

# Los generadores de funciones y formas de onda arbitrarias proporcionan versatilidad de estímulos para las aplicaciones de RF

Por J. Mees y J. Ojeda

Jonathon Mees, director de desarrollo de mercado de la división de pruebas de RF de Tektronix, Inc para EMEA

Juan Ojeda, departamento comercial de AFC Ingenieros (jojeda@afc-ingenieros.com)

*Las pruebas de circuitos y componentes de RF con respecto a las especificaciones de diseño requieren a menudo la simulación de la señal de entrada para reemplazar los componentes no disponibles o para analizar las características del dispositivo bajo diferentes condiciones. Los generadores de RF han sido la herramienta elegida durante muchos años para generar señales CW (continuous waveform) y moduladas de frecuencias superiores a 100MHz. Recientemente, los modernos generadores de funciones y formas de onda arbitrarias (AFGs) han comenzado a utilizarse cada vez más en una amplia variedad de aplicaciones de prueba de RF gracias a las mejoras significativas en versatilidad, flexibilidad y rango de frecuencias que han sido posibles gracias a los avances en la tecnología de instrumentación.*

Aparte de las señales CW y moduladas, los AFGs son capaces de generar barridos de señales sinusoidales y ráfagas de señal. Las señales con multipotadoras se pueden crear a través de la función de generación de formas de ondas arbitrarias. Los modelos con dos canales pueden incluso permitir la generación de señales I-Q. Este documento describe algunas aplicaciones de pruebas típicas de RF para las cuales los AFGs son a menudo la herramienta elegida:

- La medida del ancho de banda de filtros paso-banda y de los amplificadores de frecuencia intermedia (FI).
- La medida de la distorsión de intermodulación.
- La medida del error de cuadratura y del desequilibrio de la ganancia en los moduladores I-Q
- La simulación de las señales pulsadas de radar
- La medida de la figura del ruido pulsado

Estos ejemplos de aplicación se basan en los modelos de generadores de funciones y formas de onda arbitrarias AFG3251 y AFG3252. Estos instrumentos pueden generar señales CW de hasta 240MHz y señales pulsadas de hasta 120MHz con una potencia de salida de hasta 16dBm. Las señales pueden ser moduladas en frecuencia, amplitud y fase a través de un generador de modulación incorporado o de una fuente externa hasta frecuencias de modulación de 50kHz.

## Beneficios de la utilización de generadores de funciones y formas de onda arbitrarias en aplicaciones de RF

Los usuarios de la serie AFG3000 se benefician de 25 botones dedicados en el panel frontal que proporcionan un acceso directo a los parámetros y funciones de uso más frecuente. Esto acorta el tiempo de configuración y de evaluación en comparación con muchos otros instrumentos de su categoría en los que, para acceder a los parámetros, se ha de navegar a través de capas sucesivas de menús.

Todos los parámetros se pueden ajustar sobre la marcha a través de un control rotativo o mediante teclado numérico. La amplitud se puede mostrar en Vpp, Vrms o dBm. Durante los ajustes de los parámetros temporales, la señal de salida se mantiene libre de

Figura 1. Pantalla de la serie AFG3000

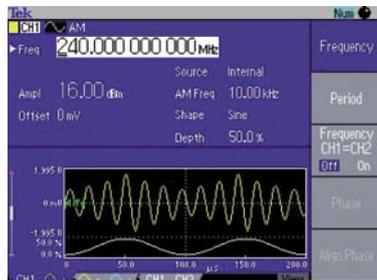
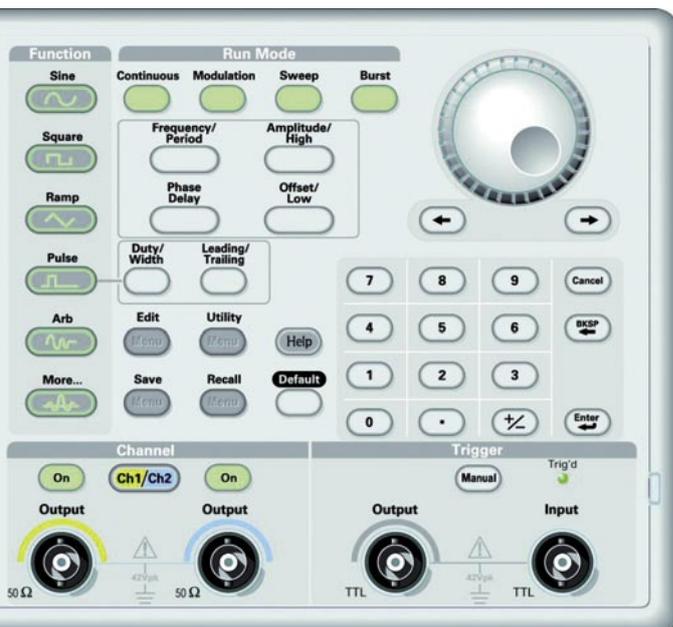


