

Realización de medidas en dispositivos con señales pulsadas: Un desafío multi-faceta

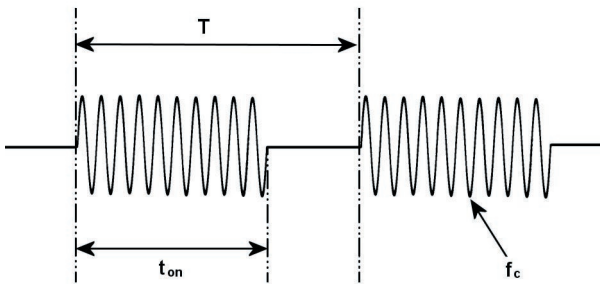
Por Laura Gonzalo

Laura Gonzalo, Departamento de Soporte Técnico - División Instrumentación de Rohde&Schwarz España.

Este artículo describe diferentes propuestas para generar señales pulsadas moduladas con generadores de señal y analizar dispositivos simulados con diferentes tipos de señales usando analizadores de redes vectoriales. En particular, trata de mostrar cuándo un generador de señal analógico es suficiente y cuándo es mejor utilizar un generador de señal vectorial. También analiza las capacidades de diferentes técnicas usadas por los analizadores de redes vectoriales.

Las medidas con señales de estímulo pulsadas se realizan por diferentes razones. Por ejemplo, en un amplio rango de aplicaciones los dispositivos bajo prueba (DUTs) se deben caracterizar usando señales pulsadas en vez de señales CW. En este caso, el dispositivo a analizar se estimula con una señal de RF pulsada o se le somete a condiciones pulsadas mediante una tensión de control pulsada.

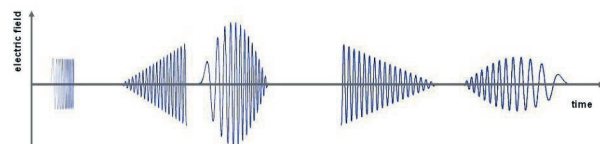
Fig 1. Pulsos Simples



Para medidas en amplificadores de potencia, es muy difícil o incluso imposible, implementar disipadores de calor. Usando señales estímulo pulsadas, los parámetros S se pueden medir a los niveles de potencia reales sin exceder la potencia promedio máxima que puede llevar a la destrucción del dispositivo. Usando un ciclo de trabajo apropiado, la potencia media se puede reducir significativamente manteniendo una potencia de pico elevada.

También está la situación en la que los dispositivos a medir sólo fun-

Fig 2. Ejemplo de tren



cionan adecuadamente con estímulos pulsados, como es el caso de los componentes para el mercado de comunicaciones móviles (por ejemplo, para el estándar GSM). Además, normalmente los amplificadores de potencia en teléfonos móviles o etapas de salida de radar, sólo trabajan de la forma deseada bajo condiciones de estímulo pulsado.

Otra consideración es que el comportamiento del DUT a menudo cambia durante la duración del pulso. Los amplificadores podrían mostrar saturación, resonancia o caídas en función del tiempo. Los anchos de pulso para estas aplicaciones varían entre unos 10 ns para aplicaciones radar y alrededor de 100 microsegundos para aplicaciones GSM.

Por lo tanto, ¿qué tipos diferentes de pulsos se usan? Hay pulsos periódicos simples, trenes de pulsos, pulsos modulados, pulsos Barker y pulsos de selección de frecuencia dinámica (DFS) de acuerdo con el estándar FCC.

Teniendo esto en cuenta y empezando con los pulsos simples periódicos (mostrados en Figura 1), la señal de estímulo pulsada más común es una señal de RF simple pulsada. Un pulso simple periódico se define mediante los siguientes parámetros: frecuencia de portadora f_c , anchura de pulso t_{on} y período del pulso T.

Se pueden obtener algunos parámetros más específicos:

- Ciclo de trabajo ('Duty Cycle'): $D_{cycl} = t_{on}/T$
- Frecuencia de repetición del pulso (PRF): $PRF = 1/T$

La relación entre la potencia de pico (Ppk) y la potencia media (Pavg) de un pulso de RF se define a través de su ciclo de trabajo.

$$P_{avg} = P_{pk} \times D_{cycl} = 4P_{pk} \times (t_{on}/T)$$

El uso de pulsos simples periódicos reduce la potencia media manteniendo la potencia de pico seleccionando un ciclo de trabajo apropiado. De este modo, la potencia media del dispositivo se puede reducir a un valor tolerable para evitar la destrucción térmica. Otros parámetros importantes para describir las señales de RF pulsadas son la relación on-off, tiempos de subida y bajada (típicamente 5 ns) y ancho del pulso (hasta 20 ns).

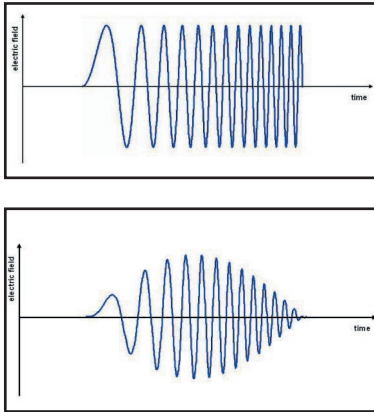
Los pulsos dobles se usan en aplicaciones astronómicas Doppler-radar o para búsqueda de objetivos. El pulso doble conlleva un doble eco y estos ecos pasan por el procesamiento de señal que elimina de manera eficiente la mayor parte de ruido y otras interferencias. Esto asegura mayor precisión de medida. Con pulsos dobles, los parámetros son los mismos que para pulsos simples periódicos.

