

Un nuevo enfoque para las pruebas de convertidores de OL integrados

Por David Ballo



www.agilent.com

David Ballo trabaja para la división de pruebas de componentes de Agilent Technologies en Santa Rosa, California, donde ha acumulado 28 años de experiencia en medidas de RF y microondas. Después de licenciarse en ingeniería electrónica por la Universidad de Washington, Seattle, en 1980, pasó diez años en el ámbito de I+D trabajando en el diseño de circuitos analógicos y de RF en analizadores de espectro y vectores de señales. Desde entonces, ha trabajado en el desarrollo y presentación de seminarios y trabajos de investigación, y en la creación de notas de aplicación y artículos técnicos sobre una amplia variedad de temas relacionados con la medida de analizadores de espectro y de redes.

Tradicionalmente, no se han utilizado los analizadores de redes vectoriales para caracterizar el retardo de grupo de los transpondedores de satélite analógicos "bent-pipe", aunque ofrecen ventajas significativas en comparación con los métodos basados en analizadores de espectro. Esto es así principalmente a causa de la falta de acceso a las señales de RF o las bases de tiempo de los osciladores locales (OL) del transpondedor. En este artículo se describe una nueva forma de medir el retardo de grupo de los convertidores de OL integrados con los analizadores de redes PNA y PNA-X de Agilent, que permite mayores velocidades de medida y mejoras significativas de precisión en comparación con los métodos tradicionales.

Los analizadores de redes vectoriales (VNA) proporcionan medidas de parámetros S rápidas y precisas desde diversos dispositivos de RF y microondas. Los parámetros S son el núcleo de muchas medidas comunes, como ganancia, adaptación y retardo de grupo. Aunque tradicionalmente se han utilizado los parámetros S para dispositivos que no realizan translación de frecuencia como filtros, amplificadores y antenas, en los últimos años se han inventado métodos que extienden las medidas de los parámetros S a dispositivos de translación de frecuencia como mezcladores y convertidores. Es relativamente fácil medir mezcladores y convertidores cuando pueden proporcionarse osciladores locales (OL) externos al dispositivo sometido a prueba (DUT), o cuando los OL internos del DUT y el VNA pueden bloquearse en una base de tiempo común.

No obstante, para los DUT con OL integrados, cuando no hay acceso a la señal de RF o las bases de tiempo del OL interno, medir el retardo de grupo es especialmente difícil.

Desafíos del transpondedor de satélite

El tipo de convertidores más común con OL totalmente integrados es el transpondedor de satélite. Los transpondedores de satélite analógicos de conversión única se utilizan desde hace muchos años. El transpondedor toma una señal enviada al satélite desde una estación terrestre y la devuelve a la tierra a una frecuencia distinta. Esta arquitectura de conversión única tiene numerosas ventajas, y sigue utilizándose ampliamente hoy en día.

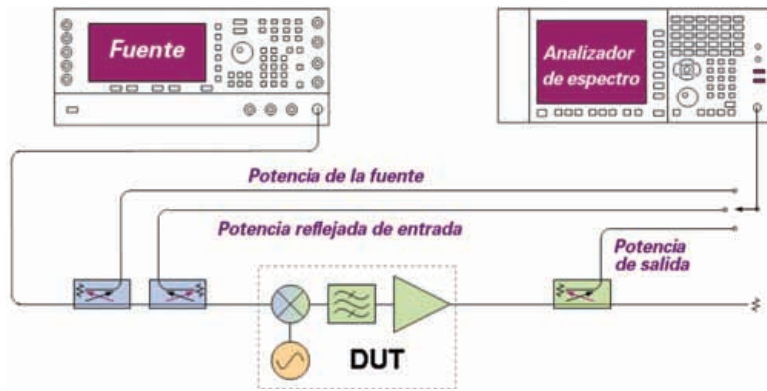
Para caracterizar estos transpondedores, se necesitan numerosas medidas clave. Primero, es necesario asegurarse de que el transpondedor tenga suficiente ganancia para elevar la señal para el largo trayecto de regreso a la tierra. A continuación se verifica la planitud de ganancia para asegurarse de que se mantenga la forma de la señal a lo largo de la banda de frecuencia. La linealidad de fase y de retardo de grupo a través del satélite también es muy importante para reducir la interferencia entre símbolos en señales moduladas digitalmente. Debe medirse la adaptación de puertos para asegurar el rizado de desadaptación mínimo cuando el transpondedor está conectado a cables y antenas. Por último, el valor de ruido también es un factor de mérito importante, ya que las pérdidas de trayecto de señal operativa son grandes, de modo que debe reducirse el ruido que aporta el receptor.