Figura 2. Panel frontal de la serie AFG3000



Model	AFG3251 / AFG3252
Channels	1 / 2
Sine Wave	1 $\mu$ Hz to 240 MHz
Amplitude	
≤200 MHz	50 mV <sub>p-p</sub> to 5 V <sub>p-p</sub> / -30 dBm to 18.0 dBm
>200 MHz	50 mV <sub>p-p</sub> to 4 V <sub>p-p</sub> / -30 dBm to 16.0 dBm
Harmonic Distortion (1 V <sub>p-p</sub> )	
10 Hz to 1 MHz	<-60 dBc
1 MHz to 5 MHz	<-50 dBc
5 MHz to 25 MHz	<-37 dBc
>25 MHz	<-30 dBc
THD (10 Hz - 20 kHz, 1 V <sub>p-p</sub> )	<0.2%
Spurious (1 V <sub>p-p</sub> )	
10 Hz to 1 MHz	<-50 dBc
1 MHz to 25 MHz	<-47 dBc
>25 MHz	<-47 dBc + 6 dBc/octave
Phase Noise, typical	<-110 dBc/Hz at 20 MHz, 10 kHz offset, 1 V <sub>p-p</sub>
Residual Clock Noise	-57 dBm
Modulation	AM, FM, PM
Source	Internal/External
Internal Modulation Frequency	2 mHz to 50.00 kHz
Frequency Shift Keying	2 keys
Source	Internal/External
Internal Modulation Frequency	2 mHz to 1.000 MHz
Sweep	Linear, logarithmic
Burst	Triggered, gated
Internal Trigger Rate	1.000 ms to 500.0 s
Gate and Trigger Sources	Internal, external, remote interface
Arbitrary Waveforms	1 mHz to 120 MHz
Sample Rate	2 GS/s
Waveform Memory	2 to 128 K

Tabla 1. Especificaciones de RF de los modelos AFG3251/52.

espurios o caídas de tensión, lo cual es importante por ejemplo, cuando se caracterizan dispositivos con un barrido de frecuencia.

Una gran pantalla LCD en color de 5,6 pulgadas muestra todos los ajustes relevantes del instrumento de un solo vistazo, junto con una representación gráfica de la forma de onda generada. Esto le proporciona al operador plena confianza en la configuración del instrumento. Por ejemplo, en el modo de modulación de amplitud, el instrumento no sólo muestra los ajustes de frecuencia y amplitud de la portadora, sino también la frecuencia de la modulación, la profundidad de dicha modulación y la forma de onda de la moduladora.

Para aquellas aplicaciones que requieren más de una señal de entrada, como RF y FI o las señales I-Q, hay disponibles modelos de dos canales que suponen un importante ahorro con respecto a tener que utilizar dos generadores de un solo canal. Puesto que la serie AFG3000 se basa en la síntesis digital directa (DDS), se puede seleccionar la forma y la frecuencia de la señal con total independencia en ambos canales. Las señales también se pueden ajustar de forma simultánea en frecuencia y/o amplitud. En este caso, la relación de fase entre ambos canales se puede ajustar manualmente, lo cual es muy útil por ejemplo para medir las diferencias temporales entre canales en los dispositivos. En la tabla 1 se resumen las capacidades de RF relativas a los modelos AFG3251 y AFG3252.