Los trenes de pulso se usan normalmente para aplicaciones radar. Un ejemplo de tren de pulsos se muestra en la Figura 2. A diferencia de los pulsos simples y dobles, los trenes de pulsos son una combinación de diferentes tipos de pulsos, que pueden ser una selección tanto periódica como no periódica de pulsos. Además, se pueden aplicar diferentes modulaciones a cada pulso o rampa, y se puede configurar libremente la forma del pulso.

Los pulsos modulados en FM, en principio, varían su frecuencia en el tiempo. En analogía con los sonidos de pájaro, se denominan pulsos 'gorjeos' ('chirped'), lineales o no lineales. Estos pulsos también pueden tener una forma específica, por ejemplo Gaussiana, y se pueden describir matemáticamente de la siguiente forma:

$$E(t) = \text{Re} E_0 \exp[-(t/T_G)^2] \exp[i(\omega_0 t + \beta t^2)] T \exp[-(t/T_G)^2]$$

Amplitud Gaussiana w_0 : frecuencia portadora βt^2 : chirp



La Figura 3 muestra el pulso con cambio de frecuencia en el tiempo ('chirped'), mientras que la Figura 4 muestra el pulso con cambio de frecuencia en el tiempo y forma Gaussiana.

El siguiente tipo de pulso a considerar es el pulso Barker.

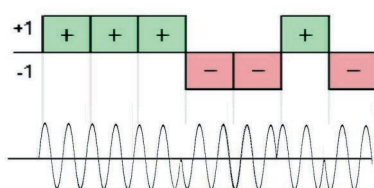
Básicamente, un pulso Barker es una señal de RF pulsada modulada en BPSK ("binary phase shift keying"). La modulación BPSK se deriva a partir de códigos Barker.

Un valor de bit de uno ajusta la fase a pi, mientras que los bits a cero llevan la fase a cero. Se podría especificar un offset de fase adicional para rotar los puntos de la constelación.

Esta es una técnica de procesado de señal usada para la compresión de pulso (pulsos con modulación inherente aplicada). A diferencia de la señal 'chirp' analógica, esta señal se modula digitalmente. Para una resolución en distancia elevada, normalmente se usan pulsos pequeños.

Length	Codes
2	+1 -1 +1 +1
3	+1 +1 -1
4	+1 -1 +1 +1 +1 -1 -1 -1
5	+1 +1 +1 -1 +1
7	+1 +1 +1 -1 -1 +1 -1
11	+1 +1 +1 -1 -1 -1 +1 -1 -1 +1 -1
13	+1 +1 +1 +1 +1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 -1 +1

Barker Code (BPSK)



El cuello de botella aquí es la disminución de la relación señal a ruido. Para hacer frente a este problema se usa la compresión de pulso, de tal forma que se consiguen pulsos más anchos con una buena relación señal a ruido. La Figura 4a ilustra códigos Barker, mientras que la Figura 4b da un ejemplo de un código Barker de siete bits.

Hay también pulsos de selección de frecuencia dinámica de acuerdo con el estándar FCC. Para transmisiones de datos libres de licencia, se usan las bandas de frecuencia de 5.25 a 5.35 GHz y de 5.47 a 5.725 GHz, por ejemplo para aplicaciones WLAN. De acuerdo con el estándar FCC, U-NIII ("Unlicensed National Information Infrastructure"), los dispositivos que trabajan en estas bandas deberían emplear un mecanismo de detección de radar DFS para poder percibir la presencia de sistemas radar y evitar así la operación cocanal con dichos sistemas. Actualmente, existen dos requerimientos relacionados con la detección de radar DFS:

- FCC Parte 15 Subparte E
- ETSI EN 301893 V 3.1

Los requerimientos FCC para Radar Tipo 6 nos indican que tipo de forma de onda usa una secuencia de pulso fija que salta a través de un amplio rango de frecuencias. Está definido que se toman 100 frecuencias dentro del rango de 5.25 GHz a 5.724 GHz. No está permitido reutilizar frecuencias. La frecuencia cambia cada 3 ms y en cada una de las frecuencias se genera una secuencia que contiene nueve pulsos. Se debe asegurar que, al menos una de las frecuencias aleatorias, cae dentro del ancho de banda receptor del dispositivo.

Ahora vamos a considerar cómo mide un analizador de redes en condiciones pulsadas. La siguiente sección describe cómo se pueden analizar dispositivos con analizadores de redes usando señales pulsadas rectangulares.

Medida punto en pulso

Usando la técnica de medida punto-en-pulso, el pulso se monitoriza sólo durante la fase activa (on) de las ráfagas de RF. Por lo tanto, es necesario que el tiempo de muestreo (T_{spl}) para adquirir los datos brutos de una cantidad de señal o un parámetro S , sea menor que el ancho del pulso t_{on} (fig. 5)

El tiempo de muestreo está principalmente determinado por el ancho de banda de medida del receptor (IFBw). Teóricamente, la relación entre el tiempo de muestreo mínimo y el ancho de banda de medida es:

$$T_{spl} \geq 1/IFBw$$

Esto supone que, incrementando el ancho de banda de medida, la tasa de muestreo disminuye y se pueden analizar pulsos más cortos. Para los Analizadores de Redes Vectoriales (VNAs), los filtros de IF se implementan como filtros digitales. Los VNAs típicamente ofrecen anchos de banda de medida de hasta 600 kHz, por lo que la tasa de muestreo es más de 2 μ s. Algunos analizadores vectoriales de alta gama diseñados para medidas pulsadas ofrecen anchos de banda de IF de hasta 5MHz o más. Esto supone tasas de muestreo teóricas de hasta 200 ns para un ancho de banda de 5 MHz.