Para complicar más las cosas, estas medidas clave deben probarse en varias condiciones diferentes. En primer lugar, los transpondedores de satélite modernos deben probarse en múltiples bandas de frecuencia. Y dado que los satélites operan en condiciones ambientales muy duras en el espacio, debe

acumularse una amplia gama de datos de pruebas a temperaturas diferentes en tierra para determinar que está en condiciones de vuelo. Por último, para asegurar la mayor fiabilidad, los transpondedores suelen probarse en varias fases de su desarrollo, empezando a nivel de circuito, luego a nivel de módulo y finalmente a nivel de sistema. Dado que hay muchos parámetros que caracterizar en múltiples condiciones, probar transpondedores se convierte en una labor que lleva mucho tiempo y que produce grandes cantidades de datos. Por si el desafío fuera poco, a menudo muchas de estas pruebas se llevan a cabo en costosos escenarios exteriores, en zonas de pruebas interiores de alto montaje o, peor todavía, en instalaciones de vacío térmico (TVAC) que tienen un alto coste de utilización y que pueden tardar mucho en alcanzar las condiciones ambientales deseadas. Cuando estas pruebas se realizan cuando falta poco para terminar el satélite, hay muchos gastos de personal y materiales, de modo que es deseable finalizar el trabajo rápidamente para que el satélite pueda enviarse a la plataforma de lanzamiento y acelerar así el pago al fabricante. Esta presión se traduce directamente en la necesidad de alcanzar velocidades de medida más altas para capturar rápidamente las enormes cantidades de datos necesarios con el fin de asegurar el buen rendimiento del satélite.

Sistemas de prueba tradicionales

El método tradicional de prueba de los transpondedores de satélite analógicos se basa en un concepto sencillo. La prueba tradicional de estímulo/respuesta estimula el transpondedor de satélite con un generador de señales a las frecuencias adecuadas y mide la salida del transpondedor con un analizador de espectro.



Utilizando una fuente de señales, un analizador de espectro y acopladores direccionales (gráfico 1), se pueden realizar medidas escalares de ganancia de conversión y adaptación de impedancias a la entrada. Para medidas de retardo de grupo, normalmente se utiliza el método de retardo de envolvente, donde una portadora en AM o FM atraviesa la banda del transpondedor. La ventaja de este método es que no requiere coherencia de fase entre el sistema de pruebas y el DUT, de modo que no es necesario acceder a los osciladores locales internos del transpondedor. No obstante, el método tradicional de estímulo/respuesta presenta desventajas significativas. En comparación con el uso de un VNA, los tiempos de prueba son significativamente más largos. Además, la precisión se ve afectada, ya que la corrección de errores vectoriales (que se suele utilizar con los VNA) no está disponible con una combinación de fuente/analizador de espectro. El método de retardo de envolvente para medir el retardo de grupo suele dar resultados con ruido, que requieren promediado para mejorar la relación señal-ruido, a expensas de la velocidad de medida.