Los ingenieros que trabajan en diferentes diseños se pueden beneficiar de la versatilidad de los AFGs. Además de las formas de onda sinusoidales, pulsos y arbitrarias, la serie AFG3000 también sobresale en la generación de rampas y otras siete funciones estándar.

Cuando se utilizan los AFGs en aplicaciones de prueba de RF hay que considerar la posibilidad de que sus prestaciones de ruido de fase no alcancen los niveles proporcionados por algunos generadores de RF dedicados, lo que limita por ejemplo, su uso para pruebas de sensibilidad.

### Medida del ancho de banda de los filtros paso-banda y de los amplificadores de FI

Cada diseño de un nuevo filtro o de un nuevo amplificador de RF tiene unas características de banda de paso que deben ser medidas para asegurar que el producto cumple con los objetivos del diseño. La mayoría de los amplificadores están diseñados para ofrecer una respuesta lineal dentro de un rango de frecuencias adecuadas para su aplicación. Del mismo modo, los filtros están diseñados para dejar pasar unas bandas de frecuencias predeterminadas y rechazar todas las demás.

Ambos tipos de componentes tienden a ofrecer un rango de frecuencia donde la respuesta de amplitud es relativamente "plana". En cualquiera de los extremos de este rango, la respuesta de amplitud disminuye de manera constante. Los puntos en los que la respuesta está a -3dB por debajo del nivel máximo de la amplitud se definen los límites para la medida del ancho de banda.

En este ejemplo de aplicación vamos a examinar un amplificador de FI de 140MHz y se medirá la frecuencia inferior y la superior donde la amplitud de salida es de -3dB por debajo de la amplitud máxima, lo que es equivalente al 70,71% del valor pico a pico. El AFG proporciona un barrido de frecuencia de una señal sinusoidal a la entrada del amplificador y un analizador de espectro muestra la señal de salida en el modo de retención de picos.

Al pulsar el botón del modo de barrido en el AFG se abre una ventana con todas las opciones de ajuste de la forma de onda a la vista, incluyendo una representación de la misma forma de onda (ver figura 3). Observe con detalle la ventana con la forma de onda en la parte inferior de la pantalla. En ella se resumen todas las características más rele-

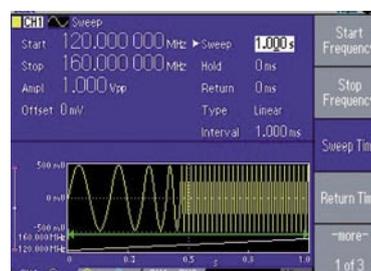


Figura 4. Respuesta de un amplificador de 140MHz

vantes sobre la señal generada: la amplitud, la frecuencia de los puntos finales, la pendiente de la rampa que incrementa constantemente la frecuencia y la longitud total (tiempo) del barrido.

La figura 4 muestra la traza de medida del analizador de espectro. Utilizando los marcadores se obtiene un resultado de medida del rango de frecuencia comprendido entre

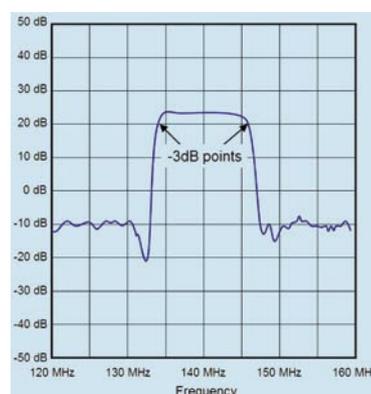


Figura 3. Pantalla de la serie AFG3000 en el modo de barrido

133MHz y 147MHz. Fuera de este ancho de banda, la respuesta del amplificador decae por debajo de los puntos de -3dB.

En este ejemplo, la interfaz de usuario del AFG y las ventajas de su arquitectura desempeñan un papel clave para lograr que el trabajo se realice de manera eficiente. El procedimiento de configuración del barrido hace que sea fácil definir la señal de estímulo necesaria. La pantalla confirma las características de la forma de onda de un vistazo, mientras que los parámetros numéricos en la misma pantalla proporcionan respuestas rápidas y precisas sobre la amplitud, la frecuencia y otros parámetros.