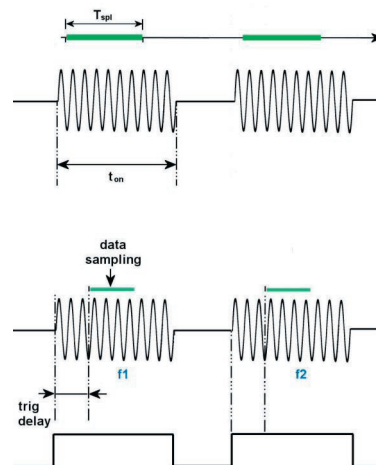


Fig 3. Pulso con cambio de frecuencia en el tiempo (pulso 'chirped')

Fig 4. Pulso con cambio de frecuencia en el tiempo y forma Gaussiana

Fig 5. Tiempo de muestreo para medidas punto-en-pulso

Fig 6. Retardo de disparo

Debido a que el proceso de muestreo debería ocurrir durante la fase activa (on) del pulso, es necesaria una señal de disparo para sincronizar la adquisición de datos del analizador vectorial con el período activo del pulso. El analizador se usa en un modo de disparo denominado por punto, que significa que el muestreo de datos para cada punto de medida se inicia después de la detección de un evento de disparo.

Dispositivos activos como amplificadores normalmente muestran efectos de ajustes o resonancias en el inicio del pulso. Típicamente el usuario no está interesado en el comportamiento durante este tiempo de establecimiento, sino sólo cuando se ajusta el DUT. Seleccionando un

Fig 4a. Códigos Barker

Fig 4b. Ejemplo de un código Barker de 7 Bit

retardo adecuado en el disparo (Ver Figura 6), se puede desplazar el inicio del proceso de muestreo a la parte inactiva del pulso del amplificador.

El rango dinámico y la sensibilidad usando el método punto-en-pulso sólo depende del ancho de banda de medida de los receptores; son independientes del ciclo de trabajo del pulso de RF. Sin embargo, el rango dinámico depende así mismo del ancho del pulso, debido a que el ancho del pulso determina el tiempo de muestreo y por lo tanto el ancho de banda de medida a utilizar. Para incrementar el rango dinámico manteniendo el ancho de banda de medida, se puede aplicar un promedio. Promediar diez veces en el dominio IQ por ejemplo, incrementa el rango dinámico en un factor de 10.

Resumen

Ventajas.-

- La medida punto-en-pulso permite medidas precisas de parámetros-S y potencia.
- El momento de adquisición de datos dentro del pulso se puede desplazar libremente
- El rango dinámico no depende del ciclo de trabajo

Desventajas.-

- Se requiere un Analizador de Redes Vectorial con un ancho de banda de medida ancho

Debido a que la medida punto-en-pulso demanda un analizador de redes vectorial con un ancho de banda igual o mayor que $1/t_{on}$, la mitad de la gama de VNAs no soportan este método para aplicaciones con anchos de pulso cortos. Es aquí donde se recomienda utilizar la técnica de medida de pulso promedio (también llamada banda estrecha o técnica PRF alta).

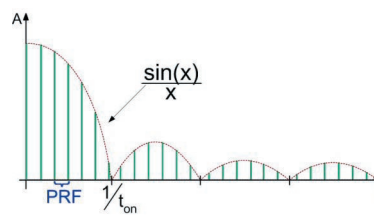
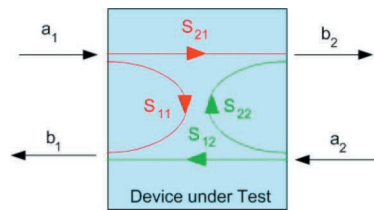
Este método requiere una demanda menor en cuanto a prestaciones de los VNAs, pero un mayor conocimiento para seleccionar las configuraciones apropiadas, dependiendo de los parámetros del pulso y del VNA.

El principio básico es que una señal pulsada se genera por multiplicación de una señal rectangular periódica (envolvente del pulso o señal NF) que varía entre 0 y 1 con una señal CW. La multiplicación en el dominio del tiempo es una convolución del espectro de ambas señales en el dominio de la frecuencia. Las señales en el dominio del tiempo y la frecuencia se muestran en la Figura 7.

El espectro de la envolvente del pulso (señal NF) se desplaza por la convolución a la frecuencia f_c . Para medir el parámetro $S_{21} = b_2/a_1$ (a_1 es la onda incidente en un DUT, b_2 es la onda transmitida a través de un dispositivo) es suficiente medir la relación entre la línea espectral específica de a_1 y la línea espectral equivalente de b_2 . De este modo, se pueden medir todos los parámetros S. Para conseguir el rango dinámico máximo, se selecciona la línea espectral más fuerte (normalmente la portadora principal) en f_c :

$$S_{21} = b_2(f_c)/a_1(f_c)$$

$$S_{11} = b_1(f_c)/a_1(f_c) \text{ etc.}$$



La Figura 7a muestra los parámetros S de un dispositivo de dos puertos. Para medidas de pulso promedio, no es necesario tener un gran ancho de banda de medida como para las medidas punto-en-pulso, basta un ancho de banda que sea 'suficientemente estrecho' para capturar la portadora principal.

