos los enlaces de la cadena de canales de comunicaciones adquiere cada vez más importancia. Desde la modelización de dispositivos activos a nivel de oblea hasta la verificación de un enlace de comunicaciones vía satélite, los analizadores vectoriales de redes (VNA) ofrecen una amplia gama de capacidades de medición y son una herramienta esencial para el ingeniero de RF y microondas. Los VNA proporcionan mediciones de altas prestaciones y muy exactas debido a su excelente gama dinámica y estabilidad de frecuencia, y a su capacidad para proporcionar información de fase, así como de magnitud. La precisión de las mediciones del VNA depende de la calidad y del cuidado puesto durante el proceso de calibración del dispositivo.*

El proceso de calibración del VNA consiste en la medición de patrones de impedancia y en la aplicación de algoritmos de corrección internos del VNA. Debido a que el proceso de calibración puede requerir mucho tiempo y ser difícil, los ingenieros se han visto obligados con frecuencia a elegir entre precisión y comodidad. Para conseguir una alta precisión, un ingeniero tiene que dedicar una cantidad considerable de tiempo y cuidados a la conexión de diversos patrones de impedancia. Unos ajustes apropiados de la profundidad de las patillas y del par, así como la limpieza de los conectores contribuyen al éxito del procedimiento de calibración.

Las especificaciones del comportamiento de los VNA se facilitan con una indicación del nivel de precisión que es posible alcanzar cuando se aplican kits y métodos de calibración específicos. El método de calibración más corriente utilizado para especificar el comportamiento del VNA utiliza la técnica Short Open Load Thru

[Corto, abierto, carga, bucle] (SOLT), junto con una carga deslizante. Las cargas deslizantes proporcionan el mejor comportamiento en cuanto a directividad, que determina la precisión global de las mediciones de reflexión. Sin embargo, las terminaciones de las cargas deslizantes son frágiles, especialmente cuando se utilizan conectores que funcionan a frecuencias más altas. Por lo tanto, se sacrifica con frecuencia la precisión utilizando terminaciones de cargas fijas más cómodas, con el resultado de un comportamiento degradado en directividad.

Los calibradores automáticos se diseñan para simplificar el procedimiento de calibración mediante la inclusión de patrones de impedancia dentro del módulo de calibración. Utilizando el módulo de calibración automática, los puntos de impedancia se conmutan automáticamente de un estado a otro durante el procedimiento de calibración. El resultado es un VNA totalmente calibrado que sólo requiere una conexión a cada puerto. El inconveniente de los calibradores electrónicos es que la precisión de la calibración es normalmente menor que la que se consigue utilizando técnicas SOLT con cargas deslizantes.

En este documento, se explicará una nueva técnica de calibración automática que proporciona una precisión mejor que la técnica SOLT con cargas deslizantes.

## Resumen del proceso de calibración

Una de las características importantes de un VNA es la capacidad de medir las características de banda ancha del dispositivo sometido a prueba (DUT). Debido a estas características, la precisión intrínseca no es óptima en el estado sin corregir. Por ejemplo, un acoplador diseñado para cubrir un intervalo de frecuencias estrecho se puede optimizar para proporcionar directividad hasta 50 dB. Sin embargo, si el acoplador se tiene que diseñar para que cubra varias octavas, entonces la directividad no corregida es el orden de 10 dB. La calibración mejora el comportamiento sin corregir a condiciones de banda casi estrecha.

La calibración es el proceso de aplicar un patrón perfectamente definido, tal como un cortocircuito perfecto (consulte la figura 1) y medir el dispositivo con un sistema sin calibrar. La diferencia es el resultado de la influencia de las señales