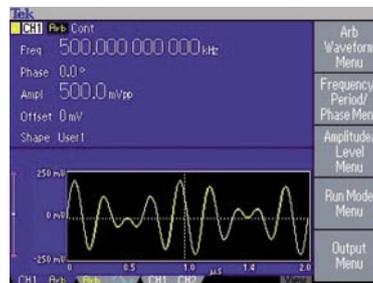
Figura 5. El AFG3252 muestra una forma de onda de doble tono.

## Medición de la distorsión de intermodulación

Cuando dos o más tonos interactúan en los amplificadores, moduladores u otros dispositivos electrónicos se producen múltiples productos de intermodulación. Este efecto se conoce como distorsión de intermodulación (IMD) y es causada por las no-linealidades del dispositivo. En las comunicaciones de RF esto presenta un problema, ya que amplía el espectro de la señal, interfiere con la señal de transmisión y reduce el rango dinámico de los transceptores inalámbricos.

Para medir la IMD de un dispositivo de radiofrecuencia es necesario utilizar como estímulo de entrada un doble tono y medir su respuesta con un analizador de espectro. Se pueden generar ambos tonos por separado con los canales 1 y 2 del AFG3252 mezclándolos externamente. Un método más elegante, sin la necesidad de un mezclador externo, consiste en crear el doble tono mediante una forma de onda arbitraria y generarlo utilizando un solo canal del AFG.

La forma de onda arbitraria de doble tono se puede definir convenientemente a través de las funciones matemáticas de formas de onda del software ArbExpress® para PC. En este ejemplo, el AFG3252 está generando tonos de 3,5MHz y 4,5MHz para probar la IMD de un modulador I-Q.



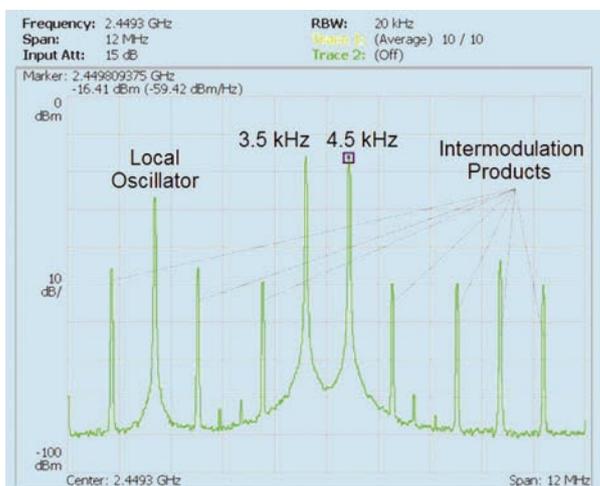
Parameters	Setting
Run Mode	Continuous
Function	Arb
Arb Waveform Menu	User1
Frequency	500 kHz
Amplitude	0.5 V <sub>pp</sub>

Una vez que se han creado los ficheros correspondientes a las formas de onda, estos se pueden guardar en dispositivos de memoria USB para transferirlos al generador de funciones y formas de onda arbitrarias. Para ello, se debe conectar la memoria USB que contiene los ficheros de las formas de onda en el puerto USB del panel frontal del AFG3252. Pulsar el botón "Edit", seleccionar en el menú de la pantalla la opción "Read from...", luego "USB" y a continuación seleccionar el archivo adecuado para el canal 1 de la lista de ficheros que aparecen en la pantalla. Luego, seleccionar "more" en la pantalla de menú y a continuación "Write to..." para cargar la forma de onda arbitraria en la memoria 'User1' del instrumento. Por último, hay que programar el AFG3252 con la configuración que se muestra en la tabla 2.

La respuesta del modulador I-Q al estímulo de doble tono se representa en la pantalla del analizador de espectro de la figura 6. Los tonos de 3,5MHz y 4,5MHz aparecen centrados en la pantalla a la derecha de la frecuencia del oscilador local. Las medidas convencionales para cuantificar la linealidad del dispositivo son los puntos de intercepción de la salida (OIP: Output Intercept Points). Estos se pueden calcular matemáticamente a partir del tono de más potencia y de la supresión de los productos de intermodulación relativos a la potencia del tono de referencia.