El espaciado de frecuencia entre portadoras es igual a la frecuencia de repetición del pulso ($PRF = 1/T$).

Para un buen funcionamiento con respecto al ruido de la traza, es importante que las portadoras adyacentes se supriman en 40 dB o más. Típicamente, se selecciona

un ancho de banda de medida que es aproximadamente 10 veces más estrecho que el espaciado de portadora con respecto a la frecuencia de repetición del pulso. Disminuir el ancho de banda de medida supone incrementar el tiempo de medida:

$$IFBw < PRF/10, \text{ donde } PRF = 1/T$$

$$y$$

$$IFBw = 1/Tspl$$

$$1/Tspl < 1/(T \times 10) \text{ y}$$

$$Tspl > 10 \times T$$

Durante varios pulsos, el VNA muestrea y mide el valor promedio del pulso, por lo que se denomina medida de pulso promedio. Esto queda más claro también si se analiza en el dominio de la frecuencia. Con el método de medida de pulso promedio, sólo se detecta la portadora principal, que es la portadora convolucionada de la señal NF en la frecuencia 0. La portadora en la frecuencia 0 representa el 'valor DC' del pulso NF, que no es otro que el valor promedio de la señal NF.

Un problema típico de este tipo de medidas es la forma de los filtros digitales de IF de los VNAs, que estimulan típicamente los dispositivos con señales CW no moduladas. Los filtros de IF están diseñados para un ajuste rápido y no para la supresión del lóbulo lateral, que es típicamente sólo de 20dB o menos. Esto puede causar problemas en cuanto uno de los tonos adyacentes cae dentro de uno de los máximos de uno de estos lóbulos laterales.

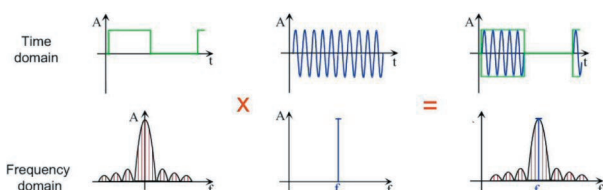
Para combatir este problema se pueden usar dos procedimientos diferentes. Algunos instrumentos de gama media usan lo que se llama "anulación espectral", mostrado en la Figura 9. Dependiendo del período del pulso, los filtros de IF se pueden seleccionar de forma que los nulos del filtros queden exactamente donde se esperan los tonos a suprimir.

En contraposición, otros VNAs usan filtros muy selectivos sin lóbulos secundarios, por lo que no se requiere este proceso de "anulación espectral". La Figura 10 muestra los filtros IF digitales de VNAs muy selectivos.

Fig 7a. Parámetros S de un dispositivo de dos puertos

Fig 8. Espectro del Pulso N

Fig 7. Señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia



Blue trace:
Spectrum of $T_p = 218.58 \mu s$
→ Tone spacing 4.545 kHz

Red trace:
Shape of 3 kHz IF-filter with
nulls at 4.545 kHz offset

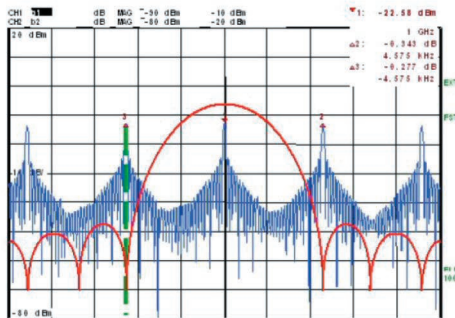


Fig 9. Anulación espectral

Las medidas de pulso promedio también se pueden realizar en un modo barrido. La configuración es la misma que para las medidas punto-en-pulso, pero no se necesita disparo. Debido a que la técnica de medida de pulso promedio mide los valores promedio de las cantidades de señal, una medida de potencia absoluta está influenciada por el ciclo de trabajo. La potencia medida es:
 $P_{med} = P \times D_{cyc}l^2$

al camino del generador para aplicar un modulador o una fuente de señal modulada.

Desventajas.-

- A diferencia de la medida punto-en-pulso, el método de pulso promedio requiere una señal periódica pulsada
- Los resultados representan solo valores promedio y por tanto también incluyen resonancia o sobrecarga que podrían ocurrir en el inicio de un pulso

parámetros típicos para caracterizar el comportamiento del pulso en el tiempo son: los tiempos de subida, establecimiento y caída.

Para esta medida, el VNA debe presentar una resolución en tiempo significativamente mayor que la duración del pulso. Un rango de resolución en tiempo típica de VNAs es de 3 μs a 20 μs para medidas en el dominio de la frecuencia o tiempo. La Figura 11 muestra una forma de onda pulzada representativa.