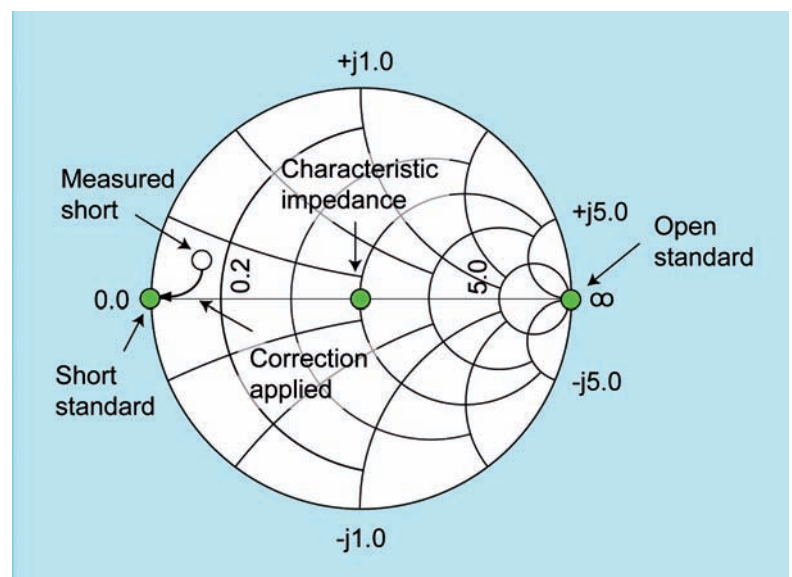


Figura 1.

de error dentro del VNA (por ejemplo, directividad, coincidencia de la fuente, coincidencia de la carga). El procedimiento se aplica a puntos de frecuencia definidos y a un nivel de potencia específico. El proceso de corrección resta los vectores de error identificados en cada punto de calibración durante el proceso de medición para mejorar el comportamiento sin corregir del VNA. La precisión resultante es la consecuencia de los errores residuales del proceso de calibración. Cuanto más exacta sea la definición del patrón, con mayor precisión se podrá mapear la carta de Smith durante el proceso de medición.

Para calibrar el VNA se utilizan distintos métodos. La elección se encuentra con frecuencia en el tipo de medio de transmisión en el que reside el DUT (como por ejemplo, oblea o coaxial) y en el tipo de patrones disponibles. El método más preciso es el LRL (Line Reflect Line) debido a que la impedancia de referencia se determina mediante la impedancia de línea. Para una línea aérea coaxial mecánica, la impedancia de línea se puede mecanizar con tolerancias muy estrechas y conseguir una impedancia característica de 50 ohmios con gran precisión. Como consecuencia de esto, se pueden conseguir con frecuencia directividades residuales de 50 dB.

El nivel siguiente de precisión conseguida por debajo del método LRL es la calibración SOLT (Corto, abierto, carga, bucle). La carta de Smith queda definida por los abiertos, los cortos y las terminaciones, que, además, proporcionan la información necesaria para una calibración precisa. Sin embargo, a medida que aumentan las frecuencias, el abierto (red abierta) se hace más difícil de definir con exactitud. Además, el comportamiento de la terminación se degrada a frecuencias más altas y a intervalos de frecuencias mayores. Un método de mejorar la directividad residual debida a limitaciones en la terminación consiste en utilizar un dispositivo llamado una carga deslizante. Una carga deslizante reposiciona la terminación a distintas longitudes eléctricas durante la calibración. El proceso de reposición proporciona múltiples puntos de

impedancia que en su momento definen un círculo cuyo radio está representado por el coeficiente de reflexión de la terminación para una frecuencia concreta. El centro del círculo, por lo tanto, define la impedancia característica real de la línea de transmisión. El error residual resultante depende de la calidad del dispositivo mecánico móvil y del nivel de habilidad del operador para ajustar una profundidad de las patillas precisa en la conexión del puerto de prueba.

En un esfuerzo por simplificar el proceso de calibración, se desarrollaron módulos de calibración automática, una técnica en la que fue pionera Anritsu a principios de la década de 1990, como una alternativa a la medición de patrones predefinidos. El concepto de calibrador automático se llama también un AutoCal. El módulo de calibración automática contiene múltiples puntos de impedancia distribuidos por el mapa de la carta de Smith. Si los puntos de impedancia dentro del módulo tienen estabilidad y repetibilidad excelentes, entonces los puntos de impedancia generados por el módulo pueden definirse mediante un archivo de datos asociado con un módulo de calibración específico. El resultado es un sistema de calibración que utiliza patrones de impedancia definidos como se ha mencionado anteriormente. Sin embargo, en lugar de confiar en pa-

trones definidos fijos (corto, abierto y terminación), la calibración utiliza información procedente de los puntos de impedancia medidos proporcionada por el módulo (consulte la figura 2). Como se ha descrito anteriormente, la diferencia entre la impedancia declarada y la medida se utiliza para identificar términos de error y completar el proceso de calibración.