Tabla 2. Ajustes del AFG3252 para la medida de la distorsión de intermodulación

Figura 6. Analizador de espectro para la medida de la distorsión de intermodulación.



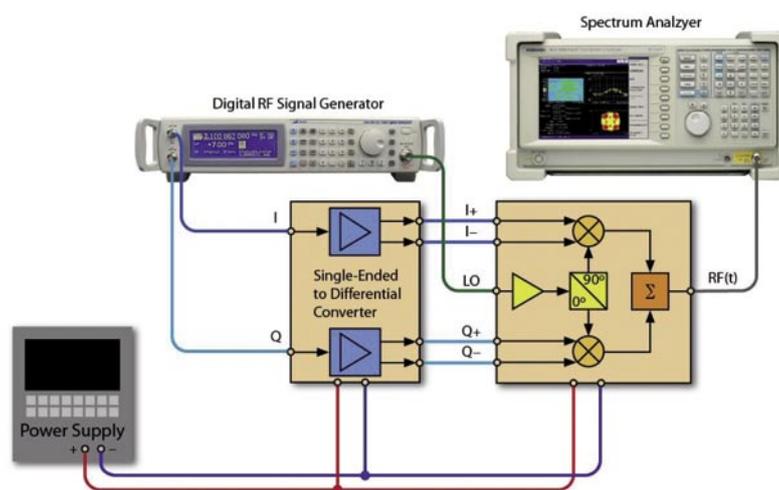
Un aspecto importante a considerar para la medida de IMD es que el generador de señal genera su propia IMD debido a la no linealidad de la etapa final. La IMD medida a la salida del dispositivo es la suma vectorial de la IMD de la fuente y del dispositivo. Mediante una medición separada se determinó que la IMD de la fuente sólo aporta un error de medida de  $\pm 0,02$  dB para el IMD de segundo orden del dispositivo, y  $\pm 0,13$  dB para el IMD de tercer orden.

Para obtener más información sobre las medidas de IMD y la creación de dos tonos con ArbExpress vea la nota aplicación 75W-20744-0 titulada "Characterization of I-Q Modulators Counts On Flexible Signal Generator Stimulus".

## Medida del error de cuadratura y del desequilibrio de la ganancia de los moduladores I-Q

Los moduladores I-Q juegan un papel fundamental en las telecomunicaciones modernas. Los diseñadores se preocupan por el desequilibrio de la amplitud y el error de fase entre las componentes I-Q del modulador en cuadratura, porque dan como resultado desplazamientos de la portadora y fugas no deseadas en bandas laterales. Las fugas del oscilador local se producen por los pequeños desplazamientos del nivel de CC entre las entradas diferenciales en banda base y son independientes del error de cuadratura. Las fugas no deseadas en las bandas laterales dependen tanto del desequilibrio de amplitud como del error de cuadratura.

Para medir el desequilibrio de la amplitud y el error de cuadratura, podemos hacer uso del hecho de que la supresión de banda lateral se puede optimizar mediante el ajuste de las diferencias de fase y amplitud entre los canales I y



### Simulación de las señales de pulsos de Radar

Figura 7. Configuración de medida para la caracterización del modulador I-Q.

Los ingenieros encargados de la elaboración de los sistemas de radar deben simular con frecuencia las señales de radar. Para determinar la distancia a un objetivo, el radar envía trenes de pulsos cortos y potentes y mide el tiempo que la señal tarda en llegar al objetivo y volver a la antena. Dado que el transmisor de la antena es rotativo, el objetivo está expuesto sólo a los impulsos de radar durante un breve período. Un requisito común consiste en simular una ráfaga de impulsos para ese tiempo durante el cual la antena está alineada visualmente con el objetivo.