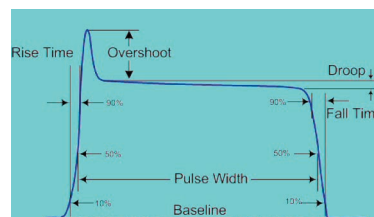


Fig 11. Forma de onda representativa

Principio de Chopping

La mayoría de los analizadores vectoriales tienen un ancho de banda de medida de 600 kHz o menos, que es el factor de limitación para una alta resolución en tiempo de anchos de pulso de 1 μs o menos. Para conseguir resoluciones de 10 ns y menores, se pueden usar hardware y software externos para 'cortar' ('chop up') la señal pulsada en tramos con diferentes posiciones en el tiempo dentro del pulso.

Se mide la magnitud de estos tramos de pulso con respecto a un determinado retardo y se calcula de acuerdo con el método de pulso promedio. De esta forma, se incrementa el retardo y se miden los siguientes 'tramos' hasta que se analiza la duración del pulso deseada. El 'chopping' puede ocurrir en los caminos del receptor en la frecuencia de RF o directamente dentro del instrumento en el camino de IF. En este último caso, se pueden minimizar las pérdidas de los conmutadores necesarios.

Resumen

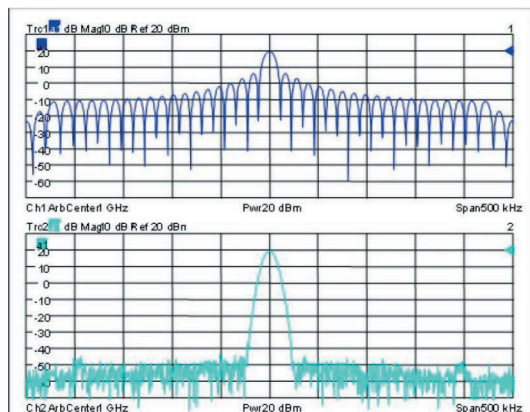
Ventaja.-

- Se puede realizar con la mayoría de los analizadores vectoriales junto con un montaje externo para medidas de perfil del pulso.

Desventajas.-

- No análisis para pulsos no periódicos, pulsos dobles, trenes de pulsos o señales pulsadas moduladas complejas

Fig 10. Filtros IF digitales de VNAs/filtros IF de alta selectividad de un VNA de gama alta



Para un ciclo de trabajo de un 1 por ciento, la potencia medida de la portadora principal es 40 dB más baja que la potencia de pico. Este fenómeno se denomina desensibilización. La reducción de potencia en dB es:

$$\Delta [dB] = 20 \log \left(\frac{\text{ancho pulso}}{\text{período pulso}} \right)$$

Para ciclos de trabajo muy cortos, la relación señal a ruido llega a ser muy baja y limita el rango dinámico de la medida.

Resumen

Ventajas.-

- La técnica de medida de pulso promedio se puede aplicar en pulsos muy cortos
- El VNA no requiere un ancho de banda o capacidades de disparo especiales. Sólo es necesario acceder directamente

- Los filtros de IF del VNA deben suprimir otras señales excepto la portadora principal. Esto requiere filtros de IF sin lóbulos laterales, o una selección apropiada de formas de filtros de IF dependiendo de la frecuencia de repetición del pulso.

- El rango dinámico cae 20 dB tan pronto como el ciclo de trabajo se reduce en un factor de 10, que puede dar lugar a un funcionamiento pobre para ciclos de trabajo bajos. En estos casos, se recomienda una medida punto-en-pulso.

Perfil de pulso

Para analizar el comportamiento de un dispositivo en el tiempo durante una ráfaga, el VNA tiene que realizar una medida denominada perfil de pulso. Los

- Bajo rango dinámico para ciclos de trabajo cortos y alta resolución
- Velocidad de medida baja
- Un cambio del ciclo de trabajo requiere volver a calibrar
- Difícil de manejar

Fig 12. Pulsos 'Chopped'

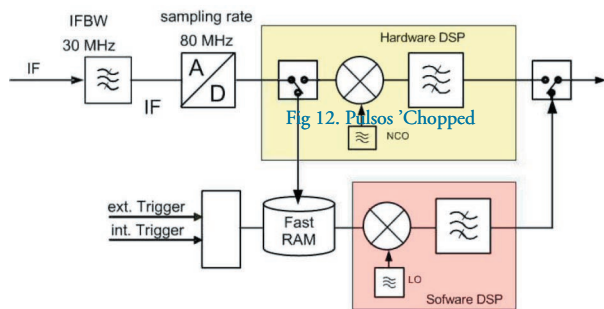
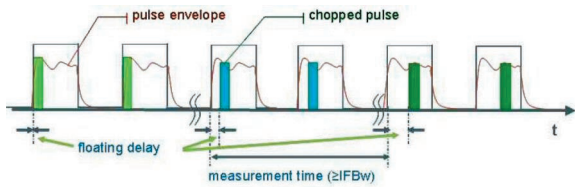


Fig 13. Almacenamiento rápido de datos

Detección de banda ancha

Un nuevo enfoque es la detección de banda ancha con un almacenamiento de datos rápido. El funcionamiento del análisis de perfil de pulso de señales pulsadas o de parámetros S con estímulo pulsado está limitado, por la tasa de muestreo del convertidor A/D, el tiempo de procesamiento entre dos puntos de datos, y el ancho de banda disponible: la tasa de muestreo y el tiempo de procesamiento de datos limita la resolución en tiempo, mientras que el ancho de banda de medida determina el tiempo mínimo de subida y de bajada del pulso que se pueden analizar.