El módulo de calibración automática sólo requiere una conexión en cada puerto de prueba y no requiere terminaciones deslizantes que son difíciles de conectar. Por lo tanto, la AutoCal se puede utilizar para calibrar rápida y fácilmente un VNA, eliminando al mismo tiempo la necesidad de múltiples conexiones de diversos patrones de dispositivos. El módulo de calibración automática resulta por tanto ideal para entornos de fabricación, en los que los operadores no tienen habilidad o entrenamiento suficientes para el uso de terminaciones deslizantes. El inconveniente hasta ahora ha sido que el proceso daba por resultado una calibración que era menos precisa que la conseguida con un proceso SOLT utilizando terminaciones deslizantes.

Un calibrador automático utiliza puntos de impedancia distintos de abiertos y cortos. Esto es debido a que la pérdida de inserción intrínseca de la calibración impide realizar mediciones precisas de abiertos y

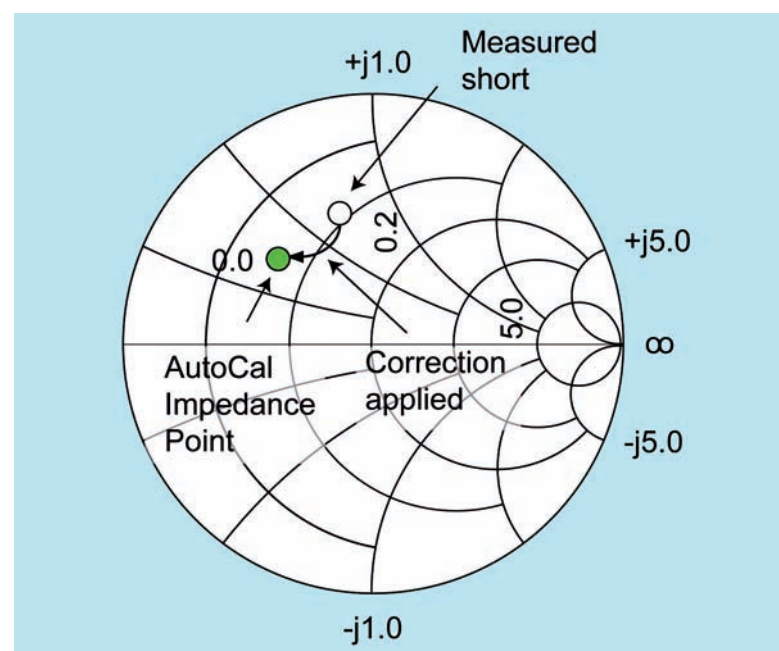
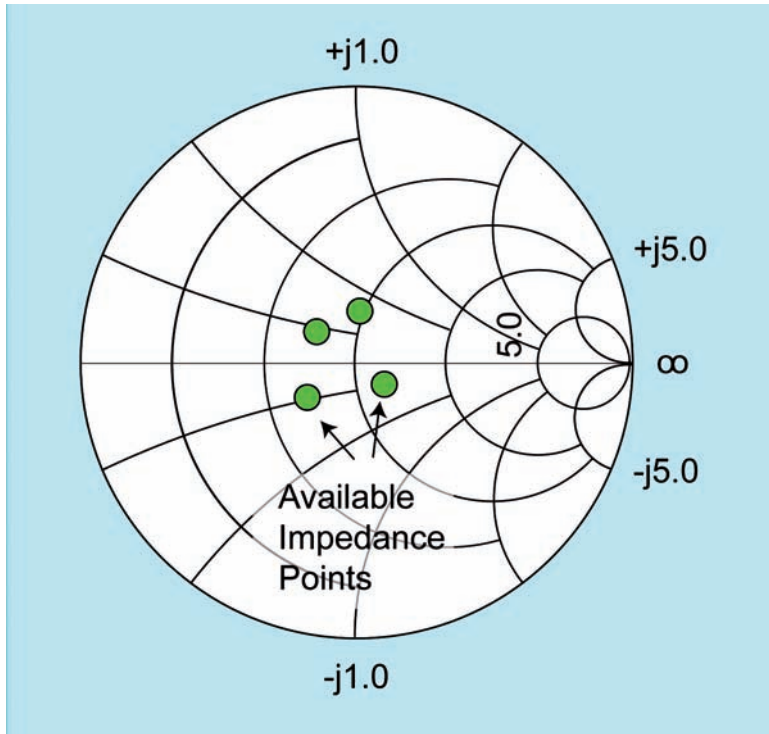