Por último, no se proporciona información de reflexión de vector en el sistema escalar tradicional. Las pruebas modernas de transpondedor suelen requerir medidas de S11 y S22, fácilmente realizadas por un VNA. Sin estos parámetros S, no pueden utilizarse las técnicas modernas de de-embedding usadas para eliminar los efectos de los cables y adaptadores de prueba. Esto puede suponer un gran problema cuando no puede llevarse a cabo la calibración en los puertos de prueba del DUT, como suele ocurrir en las instalaciones TVAC.

Uso de sistemas basados en VNA para caracterizar convertidores

Medir la ganancia de conversión y la adaptación de impedancias a la entrada y la salida del vector de los convertidores de OL integrados es fácil con los VNA modernos como los analizadores de redes de la serie PNA o PNA-X de Agilent. Con estos instrumentos, la fuente del estímulo y los receptores de medida pueden ajustarse independientemente, utilizando el modo de desviación en frecuencia (FOM) operativo del analizador. Este método es mucho más rápido que el sistema tradicional de estímulo/respuesta basado en una fuente y un analizador de espectro. La mejora de la velocidad se debe a la rápida sincronización de la fuente y los receptores en el barrido de frecuencias, en comparación con el uso de instrumentos controlados por un ordenador vía GPIB o LAN. Además,

los VNA llevan acopladores de prueba incorporados y pueden realizar medidas directas e indirectas, proporcionando el S11 y el S22 del DUT con una alta precisión gracias a la corrección de errores vectoriales.

Para medidas de transmisión escalar (ganancia), no es necesario acceder al OL del DUT. El ancho de banda FI del analizador debe ser lo suficientemente ancho para que la desviación en frecuencia del valor nominal del OL del DUT produzca errores mínimos. Con un barrido adicional, el valor de desviación puede medirse directamente si se desea, para que los receptores puedan ajustarse con mayor precisión a la frecuencia de salida del DUT y puedan utilizarse anchos de banda FI más estrechos para reducir el ruido.

Para medir la fase de transmisión (y el retardo de grupo) de un convertidor, hay que añadir al equipo un mezclador de referencia. El mezclador de referencia proporciona una señal al receptor de referencia del VNA que está a la misma frecuencia que la frecuencia de salida del DUT. De este modo puede medirse la diferencia de fase entre las señales de referencia y de prueba, proporcionando así información de frecuencia con respecto a la fase. El retardo de grupo se puede calcular fácilmente a partir de esta información de fase subyacente llevando a cabo una diferenciación de frecuencia finita.

En el gráfico 2 se muestra cómo se utiliza el mezclador de referencia con un instrumento como el PNA-X,

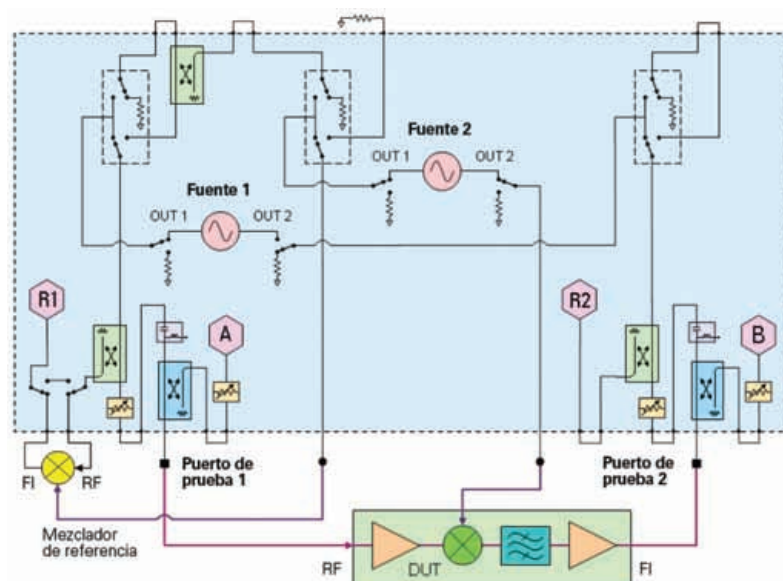


Figura 1. Método escalar tradicional de prueba de transpondedor utilizando un generador de señales y un analizador de espectro, además de acopladores y conmutadores externos.