Los factores que limitan el ancho de banda son el ancho de banda analógico de los receptores y las capacidades de los procesadores de señal digitales (DSPs) para el filtrado digital. Un VNA de gama alta tiene un ancho de banda analógico de 15 MHz (de 30MHz con alguna degradación en el funcionamiento), pero los filtros de IF de los DSPs sólo ofrecen funcionamientos adecuados para barridos en tiempo o CW normal con un ancho de banda de 5 MHz. El VNA prueba señales convertidas a IF a una tasa de muestreo de 80 MHz, que resulta en una resolución en tiempo de 12.5 ns.

Fig 14. Perfil de pulso de una onda con señal de disparo

Además del tiempo de muestreo, hay un tiempo de procesado de datos entre dos puntos de medida, que es un cuello de botella cuando se trata de medidas con alta resolución en el dominio del tiempo. Las limitaciones son el filtrado de IF por los DSPs con tiempos de subida y bajada máximos de $1/(5 \text{ MHz}) = 200 \text{ ns}$, y el tiempo de procesado de datos que limita la resolución en tiempo a $1.5 \mu\text{s} + \text{tasa muestreo}$.

Con un nuevo paso, el funcionamiento de las medidas de perfil del pulso se mejoran drásticamente. Los datos muestreados brutos se almacenan directamente sin filtrar. En vez del DSP, el software del instrumento realiza la conversión y el filtrado digital después del almacenamiento. La Figura 13 ilustra el almacenamiento de datos rápido.

El convertor A/D digitaliza continuamente los datos con una tasa de muestreo de 80 MHz y los escribe en una memoria RAM. Esto asegura que no se produce retardo entre las muestras de los puntos de medida. Debido a la elevada tasa de muestreo, se obtiene un punto de medida cada 12.5 ns, es decir, la resolución en tiempo es de 12.5 ns.

La señal de disparo, normalmente derivada del tiempo de subida del pulso, determina el punto cero en el tiempo. Es decir, también se puede medir la relación de tiempo exacta entre la detección del disparo y el pulso de RF entrante. Esta relación es

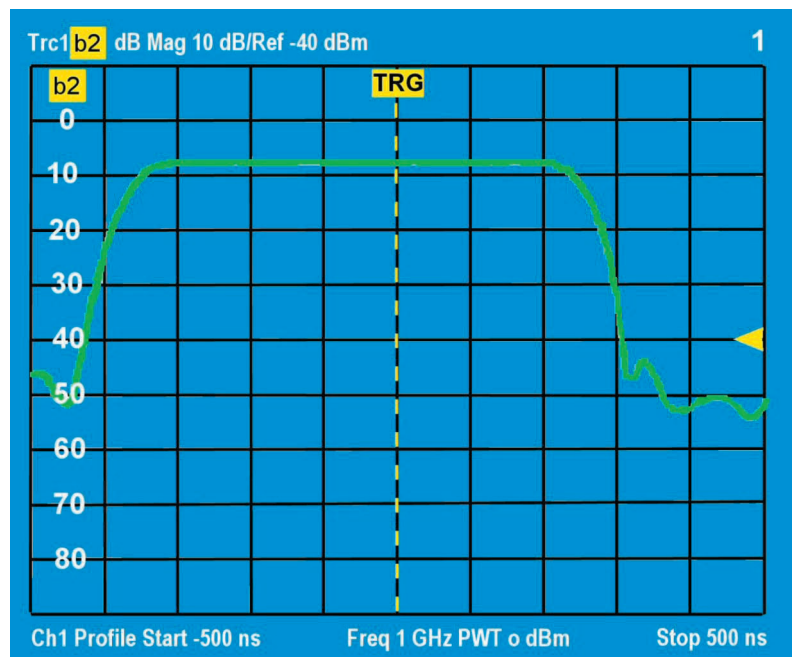
especialmente importante para determinar el retardo de disparo correcto en las medidas pulso-en-punto en función de la frecuencia o nivel.

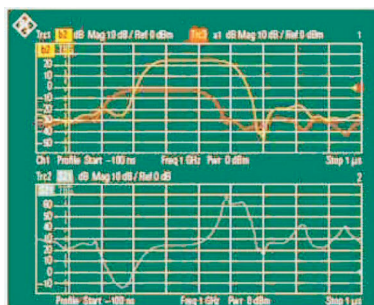
Al ser un método tan avanzado, un VNA es capaz de realizar medidas pulsadas extremadamente rápidas. Con más de 10 barridos/s en 1001 puntos, se pueden ajustar fácilmente los dispositivos durante la medida del perfil del pulso (ver Figura 14). Además de señales pulsadas simples periódicas, esta nueva técnica maneja pulsos dobles así como trenes de pulsos definidos por el usuario. También se pueden analizar los dispositivos estimulados con pulsos que tienen modulación de frecuencia y amplitud, por ejemplo chirps.

Retardos de grupo

Es una tarea complicada o casi imposible medir los parámetros S de dispositivos con retardos de grupo en el rango de la anchura del pulso. La señal de RF estimulada no debería estar presente en la entrada de los dispositivos en el tiempo en el que el VNA recibe la señal de RF transmitida desde la salida. Un parámetro S21 correcto sólo se puede medir con superposición de la señal temporal. La Figura 15 muestra una medida señal y parámetros S de un dispositivo con un retardo de grupo de 100 ns.