Figura 2.

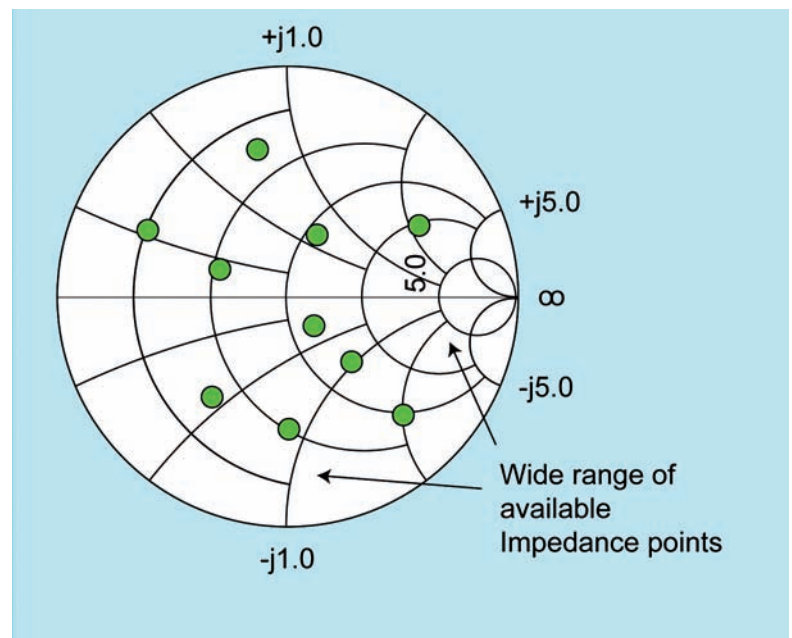
Figura 3



cortos. La pérdida de inserción es debida al hecho de que tiene que haber disponibles múltiples impedancias a través de interruptores, eliminando así la necesidad de múltiples conexiones. Como resultado de esto, un corto se parece más aún atenuador que a un corto. Con objeto de superar esta limitación, los calibradores automáticos tienen que proporcionar puntos de referencia de impedancia adicionales para poder calibrar correctamente el VNA. El problema es que cuantos más puntos de impedancia se proporcionan, más interruptores se necesitan y mayor es la pérdida de inserción. La figura 3 ilustra el problema cuando se intenta calibrar con un calibrador automático con una pérdida de inserción excesiva. Los puntos de impedancia se concentran en el centro de la carta de Smith y resulta difícil mapearlos correctamente.

Otra consecuencia de una pérdida de inserción alta en un calibrador automático es la calidad de la calibración thru (transmisión). Una calibración thru ideal requiere una conexión con pérdida cero y con retardo eléctrico cero. Si la calibración thru contiene demasiadas aproximaciones, entonces se resiente la calidad del seguimiento de la transmisión. Con frecuencia, esto

da por resultado la incapacidad de medir dispositivos de baja pérdida de inserción y puede dar lugar a que se muestre ganancia para dispositivos pasivos de baja pérdida.



Aunque esta limitación se puede superar midiendo la conexión thru real de los dos puertos de prueba, esto no es posible cuando se hace la calibración para un dispositivo no insertable. Esta situación se explicará con más detalle.

### El nuevo proceso simplifica el proceso de calibración y mejora al mismo tiempo la precisión

Anritsu ha introducido ahora un nuevo diseño de módulo calibrador automático que mejora la implantación de mediciones de impedancia es múltiples para conseguir precisiones mejores que con el método SOLT con cargas deslizantes. El nuevo módulo, llamado Precision AutoCal, utiliza un algoritmo sobredeterminado e incorpora tecnología de conmutación mejorada para poder mapear mejor la carta de Smith durante el proceso de calibración.