Los generadores de funciones y formas de onda arbitrarias como los AFG3251/52 son ideales para generar señales de radar de baja frecuencia con pulsos de una frecuencia de hasta 120MHz (banda inferior de VHF). Las aplicaciones típicas incluyen la vigilancia naval y de larga distancia y la alerta temprana para misiles anti-balísticos. Para generar ráfagas de impulsos, el instrumento se configura como un generador de impulsos en modo de ráfaga. Muchas aplicaciones de radar se benefician de los abruptos tiempos de subida y bajada de 2,5ns de los instrumentos. Dependiendo de la aplicación, los instrumentos también pueden ser disparados internamente o mediante una señal externa.

Algunas aplicaciones requieren también formas de pulsos no cuadradas para maximizar la detección del objetivo. Para satisfacer estas necesidades, los pulsos se pueden crear con distintas formas mediante ecuaciones matemáticas u otros medios utilizando el software de edición de formas de onda ArbExpress y generarlos con generadores de funciones y formas de onda arbitrarias AFGs.

Q. Cuando se ajusta sólo uno de los parámetros, la supresión de la banda lateral se aproxima asintóticamente al límite. Por lo tanto, es necesario ajustar en forma consecutiva en varios pasos la ganancia y la fase hasta se reduzcan al mínimo las fugas indeseables de banda lateral. Los valores opuestos de los ajustes del canal Q reflejan entonces la diferencia inherente al modulador.

La configuración de medida se muestra en la figura 7. El generador de funciones y formas de onda arbitrarias proporciona la señal de entrada al modulador I-Q. Inicialmente, se configura para la medida del ancho de banda (Tabla 3).

Parameters	Setting
Channels 1 / 2 - Run Mode	Continuous
Channels 1 / 2 - Function	Sine
Frequency: Frequency CH1=CH2	0n
Amplitude: Level CH1=CH2	0n
Amplitude	0.5 V <sub>pp</sub>
Frequency	1 MHz
Channel 2: Phase	90°

Para determinar el desplazamiento del nivel de CC de las entradas diferenciales en banda base, se ajusta la alimentación de CC en el circuito de conversión de señales referidas a tierra a señales diferenciales hasta que se

minimiza la potencia de salida del modulador I-Q a la frecuencia del oscilador local.

Para determinar los errores de fase y de ganancia del modulador I-Q se debe observar la potencia de las bandas laterales no deseadas en el analizador de espectro mientras se mantienen constantes la amplitud y fase del canal 1 del AFG3252 (señal I) y se hacen ajustes reiterativos a la amplitud y fase del canal 2 (señal Q) hasta que el nivel de potencia de banda lateral sea el mínimo posible. A diferencia de los generadores vectoriales de señal con generadores I-Q incorporados que requieren la recarga de los vectores de la señal para llevar a cabo el ajuste de los parámetros, el AFG3252 permite el ajuste directo de la fase y la amplitud a través del control giratorio en el panel frontal, con una resolución de la amplitud de 0,1mV y una resolución de la fase de 0,01 grados.

Al final, la banda lateral en el modulador I-Q, utilizada aquí como un ejemplo, podría ser suprimida por la reducción de la amplitud en el canal 2 de 500mV a 461,8mV y la fase de 90° a 89,79°. En consecuencia, el desequilibrio de amplitud es de 0,0764 (0,35dB) y el error de cuadratura 0,21°.

Tabla 3. Ajustes del AFG3252 para la caracterización del modulador I-Q.

Tabla 4. Ajuste del AFG3252 para la caracterización del modulador de I-Q

Parameters	Setting
Function	Pulse
Frequency	1 kHz
Amplitude – High Level	5.000 V
Amplitude – Low Level	0 mV
Width	5%
Run Mode	Burst
N-Cycles	1000
Trigger Interval	4 s

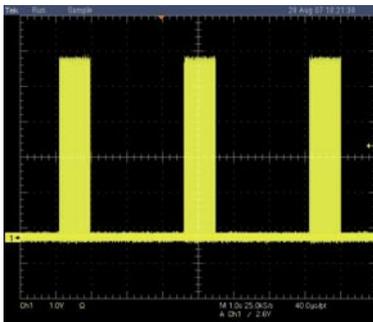


Figura 8. Pantalla de osciloscopio con señales pulsadas de radar.