Un VNA soluciona este problema aplicando un offset en tiempo a la onda: antes de calcular los parámetros S, matemáticamente desplaza la onda el retardo de grupo del dispositivo. Se puede asignar





Generación de señal

La mayoría de los analizadores vectoriales no pueden modular el generador interno de una manera óptima. Por tanto, es conveniente y más versátil usar fuentes de modulación externas, especialmente para escenarios de pulsos muy complejos. En muchos casos, el rango de pulsos desde menos de microsegundos a varios cientos de microsegundos y datos de transporte en varios esquemas de modulación. Además, se deberían dedicar anchos de banda espectrales limitados para formas de onda pulsadas y normalmente se requieren relaciones on-off elevadas.

Por tanto, la generación de estas señales pulsadas no es una tarea trivial, y algunas veces, la generación de pulsos CW simples de fuentes de microondas analógicas no es suficiente para cubrir las necesidades de medida. En la actualidad, la mejor opción para la generación de pulsos arbitrarios, son los generadores de señal vectoriales potentes que aportan contenido de datos modulados digitalmente. El modo de forma de onda arbitraria (ARB) de estos instrumentos proporciona memoria suficiente y alta resolución para trenes de pulsos largos y complejos.

Con la ayuda del software tan flexible de los generadores de banda base, la generación de patrones de pulsos complejos usados en comunicaciones o aplicaciones militares se puede simplificar en gran medida. Además, los resultados precalculados (e.j. FFT) se pueden mostrar en pantalla y compararlos directamente con las medidas reales en un VNA.

La siguiente sección compara las capacidades de generadores de microondas analógicos con estos generadores de señal vectoriales. Una fuente analógica contiene un modulador de pulso y un generador de pulso. El modulador se gobierna a través de un generador de pulso con una señal cuadrada. En principio, el modulador de pulso es un simple conmutador que activa y desactiva la RF. La principal ventaja de este concepto es la capacidad de generar pulsos muy cortos en el rango de ns con una excelente relación on/off. La desventaja es que se pierde la capacidad para aplicar formas de pulsos específicas o modularlas (e.j. Chirp, Barker, etc).

Para intentar conseguir una modulación específica en un pulso o un tren de pulsos definidos por el usuario, la única opción sería un generador de señales vectorial. Esta sería una forma de onda de pulso precalculada que se almacena como una forma de onda arbitraria y se genera de forma cíclica. Después, la forma de onda se sube en frecuencia a la frecuencia de RF deseada a través de un modulador IQ interno. A diferencia de la solución normal de generador/modulador de pulso, este concepto ofrece mayor variedad y flexibilidad en la configuración de escenarios de pulsos y trenes de pulsos.

Usando un software externo se simplifica el escenario de pulso completo. Los parámetros del pulso se pueden cambiar de una manera versátil y las configuraciones se pueden controlar en FFT, visualizaciones del plano vectorial o temporal. Esto llega a ser especialmente importante para los escenarios de pulsos FCC anteriormente descritos. Los tipos de radar DFS-FCC se pueden seleccionar directamente por lo que la probabilidad de fallo en una configuración errónea es despreciable. Las limitaciones de un generador de señal vectorial pueden fijarse en la relación on/off y el ancho de pulso mínimo, dependiendo del ancho de banda interno IQ.

Comparaciones

Generador de señal analógico con generador y modulador de pulso

Ventajas.-

- Altas relaciones on-off de pulso (> 80 dB)
 - Tiempos de subida y de bajada muy cortos (< 5 ns típico)
 - Anchos de pulso muy cortos (> 20 ns)
 - Frecuencias de RF hasta el rango de microondas
- Desventajas.-
- Forma de pulso limitada
 - No es posible la generación de pulsos modulados (e.g. Chirp, Barker, etc)
 - No es posible la generación de trenes de pulso complejos

Generador de señal vectorial

Ventajas.-

- Forma de pulso y modulación a medida
- Trenes de pulso arbitrarios

Fig 15. Ondas y Parámetros S con un retardo de grupo de 100 ns

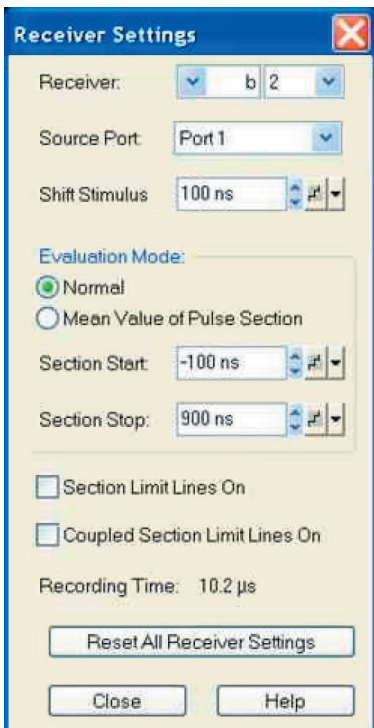


Fig 16. Asignación de un retardo de tiempo específico, dependiendo de la dirección de la medida



Fig 17. Ganancia S21 en función de la duración total del pulso

un retardo temporal a cada onda, dependiendo de la dirección de la medida (ver Figura 16), por lo que el VNA muestra correctamente la ganancia S21 en función de la duración del pulso total (como se muestra en la Figura 17).