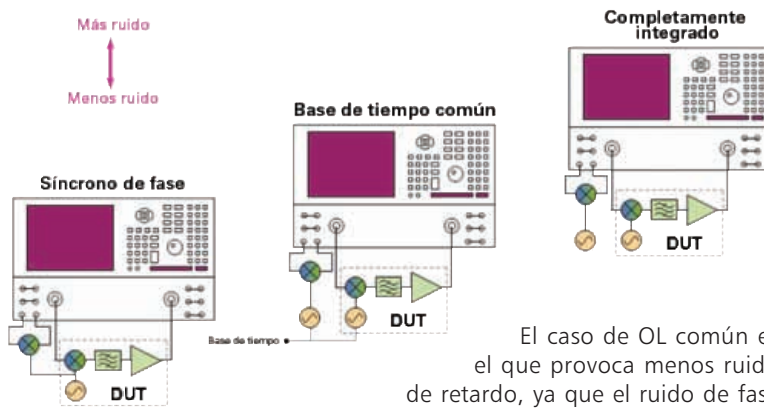
Figura 2. Al utilizar un VNA para medidas de retardo de grupo y fase de convertidores, se necesita un mezclador de referencia para proporcionar una señal de referencia que esté en la misma frecuencia que la salida del DUT.

para la medida de convertidores que no tienen OL integrados. El mezclador de referencia se coloca en el trayecto del receptor de referencia utilizando los puntos de acceso del panel frontal que están disponibles en la mayoría de los VNA modernos. El PNA-X puede simplificar la configuración de la prueba utilizando la fuente de señales secundaria incorporada de manera opcional para proporcionar las señales de OL. Esta solución es muy rápida, dado que las dos fuentes y los receptores se sincronizan con el hardware y el software internos del VNA.

to también de precisión) dependiendo del ruido de fase de los OL (gráfico 3). El mejor caso es el "síncrono de fase" o caso de OL común. Con esta configuración, hay acceso directo al OL interno, de modo que una parte de él puede utilizarse para controlar el mezclador de referencia. El siguiente mejor caso es cuando el OL en sí no está disponible, pero hay acceso a su base de tiempo, que puede bloquearse en una base de tiempo del OL del mezclador de referencia. El caso más difícil es un caso de integración total, que representa la mayoría de las situaciones de prueba de transpondedor.

los DUT con OL internos y acceso de base de tiempo, el mezclador de referencia y el DUT son controlados por OL distintos, pero se bloquean en una base de tiempo común (por ejemplo, 10 MHz). Esto significa que su frecuencia media es la misma, pero las variaciones de fase debidas a su ruido de fase inherente serán distintas. Los dos OL son coherentes en frecuencia, pero no son sincrónicos de fase. Dado que las señales del receptor de referencia y el receptor de prueba se derivan de OL distintos, su ruido de fase no se cancela en una medida de relación entre el receptor R1 y el B, a diferencia de lo que ocurre con el caso síncrono de fase. El resultado es un ruido de retardo superior, como muestra el gráfico 4.

Figura 3. El ruido del retardo de grupo depende de la solución de OL. Con un OL común, el ruido es mínimo. Dos OL con una base de tiempo común proporcionan un nivel intermedio de ruido. El caso de integración total es el más difícil de medir.