A modo de ejemplo, la tabla 4 muestra los ajustes necesarios para simular un tren de pulsos de radar de 1000 pulsos con una frecuencia de repetición de 1kHz y un ciclo de trabajo del 5% que se repiten

cada cuatro segundos. La figura 8 muestra la señal de salida del AFG3251/52 medida con un osciloscopio.

Los generadores AFG3251/52 tienen la ventaja de que se puede acceder directamente a los parámetros de las formas de onda mediante teclas de acceso directo y modificarlos sobre la marcha sin tener que detener la señal de salida. Los instrumentos soportan también ciclos de trabajo para los pulsos tan pequeños como 0,001%, lo cual es a menudo un requisito en las aplicaciones de radar.

### Medida de la figura de ruido de los pulsos

La figura de ruido es un parámetro importante de los amplificadores de telecomunicaciones que especifica la cantidad de ruido con la que el amplificador contribuye al ruido en la señal de salida. Describe la degradación de la relación señal/ruido

causada por los componentes de la cadena de señal. Se define como la relación entre la señal/ruido de la entrada con respecto a presente en la salida:

$$NF = \frac{SNR_{input}}{SNR_{output}}$$

Los amplificadores de las estaciones base y de los teléfonos móviles para TDMA, GSM y otros estándares de radio que funcionan mediante trenes de pulsos consumen sólo potencia durante breves espacios de tiempo para alargar la duración de las baterías.

Para obtener resultados de medida precisos, la figura de ruido debe medirse con el amplificador funcionando en modo de pulsos como es el modo de funcionamiento normal.

Un método popular de medición de la figura de ruido es el método del Factor-Y. Se basa en una fuente

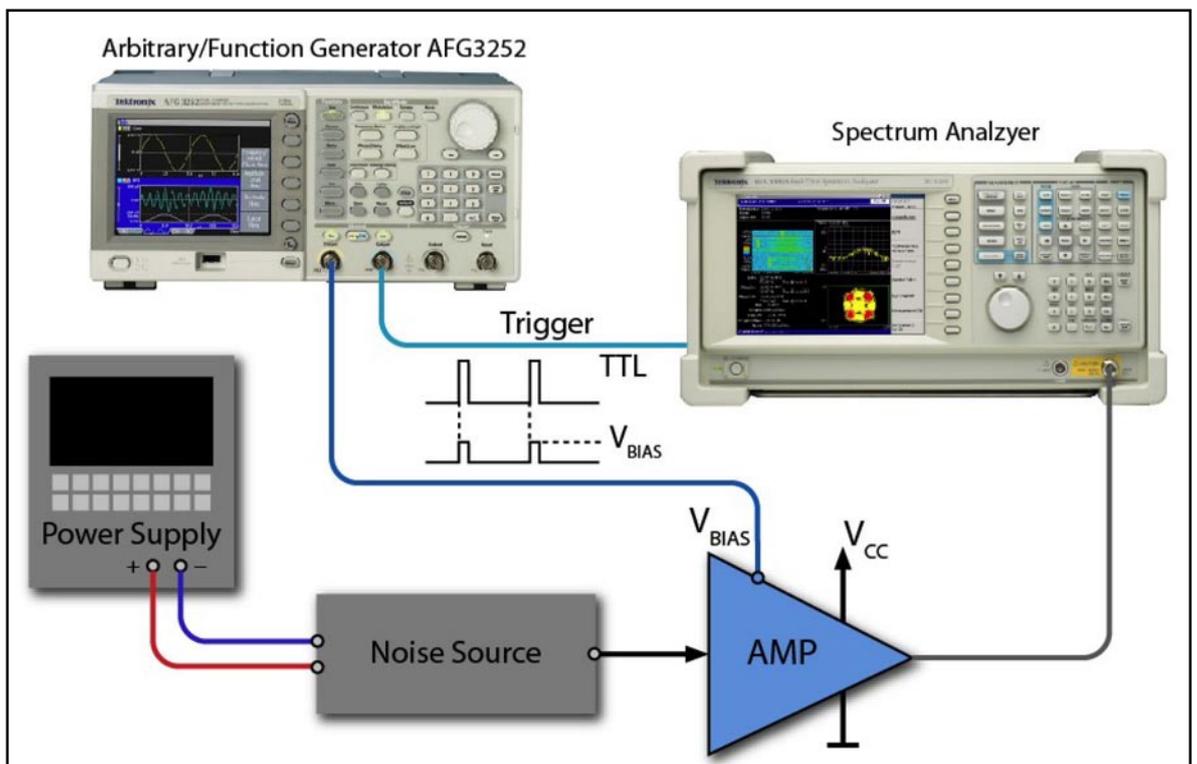


Figura 9. Configuración de prueba para la medida de la figura de ruido de los pulsos.

