

Analizadores de espectros. Tipos [III]

El analizador FFT

Por Javier Martín

Denver Metrología
Electrónica

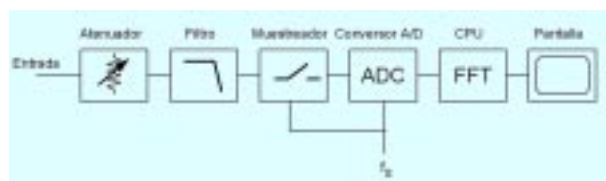
Mediante una técnica matemática denominada Transformada Rápida de Fourier (FFT), una señal se puede pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Por tanto, la FFT se puede usar para implementar un analizador de espectros, digitalizando la forma de onda de la señal de entrada y aplicando algoritmos de FFT sobre la señal en el dominio del tiempo para obtener su representación en el dominio de la frecuencia. Pero lo que puede parecer una simple técnica de medida, a menudo llega a ser mucho más complicado en la práctica. Si partimos de una potencia de cálculo suficiente, el analizador FFT puede proporcionar una mejora sensible en la velocidad de medida con respecto al analizador tradicional de barrido. El analizador basado en la FFT es un instrumento muy común en algunos campos como en el análisis de vibraciones en dispositivos mecánicos.

El analizador FFT

El funcionamiento de un analizador de espectros basado en la FFT, también denominado analizador de señal dinámico (Dynamic Signal Analyzer) es el siguiente: La señal de entrada es digitalizada en el dominio del tiempo para posteriormente aplicar el algoritmo de FFT sobre las muestras y obtener el espectro. La figura 1 muestra el diagrama de bloques simplificado de un analizador FFT. La señal de entrada pasa primero a través de un atenuador variable, proporcionando varios rangos de medida. Posteriormente, la señal se filtra mediante un filtro paso bajo para eliminar el contenido de altas frecuencias que son

Figura 2. (a) La forma de onda de la señal encaja perfectamente con el registro de tiempo. (b) Cuando la señal se replica, no se introduce ningún transitorio.

Figura 1. Diagrama de bloques simplificado de un analizador FFT.



superiores al rango de frecuencias del instrumento. A continuación, la señal es muestreada y convertida a formato digital mediante la combinación de un muestreador (sampler) y un convertidor analógico-digital. Un microprocesador u otros circuitos digitales específicos reciben la forma de onda muestreada, calculan su espectro mediante la transformada rápida de Fourier o FFT y por último, escriben el resultado en la pantalla del analizador.

Conceptualmente, la arquitectura del analizador FFT es simple, digitalizar la señal de entrada y calcular su espectro. En la práctica, hay algunos efectos que se deben tener en cuenta para dar un sentido a las medidas.

La transformada rápida de Fourier (FFT)

La transformada rápida de Fourier es un algoritmo matemático que toma datos (muestras digitalizadas) en el dominio del tiempo y calcula su representación en el dominio de la frecuencia. El algoritmo de FFT está basado en la teoría de Fourier que relaciona matemáticamente el dominio del tiempo y frecuencia.

Teorema del muestreo

La forma de onda debe ser muestreada lo suficientemente rápido para producir un registro de tiempo digitalizado que represente fielmente la forma de onda original. El teorema de muestreo establece que una señal en banda base debe ser muestreada a una velocidad mayor que el doble de la frecuencia más alta presente en la señal.

La velocidad de muestreo mínima aceptable es denominada velocidad de Nyquist.

$$f_s > 2f_{\max} \quad [E-1]$$

Donde:

f_s = velocidad de muestreo

f_{\max} = frecuencia más alta presente

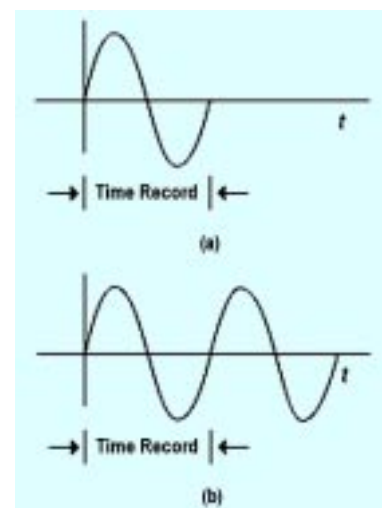
Cuando la velocidad de muestreo es inferior a la velocidad de Nyquist, aparecen componentes de frecuencia indeseable. Este fenómeno se conoce como aliasing.