Vamos a examinar cómo extender nuestra técnica de medida del convertidor para dispositivos con OL interno. Hay tres casos posibles, cada uno con un nivel distinto de ruido (y por lo tan-

El caso de OL común es el que provoca menos ruido de retardo, ya que el ruido de fase del OL está presente en el receptor de referencia (R1) y el receptor de prueba (B). Dado que las medidas de fase son relativas entre los dos receptores, la relación del ruido de fase del OL se sale de la medida. Para

Por suerte, hay tres métodos que pueden utilizarse para reducir el ruido de traza en medidas de retardo que no son de síncrono de fase. Cuando el OL del DUT, el OL del mezclador de referencia y el VNA se bloquean en una base de tiempo común, entonces si se reduce el ancho de banda FI se obtiene menos ruido a causa de la mejora en la relación global de señal/ruido. El promediado es otra herramienta que se utiliza habitualmente. Tanto la reducción de ancho de banda FI como el promediado de trazas tienen como resultado un tiempo mayor de medida. El tercer método

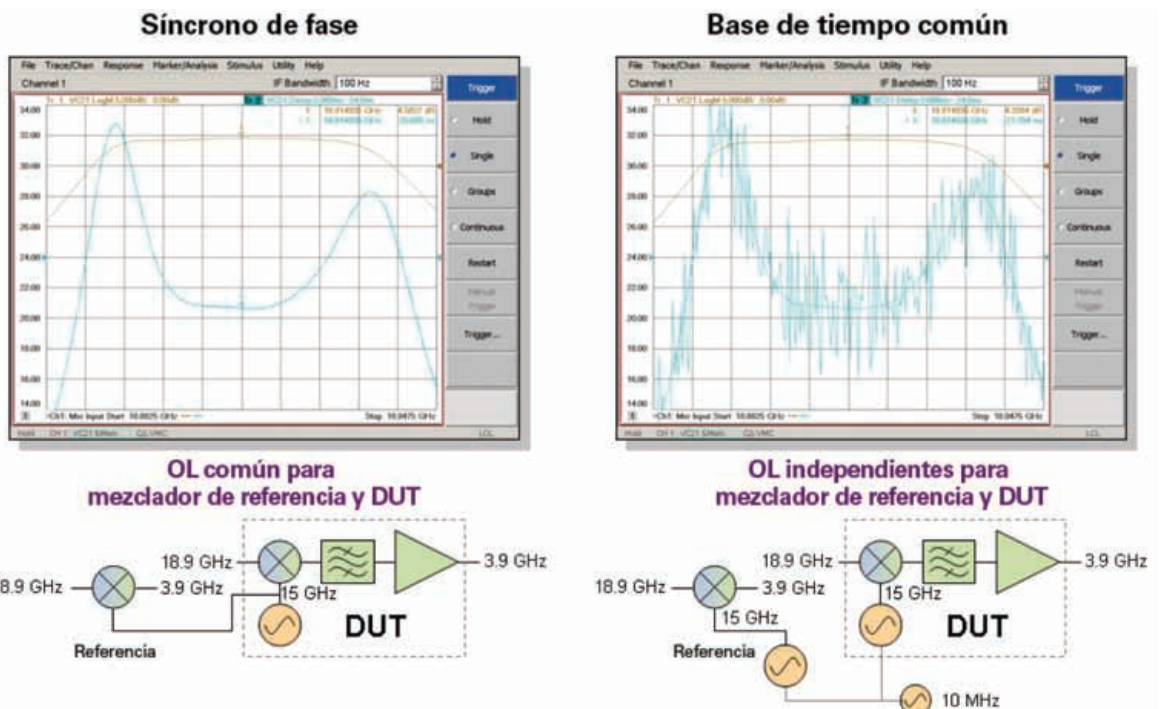


Figura 4. Comparación de ruido de las configuraciones de OL común y base de tiempo común.

para reducir el ruido es utilizar la función estabilizadora, gracias a la cual se aplica un filtro de promediado móvil a la traza. La estabilización no aumenta el tiempo de medida. Normalmente se combinan los tres métodos, según el criterio del usuario, para lograr el equilibrio entre la velocidad de medida y la precisión de medida.