Aunque es posible producir muchos estados de impedancia utilizando métodos anteriores de conmutación, el resultado es deficiente. La baja pérdida de inserción en el Precision AutoCal se consigue utilizando una combinación de nueva tecnología híbrida conmutada y Conmutación secuencial (paso a paso). El método de Conmutación secuencial (paso a

paso) minimizar el número de conexiones conmutadas mejorando por lo tanto la pérdida de inserción entre puertos, especialmente a las frecuencias más altas. La figura 4 muestra cómo una pérdida de inserción utilizando tecnología híbri-

Figura 4

da y Conmutación secuencial (paso a paso) proporciona la posibilidad de cubrir una zona más amplia de la carta de Smith para conseguir una calibración y una precisión mejores.

La disponibilidad de un número mayor de estados de impedancia en la Precision AutoCal también proporciona otras ventajas. Con un gran grupo de estados entre los que elegir, el algoritmo de calibración puede seleccionar los estados que proporcionan una distribución mejor del cambio de impedancia a medida que se barren las frecuencias. Esto es especialmente importante cuando se intenta calibrar en un amplio intervalo de frecuencias. Debido al gran número de estados de impedancia disponibles, la Precision AutoCal es capaz de calibrar el VNA VectorStar en todo su intervalo de frecuencias de 70 kHz a 70 GHz. Proporcionar de 5 a 8 patrones de reflexión útiles en cada puerto a través de todo el intervalo de calibración, también ayuda a evitar problemas de parásitos durante la calibración. Y múltiples estados thru (transmisión) ofrecen la posibilidad de incorporar un esquema iterativo de coincidencia de carga para mejorar todavía más la calibración del seguimiento de la transmisión.

Ahora que es posible producir un módulo de calibración automática con baja pérdida de inserción de un elevado número de puntos de referencia de impedancia, el factor limitativo en la caracterización del módulo está en el uso de calibraciones SOLT. Con el potencial de mejorar la precisión más allá de la que se puede conseguir con el método SOLT con cargas deslizantes, se requiere un método mejorado de caracterización. La solución es el uso de un VNA que se haya calibrado utilizando la técnica LRL. Puesto que las calibraciones LRL son mejores que las SOLT, el uso de VNA calibrados con la técnica LRL para medir los puntos de impedancia dentro del AutoCal proporciona las mediciones de impedancia característica más altas posibles para uso en la generación del archivo de referencia de AutoCal.

## Ejemplos de configuración de la calibración

Otra ventaja de los módulos de calibración automática es su capacidad para calibrar el VNA para dispositivos insertables y no insertables. Puesto que el módulo de calibración puede hacerse en cualquier disposición de configuración de conectores, un módulo puede calibrar puertos de prueba de VNA para un DUT con conectores macho/hembra, macho/macho o macho/hembra. Para el caso de una configuración macho/hembra (llamada también una configuración insertable) los puertos de pruebas se pueden conectar directamente. Recuérdese que el módulo de calibración automática típico (con alta pérdida de inserción) limita la precisión de la calibración del seguimiento de la transmisión. El mejor método para superar esta limitación consiste en conectar directamente los puertos de prueba del VNA durante la etapa de calibración thru (transmisión). Esto proporciona las mejores condiciones para la calibración thru.

Aunque los módulos de calibración tradicionales se pueden configurar para DUT no insertables (por ejemplo, macho/macho o hembra/hembra), obsérvese que la calibración thru tiene que ser realizada por el módulo ya que los puertos de prueba no se pueden

conectar directamente. Aunque sería posible utilizar un adaptador para realizar la calibración thru sin el módulo, la inclusión de un adaptador introduce errores adicionales ya que no es una pérdida cero/longitud thru eléctrica cero ideal. Y aunque es técnicamente posible proporcionar algún tipo de archivo de caracterización que describa el adaptador durante la calibración thru, hay que tener en cuenta que el adaptador es por sí mismo un dispositivo no insertable y que, por lo tanto, tiene que medirse con un VNA calibrado en un entorno no insertable.