Para prevenir el aliasing en los analizadores FFT, se deben cumplir dos condiciones:

- La señal debe estar limitada en banda, es decir, debe haber un f_{\max} por encima de la cual, ninguna otra frecuencia está presente. Esto se lleva a cabo mediante un filtro anti-aliasing que es básicamente un filtro paso-bajo muy abrupto.
- La señal de entrada debe ser muestreada a una velocidad que cumple el teorema del muestreo.

Leakage

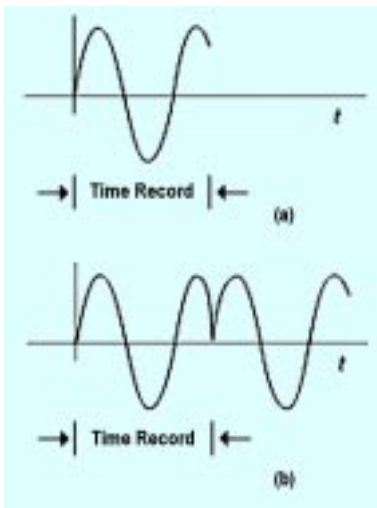
La FFT opera sobre un registro de tiempo de longitud finita en un intento de aproximarse la transformada de Fourier, que integra sobre un tiempo infinito.



Las matemáticas de la FFT (y la DFT) operan sobre un registro de tiempo finito pero replican el registro de tiempo de longitud finita sobre todo el tiempo (figura 2). Con

la forma de onda mostrada en la figura 2, el registro de tiempo de longitud finita representa la forma de onda real muy bien, de manera que el resultado de la FFT se aproximará a la integral de Fourier.

Sin embargo, la forma de onda y la fase de la señal pueden introducir un transitorio cuando la señal es replicada, tal y como muestra la figura 3.



En este caso, el espectro FFT no es una buena aproximación a la transformada de Fourier. Puesto que el usuario, normalmente, no tiene control sobre como la forma de onda se ajusta al registro de tiempo, se debe asumir, en general, que existe una discontinuidad. Este efecto, conocido como pérdida o fuga (leakage) resulta muy evidente en el dominio de la frecuencia. Las líneas espectrales aparecen sobre un amplio rango de frecuencias en vez de ser discretas (figura 4).

La solución típica al problema de la fuga es forzar la señal a que termine en cero en los extremos del registro de tiempo, de forma cuando el registro de tiempos se replique no surjan transitorios. El forzado de la señal a cero se realiza multiplicando el registro de tiempo por una función de ventana (window). La forma de esta ventana es muy

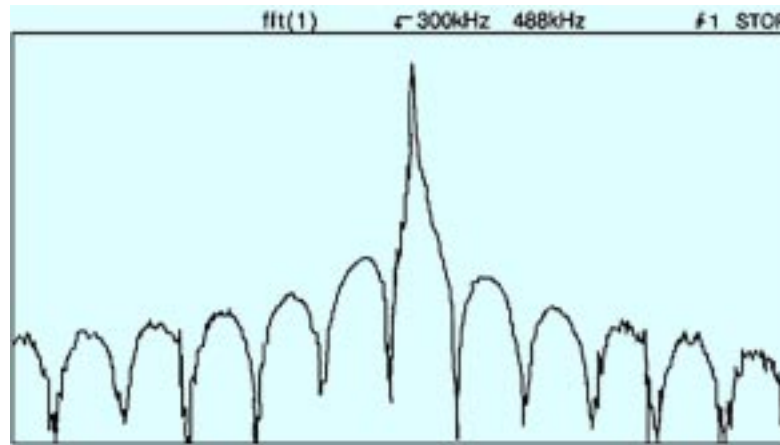


Figura 4. El efecto de las pérdidas se manifiesta en el ensanchamiento de las líneas espectrales.

importante ya que afectará al resultado final. Se han desarrollado muchas funciones window; aquí revisaremos las típicas utilizadas por los analizadores de espectros.