El caso más difícil es el de OL integrado, donde el acceso al OL del DUT o a su base de tiempo no está disponible. Esto es común en muchos transpondedores de satélite, dado que las limitaciones de tamaño y de peso y el potencial de señales espurias no deseadas impiden un acceso fácil a los osciladores locales en el satélite. Por lo tanto, no es posible realizar una conexión para proporcionar una sincronización de frecuencias coherente del VNA y el transpondedor. Esta es la razón por la que históricamente no se ha utilizado el VNA para estas medidas, lo cual ha dificultado enormemente los intentos de mejorar la velocidad de caracterización del transpondedor. No obstante, Agilent ha desarrollado una aplicación para sortear este problema. Este nuevo método proporciona estabilidad de fase y frecuencia y permite medidas calibradas de retardo de grupo y fase.

Establecimiento de estabilidad de frecuencia

Para realizar las medidas de retardo de grupo y fase, la fuente que proporciona el OL para el mezclador de referencia debe configurarse en una frecuencia que dé una señal de salida con una frecuencia que se ajuste a la frecuencia de salida del transpondedor. La frecuencia del OL del mezclador de referencia debe ser lo suficientemente cercana al OL del DUT para que la variación de fase relativa durante el tiempo que se tarda en realizar la medida de fase sea reducida. Siempre y cuando el OL del mezclador de referencia esté lo suficientemente cerca, las dos señales de FI serán coherentes el tiempo suficiente para asegurar una buena medida de fase. Esta condición se llama bloqueo de frecuencia pseudo-coherente, y proporciona medidas de retardo de

grupo que no se ven muy afectadas por la falta de una conexión OL física común, asumiendo la presencia de las fuentes estables que suelen encontrarse en los transpondedores de satélite.

Con tal de establecer la relación pseudo-coherente adecuada entre el DUT y el instrumento de prueba, el PNA-X (o PNA) divide la medida del OL efectivo del transpondedor en una medida bruta y una medida neta. Este método en dos pasos logra la precisión de frecuencia necesaria en poco tiempo. El proceso de ajuste bruto aplica una señal de RF fija al DUT, y los receptores del PNA-X se barren en la frecuencia central de salida esperada. La diferencia entre el pico de la señal real y de la señal esperada (a partir del valor nominal del OL del DUT) proporciona un valor de desviación de frecuencia que puede utilizarse para ajustar el OL del mezclador de referencia para que se adapte más a la frecuencia del OL del DUT.

El barrido bruto no basta en sí mismo para proporcionar una estimación lo suficientemente precisa de la frecuencia del OL del DUT para detener la disminución de fase entre el PNA-X y el DUT. La precisión de frecuencia deseada puede obtenerse adoptando un método de medida distinto para el primer barrido neto. Una vez que la desviación bruta se aplica a la señal OL que controla el mezclador de referencia, el PNA-X realiza una medida de relación de la fase con respecto al receptor de referencia y el receptor de prueba, en una frecuencia de entrada fija y con los receptores fijados en la frecuencia de salida bruta del DUT. Cualquier desviación, por muy pequeña o residual que sea, aparecerá como cambio de fase lineal con respecto al tiempo. La pendiente de esta fase se puede estimar con precisión, lo cual da el valor de desviación neta. Después de ajustar el OL del mezclador de referencia con el valor neto de la desviación, el proceso de ajuste puede repetirse varias veces para obtener una buena estimación sub-hertziana de la frecuencia del OL del DUT. Al reducir el cambio de fase con respecto al tiempo hasta que la respuesta de fase tenga una pendiente plana en el periodo de medida, se obtiene una condición pseudo-bloqueada y se

colocan los dos osciladores locales en una relación de fase fija. Este método es mucho más rápido que realizar un barrido de banda estrecha de los receptores del PNA con un gran número de puntos de datos. Tanto el ajuste bruto como el neto pueden realizarse en cada punto de datos de la medida de retardo de grupo. Esto crea una relación coherente entre el instrumento y el DUT.