Resumen

Ventajas.-

- Análisis de pulsos simples no periódicos
- Análisis de trenes de pulsos y pulsos dobles
- Análisis de pulsos con modulación
- Resolución temporal alta

Desventajas.-

- Relación on-off limitada (limitada por el ARB dinámico). El rango dinámico total de un ARB de un generador de señal proporciona un total de, por ejemplo, 16bits por las señales I y Q. El rango dinámico teórico sería de 96 dBc. Sin embargo, en la práctica, está limitado a -65 dBc aproximadamente. Para solventar este problema, se puede activar una señal de "Marcador" (Marker) en el modulador de pulso del generador de señal vectorial. Esto proporciona un rango dinámico de más de 80 dBc.
- Tiempos de subida y de bajada mayores (limitado por el ancho de banda IQ). La anchura de pulso mínima está determinada por el ancho de banda IQ del instrumento. Para un ancho de banda IQ determinado, por ejemplo, 100 MHz, la anchura de pulso mínima debería ser al menos $1/(3 \times 100 \text{ MHz})$, que es igual a 3.3 ns.

Configuraciones de medida

Para aplicaciones donde el DUT requiere una señal de entrada modulada en pulso, se puede utilizar un generador con modulación de pulso o un generador de señal vectorial. La señal de RF modulada del generador se inyecta directamente en el camino del generador del VNA en vez de usar un generador interno no modulado del analizador (como se muestra en la Figura 18).

Debido a que la señal modulada también se mide por el receptor de referencia cuando pasa por el acoplador interno, se puede aplicar un sistema de corrección de error para las medidas S_{11} y S_{21} . Se aplica una calibración de error o nivel bajo unas condiciones de CW y pulso determinadas, por lo que se deberá repetir cuando se cambie el ciclo de trabajo. Debido a que el VNA controla la frecuencia y el nivel del generador externo a través de LAN o IEC/IEEE, se aconseja utilizar esta funcionalidad para medidas pulsadas en frecuencia y nivel.

Para medidas con pulsos de RF simples, se puede insertar un modulador de pulso en el camino del generador habilitando las medidas bidireccionales y por tanto también las calibraciones de dos puertos. Con un modulador aplicado en el camino del generador del puerto 1, los parámetros incidentes S_{11} y S_{21} se miden bajo condiciones de estímulo pulsadas y los parámetros de reflejada S_{12} y S_{22} en condiciones no pulsadas. Sólo se requiere un generador de forma de onda arbitraria adicional para un dispositivo pulsado (como se muestra en la Figura 19).

Ni la configuración con generador de señal pulsado externo ni el modulador externo requieren volver a calibrarse si se modifica el ciclo de trabajo. Una calibración realizada en modo CW sólo es válida bajo condiciones pulsadas. Esta configuración permite una medida calibrada y precisa de los parámetros S así como medidas precisas de niveles de potencia absolutos.

Conclusión

Las medidas de pulsos requieren diferentes capacidades de detección y generación de señal. Para tareas simples – por ejemplo, cuando se miden parámetros S de un DUT que no tiene influencia en la forma del pulso – sería suficiente con la capacidad para modular la fuente y con una medida del pulso promedio con un analizador de redes estándar.

Para medir parámetros S y niveles de potencia absolutos con ciclos de trabajo muy bajos, o si la forma del pulso está influenciada por el DUT, es necesario una medida punto-en-pulso con un analizador de redes que incorpore anchos de banda de medida altos y tiempos de muestreo cortos.

Medir el comportamiento en el tiempo de un DUT durante el pulso requiere medidas de perfil del pulso con un analizador de redes de gama alta. Idealmente, el instrumento debe proporcionar un ancho de banda muy elevado, una tasa de muestreo alta y características especiales para almacenamiento continuo de datos.

Para generar señales de RF de pulso moduladas, es suficiente un conmutador simple controlado por un generador de pulsos apropiado. Una solución alternativa consistiría en un generador de microondas que tenga incorporadas capacidades de pulso y que también se pueda controlar directamente por el analizador de redes para medidas con barridos en frecuencia o potencia.

La generación de trenes de pulsos con modulación adicional además de modulación de pulso requiere un generador de señal vectorial con modulador I/Q interno. Para generar trenes de pulso, es necesario el uso de un generador de señal vectorial con altas prestaciones. Por lo tanto, son esenciales una tasa de reloj elevada y una memoria banda base elevada así como un ancho de banda del modulador IQ alto.

Fig 18. Configuración con una fuente de señal modulada

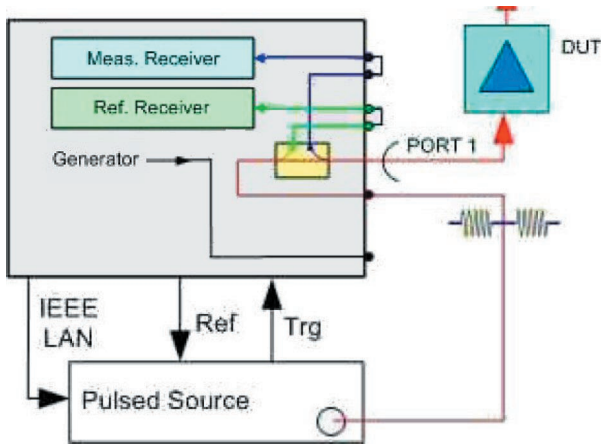


Fig 19. Configuración con un modulador de pulso externo