Hanning window

También conocida como ventana Hann, esta función es una de las más utilizadas en procesamiento digital de señal.

Las muestras de tiempo se ponderan mediante la función Hanning, proporcionando una transición suave a cero en los extremos del registro de tiempo (figura 5). Por tanto, el registro de muestras no producirá un transitorio cuando sea replicado por el algoritmo FFT.

Aunque la forma de onda en el dominio del tiempo ha cambiado, después de aplicar la función Hanning, su contenido en fre-

Figura 3. (a) La forma de onda no encaja perfectamente con el registro de tiempo. (b) Cuando la señal se replica, se introducen transitorios que producen pérdidas (leakage) en el dominio de la frecuencia.

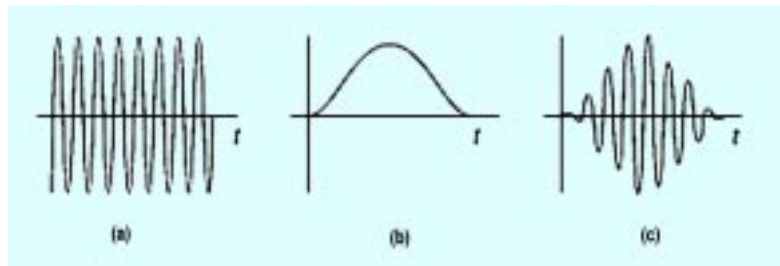


Figura 5. (a) El registro de tiempo original. (b) La ventana Hanning. (c) El registro de tiempo después de aplicar la función de ventana Hanning.

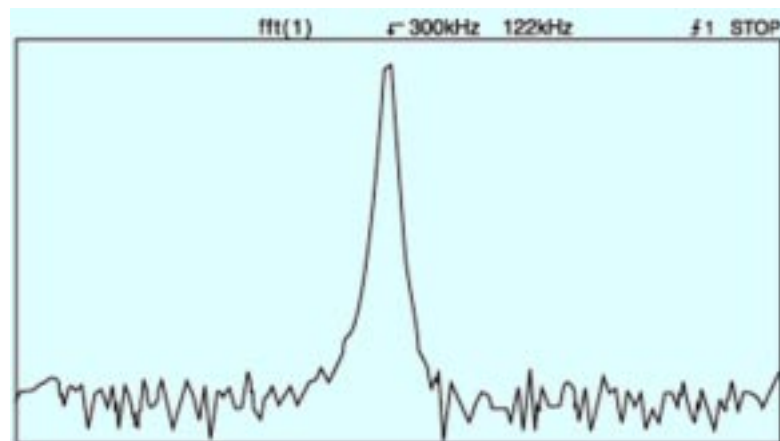


Figura 6. La ventana Hanning produce líneas espectrales relativamente estrechas.

cuencia permanece prácticamente inalterado. La línea espectral asociada con la sinusoide se extiende una pequeña cantidad en el dominio de la frecuencia como muestra la figura 6.

La ventana Hanning es un compromiso entre la precisión en amplitud y la resolución en frecuencia y comparada con otras funciones de ventana, proporciona la mejor resolución en frecuencia. El coste es la reducción de la exactitud en amplitud.

Flattop window

Una ventana con una banda de paso más plana reduce las diferencias en amplitud entre las muestras minimizando el error en amplitud. La ventana Flattop se considera muy precisa en amplitud, teniendo un error máximo de amplitud de 0.1 dB (1%).

Como contrapartida, la resolución en frecuencia es menor que en el caso de la función Hanning (figura 7).