Establecimiento de estabilidad de fase

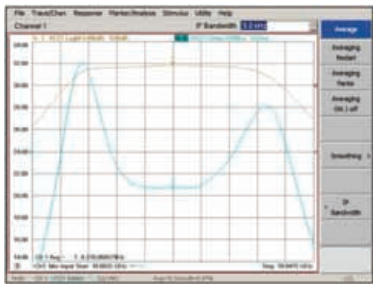
Incluso cuando se ha establecido la coherencia de pseudo-frecuencia, existirán variaciones de barrido a barrido en la respuesta de fase absoluta debido a la arquitectura de síntesis de fuente de la serie PNA. Sin embargo, la fase puede normalizarse en cada barrido en un punto de traza arbitrario, lo cual significa que puede utilizarse el promediado con la misma efectividad que en el caso de OL común o de base de tiempo común.

Selección de ancho de banda de FI

Un elemento muy anti-intuitivo al utilizar la aplicación de OL integrado es la selección de ancho de banda de FI. Normalmente se utiliza un ancho de banda de FI estrecho para mejorar la relación de señal/ruido de la medida. Sin embargo, dado que se establece un bloqueo de frecuencia pseudo-coherente en lugar de un bloqueo de frecuencia real entre el instrumento y el DUT, la inestabilidad de frecuencia de la señal medida puede ser lo suficientemente grande como para que los anchos de banda de FI estrechos puedan producir errores significativos en la medida del retardo. Si esto sucede, ampliar el ancho de banda de FI proporciona resultados más estables. El ancho de banda de FI óptimo suele determinarse empíricamente.

Tal y como se ha mencionado antes, el uso de fuentes de OL independientes aumenta el ruido de traza de la medida de retardo de grupo debido al ruido de fase del OL, cuya relación no se sale de la medida. Sin embargo, la estabilización y el promediado pueden utilizarse

Figura 5. Los resultados de una medida de retardo de OL integrado se superponen a los de una medida con la configuración de OL común, con un poco de ruido adicional.



para producir resultados aceptables con dispositivos de OL integrado, al igual que se hace en el caso de base de tiempo común. En el gráfico 5 se muestra que los resultados de una medida de OL integrado promediada y estabilizada, aunque generan un poco más de ruido, precisamente se superponen a los de una medida con la configuración de OL común.

minutos para llevar a cabo la misma tarea. Al añadir el tiempo para medir la ganancia de conversión y la adaptación, los sistemas de prueba a partir de VNA pueden mejorar los tiempos de prueba superiores a un factor de 100.