Una manera de superar esta limitación es utilizar un algoritmo de calibración SOLR en el cual el thru no esté bien definido. En lugar de eso, el thru tiene que ser un dispositivo recíproco con algún conocimiento de la longitud del dispositivo, usualmente dentro de media longitud de onda a la frecuencia más alta. La calibración resultante no será tan buena como cuando se utiliza un thru perfecto, pero será mejor que si se añade simplemente un adaptador sin caracterización o con una caracterización incorrecta.

Otro intento de mejorar la calibración de una configuración no insertable es el uso de Componentes insertables de igual fase (PEI). Los PEI son adaptadores de igual fase de distintas configuraciones. Durante el proceso de calibración se utiliza la configura-

Figura 5.




ción correcta para el DUT insertable. Luego, cuando se necesita un thru, el puerto de prueba se cambia a una configuración insertable y entonces se mide el thru. Este método puede proporcionar buenos resultados hasta 20 GHz. Por encima de 20 GHz, la precisión de la calibración resultante se deteriora debido a la incoherencia de la pérdida de retorno de múltiples conexiones de diferentes adaptadores. La pérdida de retorno incoherente da por resultado una degradación de la coincidencia entre fuente y carga. Este método se utiliza con frecuencia para calibraciones SOLT.

La medición de dispositivos no insertables de baja pérdida de inserción es por lo tanto una de las mayores dificultades en las calibraciones de VNA. Por lo tanto, la ventaja de utilizar Precision AutoCal para conseguir una precisión de calibración mejor que la que se consigue con SOLT no sólo es aplicable a mediciones insertables sino que se extiende también a mediciones no insertables cuando se utilizan configuraciones macho/macho o hembra/hembra apropiadas. La figura 5 es un ejemplo de una medición de baja pérdida de una línea de transmisión aérea, que es una de las mediciones más difíciles, después de la calibración con la Precision AutoCal.

Y si no está disponible la versión correcta de Precision AutoCal, se puede utilizar una alternativa técnica y seguir consiguiendo excelentes resultados. La técnica utiliza el algoritmo de retirada del adaptador proporcionado por el VNA VectorStar que de-embede automáticamente los efectos de un adaptador añadido. La figura 6 demuestra el procedimiento de calibración. En primer lugar, se conecta el adaptador apropiado al módulo de versión macho/hembra. Obsérvese que debido a la configuración del adaptador, el conjunto de módulo y adaptador es reversible. Puesto que el módulo ha sido caracterizado en el puerto de prueba del módulo, la adición de un adaptador prolonga el puerto de prueba. Durante la configuración de la calibración, se proporciona entrada al VNA indicando a qué puerto está conectado el adaptador. El procedimiento de calibración de la retirada del adaptador es un proceso en dos pasos en el que se utilizan dos calibraciones completas. Después de la primera calibración, se gira el conjunto y se calibra por segunda vez. El proceso en dos pasos proporciona toda la información necesaria al VNA para medir con precisión las características del adaptador. Entonces, al terminar la calibración, el VNA VectorStar de-embede automáticamente los efectos

del adaptador. El resultado es una de calibración no insertable precisa utilizando un módulo de calibración insertable.

## Resumen

Conseguir calibraciones rápidas y precisas es algo que con frecuencia está en conflicto y es frecuente que sacrifique la precisión. Esto es debido a la dificultad de conseguir buenas calibraciones utilizando cargas deslizantes durante el proceso SOLT. Los módulos de calibración automática ofrecen un método rápido y sencillo de calibración que en el pasado no ha proporcionado precisiones al nivel de las se obtienen con el proceso SOLT. Un módulo de nuevo diseño, junto con una nueva generación de VNA, puede ofrecer ahora precisiones mejores que las que se obtienen con el proceso SOLT utilizando Precision AutoCal. 

*"Para realizar un pedido o solicitar una demostración puede contactar con la oficina de Anritsu en España llamando al tel. +34 904905761 y consiga un ejemplar de nuestro libro, Fundamentos del Análisis Vectorial de Redes, valorado en 50\$, por presenciar una demostración del NUEVO VectorStar MS4640A"*

Figura 6.