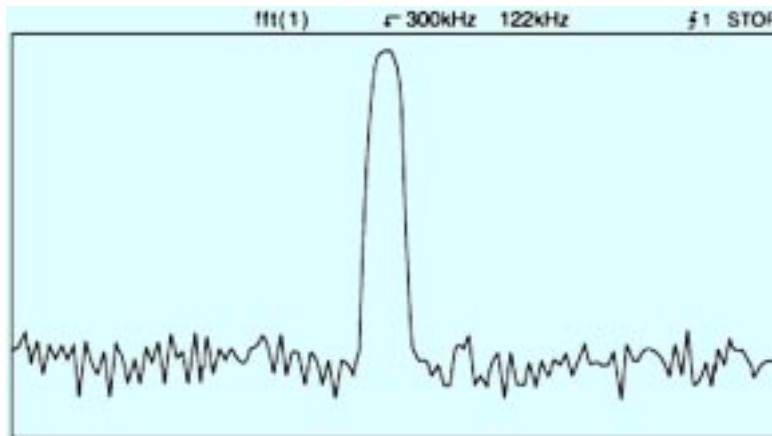


Figura 7. La ventana Flattop genera líneas espectrales más anchas.

Uniform window

La ventana Uniform no se considera realmente una ventana ya que no altera las muestras. Se usa en aquellas formas de onda que tienen el mismo valor en los dos extremos.

Exponential window

Una de las ventajas del analizador FFT es que se puede usar para medir el contenido en frecuencia de señales transitorias rápidas. En este tipo de ventana, la porción del principio de la señal no se altera, mientras que se fuerza a cero al final del registro de tiempo. Esto resulta muy conveniente en el análisis de señales transitorias.

Selección de una función window

La selección por parte del usuario de una función window puede resultar confuso, especialmente si uno está familiarizado con los analizadores de espectros de barrido. La mayor parte de las medidas requerirán el uso de funciones Hanning o Flattop. Estas dos funciones de ventana son las más usuales en medidas de análisis de espectros. Elegir entre estas dos ventanas supone un compromiso entre resolución en frecuencia y exactitud en amplitud.

Uniform se usa cuando se puede garantizar que no habrá efectos de fuga o pérdidas mientras que la ventana Exponential se usa cuando la señal a medir es un transitorio.

Representación en el dominio del tiempo

Muchos analizadores FFT permiten ver la señal en el dominio del tiempo de forma similar a un osciloscopio, sin embargo, hay algunas diferencias significativas.

Primero, la velocidad de muestreo se elige para optimizar el análisis FFT. La velocidad de muestreo debe ser lo suficientemente alta para satisfacer el teorema del muestreo, además de contar con algo de margen para la forma del filtro anti-aliasing. La velocidad de muestreo es, típicamente, dos veces y media la frecuencia más alta. Por tanto, a la frecuencia más alta, solamente habrá entre dos y tres muestras por período, claramente insuficiente para representar la señal. Por otra parte, el filtro anti-alias es un filtro muy abrupto diseñado para aproximarse a un filtro paso-bajo ideal. Este filtro introduce ondulaciones en el dominio del tiempo.

A pesar de los inconvenientes, la representación de la señal en el dominio del tiempo es útil para muchas aplicaciones. El usuario puede monitorizar la señal de entrada antes de se calcule su espectro. Algunos analizadores tienen grandes buffers que permiten capturar grandes cantidades de datos en el dominio del tiempo. Posteriormente, se pueden analizar el contenido en frecuencia para diferentes porciones de tiempo.

Analizador de barrido versus FFT

Debido al diagrama de bloques intrínsecamente simple, el analizador FFT obtiene una mejora en la velocidad respecto al analizador de

barrido. El analizador de barrido está limitado por su ancho de banda de resolución, siendo el tiempo de medida inversamente proporcional a BW_{RES} . A bajas frecuencias, se requiere anchos de banda de resolución muy estrechos para distinguir las líneas espectrales. Mientras que anchos de banda de resolución estrechos, necesitan tiempos de barrido largos, pudiendo llegar a resultar inaceptable el tiempo de medida. Por otra parte, la velocidad del analizador FFT está limitada por el tiempo necesario para adquirir los datos en el dominio del tiempo y calcular la FFT. Para una misma resolución, el analizador FFT es mucho más rápido que el analizador de barrido.