de ruido calibrado conocido como ENR (Excess Noise Ratio) que se conecta a la entrada del amplificador bajo prueba (véase la figura 9). El canal 1 del AFG3252 enciende y apaga el amplificador por medio de una señal pulsada que controla la alimentación del amplificador. El ancho del pulso y la tasa de repetición se establecen de acuerdo a la norma en la que está basada la prueba. El analizador de espectro se configura con un disparo externo por ventana de tiempo (gated mode) para medir la salida del amplificador sólo durante el cambio de fase. El canal 2 del AFG genera la señal de disparo para que el espectro esté sincronizado con el pulso que controla la alimentación del amplificador.

Para obtener la figura ruido con este método, hay que determinar en primer lugar el denominado Factor-Y el cual es la relación entre la densidad de ruido de la salida y la densidad de ruido de la fuente en sus estados ON y OFF. Para obtener unos resultados de medida reproducibles se necesita realizar un número suficiente de promediados.

Con la medida del Factor-Y y del ENR proporcionada por el fabricante de la fuente de ruido para la frecuencia de interés, la figura de ruido puede calcularse ahora de la siguiente manera:

$$NF = ENRdB - (10\log(Y-1))$$

A modo de ejemplo, asumamos que el ENR es 5,28dB y que la densidad del ruido medido aumentó desde -90dBm/Hz a -87dBm/Hz después de encender la fuente de ruido. Esto produce un Factor-Y de 3dB, que luego tiene que ser convertido a un valor lineal para su utilización en la ecuación anterior. Utilizando la fórmula:

$$Y(\text{lin}) = 10^{Y(\text{dB})/10}$$

obtenemos

$$Y(\text{lin}) = 1,995.$$

Colocando este valor en la fórmula anterior para obtener la figura ruido produce un NF = 5,3dB.

La ventaja de usar el AFG3000 en esta aplicación es que ofrece dos canales que se pueden sincronizar en frecuencia y ajustarse en amplitud de manera independiente para proporcionar el nivel adecuado de alimentación requerido por el amplificador y por la entrada de disparo del analizador de espectro o la del medidor de la figura de ruido.

## Resumen

Los generadores modernos de funciones y formas de onda arbitrarias son herramientas versátiles, flexibles y asequibles que soportan numerosas aplicaciones de pruebas de RF. La Serie AFG3000 puede generar una o dos señales de RF, IF y I-Q de forma independiente o

perfectamente sincronizadas hasta 240MHz. Se pueden generar formas de onda personalizadas mediante las funciones de formas de onda arbitrarias.

La Serie AFG3000 ayuda a los usuarios a acortar el tiempo de configuración debido a que los parámetros más importantes se pueden seleccionar en la serie AFG3000 a través de botones asignados, lo cual es una forma mucho más rápida que tener que navegar a través de las diversas capas menús de los instrumentos alternativos. Una gran pantalla que muestra todos los ajustes y también una representación gráfica de la forma de onda le da al usuario plena confianza en la configuración de su instrumento.

Todos los parámetros de las formas de onda, incluyendo la fase entre los canales 1 y 2, se pueden ajustar sobre la marcha mientras que la prueba sigue funcionando. Esto acorta significativamente el tiempo de evaluación en comparación con otras soluciones que requieren recargar las formas de onda cuando se cambian los parámetros. A pesar de todos sus beneficios, los generadores de funciones y formas de onda arbitrarias tienen limitaciones con respecto a los generadores de RF dedicados, especialmente cuando las frecuencias son superiores a los 240MHz o el bajo ruido de fase son un requisito.