

## **I. Calibración del sistema de medición para el barrido de frecuencia**

Calibración del sistema de medición para barrido de frecuencia utilizando USRP N2920 y GNU Radio.

### **INTRODUCCIÓN**

En sistemas de medición espectral basados en radio definido por software (SDR), la calibración constituye una etapa crítica para garantizar la exactitud y trazabilidad de los resultados obtenidos. A diferencia de los instrumentos de medición dedicados, como los analizadores de espectros, los sistemas SDR dependen en gran medida de parámetros de configuración y procesamiento digital que influyen directamente en la representación de la señal en el dominio de la frecuencia.

En este contexto, previo a la realización del barrido de frecuencia, se llevó a cabo un proceso de calibración del sistema de medición conformado por un USRP N2920 y el entorno de procesamiento GNU Radio. Como instrumento patrón se empleó el analizador de espectros del laboratorio, el cual permitió validar tanto la escala de frecuencia como la magnitud espectral obtenida por el sistema SDR.

El objetivo principal de esta calibración fue asegurar la coherencia entre las mediciones realizadas por software y las observadas en el instrumento de referencia, considerando aspectos como la resolución en frecuencia, la normalización de amplitud y la correcta interpretación del eje frecuencial del espectro calculado mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

### **DESARROLLO**

### ***1.0.1 Configuración del sistema de adquisición***

El sistema de medición se implementó utilizando un USRP N2920 configurado con una tasa de muestreo de:

$$f_s = 12,5 \text{ MS/s (1)}$$

Este valor fue seleccionado de acuerdo con el ancho de banda de interés y las restricciones propias del hardware. La señal recibida por el USRP fue procesada en GNU Radio mediante un flujo de bloques orientado al análisis espectral en el dominio de la frecuencia.

La frecuencia central del sistema fue configurada dentro del rango correspondiente a las bandas de TV White Spaces (TVWS), dado que estas bandas constituyen el entorno espectral de interés del presente trabajo.

### ***1.0.2 Resolución espectral y relación con el instrumento patrón***

Para el análisis espectral se empleó una FFT de 1024 puntos, lo cual define directamente la resolución en frecuencia del sistema digital. Esta relación entre tasa de muestreo, tamaño de FFT y resolución espectral es ampliamente documentada en la literatura de procesamiento digital de señales [1].

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{12,5 \text{ MHz}}{1024} \approx 12,2 \text{ kHz (2)}$$

El analizador de espectros utilizado como instrumento patrón fue configurado con una RBW de 10 kHz, valor comparable con la resolución espectral obtenida mediante la FFT, lo que permitió una comparación coherente entre ambos sistemas.

### ***1.0.3 Ventaneo y procesamiento espectral***

Previo al cálculo de la FFT, la señal fue sometida a una ventana de tipo Blackman-Harris, seleccionada por su alta atenuación de lóbulos laterales y su efectividad en la reducción del *spectral leakage*.

Posteriormente, el espectro complejo fue procesado mediante el cálculo de la magnitud al cuadrado y convertido a escala logarítmica, procedimiento estándar en el análisis espectral y directamente comparable con la visualización ofrecida por los analizadores de espectro convencionales.

### ***1.0.4 Normalización de amplitud (factor 1/N)***

Como es bien conocido, la FFT introduce un factor de escalamiento proporcional al número de puntos utilizados. Por esta razón, se aplicó una normalización mediante un factor de:

$$\frac{1}{N}, N = 1024 \quad (3)$$

Este procedimiento, implementado mediante el bloque *Fast Multiply Const*, permite obtener magnitudes espectrales físicamente coherentes y comparables con mediciones realizadas por instrumentos de referencia [2].

La justificación teórica detallada de este factor se presenta en el **Apéndice A**.

### ***1.0.5 Escala de frecuencia del espectro FFT***

Mientras que el analizador de espectros proporciona directamente la magnitud en función de la frecuencia, el sistema implementado en GNU Radio genera un vector de longitud 1024, correspondiente a los bins espectrales de la FFT.

Por esta razón, fue necesario reconstruir explícitamente el eje de frecuencia, definido como:

$$f \in \left[ f_c - \frac{f_s}{2}, f_c + \frac{f_s}{2} \right] (4)$$

donde  $f_s$  corresponde a la tasa de muestreo del sistema. Este procedimiento permitió asociar correctamente cada bin del vector FFT con su frecuencia correspondiente, garantizando coherencia entre los datos almacenados mediante el bloque *Vector to Text File* y las mediciones realizadas con el analizador de espectros.

El desarrollo matemático de esta relación se presenta en el **Apéndice A**.

## **RESULTADOS Y HALLAZGOS**

Tras el proceso de calibración, se observó una concordancia significativa entre el espectro obtenido mediante GNU Radio y el visualizado en el analizador de espectros del laboratorio, tanto en términos de ubicación en frecuencia como en magnitud relativa.

La aplicación del factor de normalización, junto con la correcta definición del eje de frecuencia, permitió reducir discrepancias y obtener mediciones reproducibles y consistentes dentro del rango de frecuencias analizado.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La calibración del sistema SDR permitió establecer una correspondencia confiable entre las mediciones digitales y las realizadas con un instrumento patrón de laboratorio. Se evidenció que parámetros como la tasa de muestreo, el tamaño de la FFT, el ventaneo y la normalización del espectro son determinantes en la validez de los resultados.

Se recomienda documentar de manera explícita estos parámetros y repetir el proceso de calibración ante cualquier cambio en la configuración del sistema o del rango de frecuencias de operación.

- [1] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, *Signals and Systems*.
- [2] S. W. Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*.