El analizador FFT está limitado por el rango de frecuencia debido a la necesidad de un convertidor analógico-digital de alta resolución para muestrear la señal por encima de la velocidad de Nyquist. Con los actuales convertidores ADC, los analizadores FFT pueden tener anchos de banda de centenares de kilohercios, mientras que los analizadores de barrido pueden medir frecuencias de centenares de gigahercios.

Para medir el espectro de señales que están constantemente cambiando, el analizador de espectros de barrido no resulta útil ya que necesita un tiempo más o menos largo para ejecutar el barrido. Durante este tiempo se pueden perder porciones de señal.

El analizador FFT adquiere un registro de tiempo que contiene toda la información espectral de la señal durante un instante de tiempo. Por tanto, el analizador FFT es más efectivo para medir señales cuyo contenido en frecuencia varía con el tiempo.

En la práctica, toda medida está limitada a tiempo finito. Para una señal cuyo contenido espectral cambia con el tiempo, debe medirse instantáneamente.

El analizador de barrido puede necesitar varios segundos o incluso minutos para efectuar un barrido completo. Durante este tiempo, la señal puede cambiar. Y, ya que el analizador de barrido está midiendo una sola frecuencia mientras barre, puede perder porciones de la señal.

Un analizador FFT adquiere un registro de tiempo que contiene toda la información espectral para ese fragmento de tiempo. El cálculo de la FFT transforma esta información en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Mientras la FFT sea calculada, al menos, tan rápido como nuevas muestras sean adquiridas, el analizador puede seguir capturando y presentando el contenido espectral de la señal sin pérdidas de fragmentos de la señal. Es por ello que el analizador FFT es más efectivo para señales cuyo contenido espectral varía con el tiempo.

El analizador de espectros híbrido

Algunos analizadores de espectros combinan la tecnología de barrido con el procesamiento digital FFT para beneficiarse de ambas técnicas.

En este tipo de analizador toda la parte de IF se implementa digitalmente como muestra la figura 8 y el resto de la arquitectura no cambia. La señal IF del analizador se digitaliza mediante un convertidor Analógico Digital y el cálculo de la FFT es llevado a cabo por un micro prosa-

dor o circuitería digital específica. La excelente resolución en frecuencia del analizador FFT y el amplio rango de frecuencia de los analizadores de barrido permiten el análisis espectral en banda estrecha a muy altas frecuencias.

El análisis de banda estrecha a altas frecuencias es particularmente útil en medidas de banda lateral próximas a la portadora como sucede en las modulaciones de banda lateral a muy baja frecuencia o en medidas de ruido de fase cercano a la portadora.

Referencias

- Brigham, E. Oran, The Fast Fourier Transform and Its Applications., Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1988.
- Hewlett-Packard Company. "Fundamentals of Signal Analysis", Application Note 243, Publication Number 5952-8898, Palo Alto, CA, 1981.
- McGille Clare D. and George R. Cooper. Continuous and Discrete Signal and System Analysis. New York: Holt, Rhinehart and Winston, Inc., 1974.
- Ramirez, Robert W. The FFT Fundamentals and Concepts. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1985.
- Stanley, William D., Gary R. Dougherty and Ray Dougherty. Digital Signal Processing, 2nd ed. Reston, VA: Reston Publishing Company, Inc., 1984.
- Witte, Robert A. Spectrum and Network Measurements. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1991.

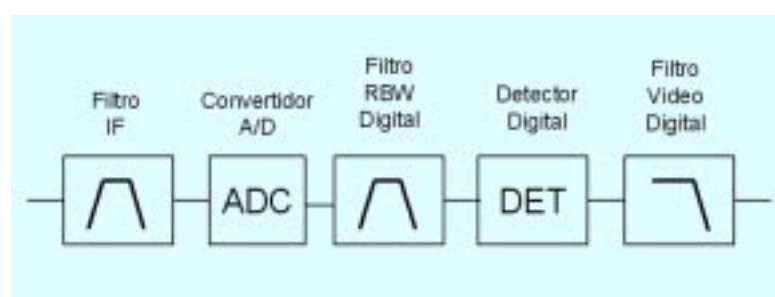


Figura 8. La sección IF/Detector en un analizador de barrido se puede implementar utilizando técnicas de procesamiento digital.