Calibración del sistema de pruebas

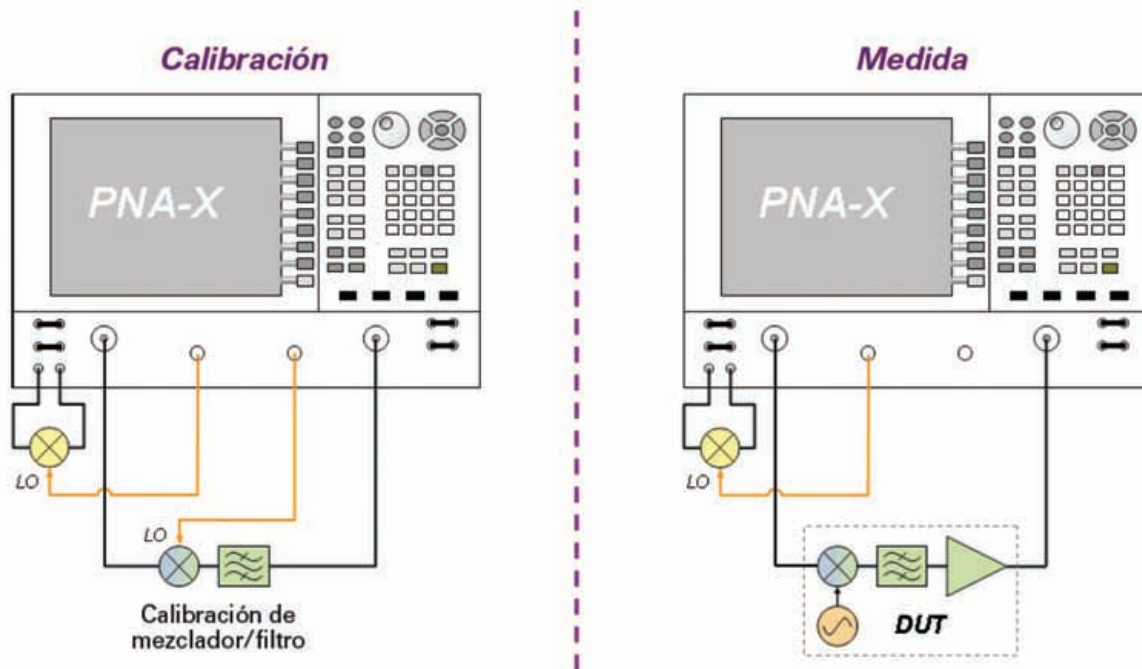
Agilent ofrece dos técnicas de calibración específicas para probar mezcladores y convertidores. La calibración de mezclador escalar (SMC) es una técnica basada en el medidor de potencia que proporciona las medidas más precisas de pérdida de conversión o ganancia de conversión. El SMC corrige las desadaptaciones del DUT durante las medidas de transmisión, y reduce enormemente el rizado causado por la

y reflexión. Cuando se lleva a cabo el VMC, el PNA-X proporciona las señales de OL para el mezclador de referencia y el mezclador de calibración (gráfico 6). Esto significa que la configuración de la prueba es síncrona de fase, lo cual proporciona una calibración limpia. Alternativamente, al utilizar un modelo de PNA, puede utilizarse un generador de señal externa para la señal de OL común. Cuando se realiza la medida del DUT del OL integrado, el PNA-X (o generador de señal externa) sigue proporcionando el OL al mezclador de referencia, pero el DUT utiliza su señal de OL interna.

Conclusión

Utilizar los analizadores de redes PNA o PNA-X de Agilent para

Figura 6. Para la calibración, se utiliza la técnica de calibración de mezclador vectorial de Agilent (VMC). Para la medida, no se utiliza la señal OL que ha controlado el mezclador de calibración.



Velocidad de medida

Tal y como también se ha mencionado antes, el método de VNA para medidas de retardo de grupo es mucho más rápido que utilizar el método tradicional de fuente de señales y analizador de espectro. Utilizando la aplicación de OL integrado, el tiempo del ciclo de medida para 201 puntos suele ser inferior a un segundo. Asumiendo que se utilizan 10 promediados, esto significa aproximadamente 9 segundos por medida. El método de portadora modulada (retardo envolvente) suele necesitar varios

desadaptación en la medida de pérdida o ganancia de conversión. El SMC también puede utilizarse para medir la adaptación de impedancias de entrada y salida del DUT, tanto en magnitud como en fase.

La calibración de mezclador vectorial (VMC) proporciona las medidas más precisas de retardo de grupo absoluto y de fase. El VMC utiliza un mezclador caracterizado como estándar de calibración de tránsito (thru), junto con los estándares habituales de reflexión. El VMC elimina los errores de magnitud y de fase para las medidas de transmisión

probar convertidores de frecuencias con OL integrados ofrece mejoras de velocidad y precisión en comparación con el uso del método escalar de estímulo/respuesta tradicional basado en un generador de señales y un analizador de espectro. La solución a partir de VNA puede liberar costosas salas de pruebas, reducir los tiempos de producción y reducir los gastos de proyecto. Para ver una demostración en vídeo de la aplicación de medida de OL integrado de PNA-X, vaya a: <http://wireless.agilent.com/vcentral/viewvideo.aspx?vid=453>.