

Práctica 2: ESTUDIO DE SEÑALES ALEATORIAS y PSD

CAMILA ANDREA BELEÑO CABRALES - 2204280
DENILSON ALFONSO CARRASCAL PIÑERES - 2190400
LUIS FERNANDO ROMERO ROJAS - 2191663

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Universidad Industrial de Santander

12 de octubre de 2024

Repositorio GitHub: https://github.com/CamilaBeleno/CommunicationsII_2024_2_B1G3.git

Resumen

In the development of this second practice, discrete signals were studied, which were subjected to different changes until the operation of each of the blocks was understood, where concepts of sampling and interpolation were taken into account. In turn, different flowcharts were implemented that allowed the generation of bipolar random binary signals and the evaluation of their behavior in both the time and frequency domains. In addition, experiments were carried out with real data sources, such as images and audio files, to observe variations in the PSD. The results obtained demonstrate how sampling parameters and noise sources influence the spectral structure of the signals, providing valuable observations on the characterization and spectral analysis of digital signals.

Palabras clave: Discretizar, muestreo, GNU Radio, PSD, potencia, Interpolación.

observar cómo las características de las señales afectan su PSD[2].

El enfoque principal del desarrollo de esta practica es el análisis de la Densidad Espectral de Potencia (PSD) de señales aleatorias. El estudio se realiza utilizando un archivo de GNU Radio que contiene los bloques necesarios para la implementación de la práctica. Se presentan los resultados obtenidos a partir de las modificaciones realizadas en el flujo de trabajo indicado por el docente. El propósito es analizar cómo la variación de ciertos parámetros influye en otros, lo cual se explora a través de ajustes y cambios en distintos bloques, tal como se detalla en secciones posteriores del informe. El objetivo es entender las relaciones entre los parámetros observados y las fórmulas asociadas, además de estudiar cómo responde el sistema ante estos cambios[3].

1. Introducción

La Densidad Espectral de Potencia (PSD) es una herramienta fundamental en el análisis de señales en ingeniería, especialmente en telecomunicaciones, donde permite comprender la distribución de energía de una señal en el dominio de la frecuencia. El estudio de la PSD es esencial para evaluar el rendimiento de sistemas de transmisión y para diseñar y analizar señales digitales[1].

El objetivo principal de este experimento es interiorizar los conceptos de señales aleatorias, generar las funciones necesarias para el cálculo de la PSD y explorar el comportamiento de las señales bajo diferentes parámetros de muestreo. Además, se comparan las señales generadas por fuentes aleatorias con aquellas provenientes de datos del mundo real, como imágenes y sonidos, para

2. Procedimiento

Durante el desarrollo de la práctica, se realizó trabajo en paralelo utilizando GitHub, una herramienta fundamental para el trabajo colaborativo y una plataforma óptima para almacenar los avances de la misma.

1. Como primera actividad, se realizó el análisis de una señal binaria aleatoria bipolar de forma rectangular. El trabajo se ejecutó utilizando el flujo-grama `randbinaayrectsignal.grc`, proporcionado en la guía de laboratorio [4]. Se utilizaron 4 valores diferentes de Sps, para los cuales se obtuvieron la forma de la señal en el dominio del tiempo [Fig.3], la densidad espectral de potencia (PSD) [Fig.3], el espectro de la señal [Fig.2] y los parámetros principales (tasa de bits, frecuencia de muestreo y ancho de banda) [Tabla.3].

- Como segundo paso, se realizaron algunos cambios en el flujograma del paso anterior para comprobar las características del ruido blanco en el dominio del tiempo y en su densidad espectral de potencia (PSD). El bloque superior, ubicado debajo del bloque "instrumentos", se configuró como "p4", mientras que el bloque inferior como "p5" [Fig.2]. Seguidamente se realizaron varias pruebas para analizar el comportamiento del ruido blanco [Fig.3] y se registraron los resultados [Tabla.3] .

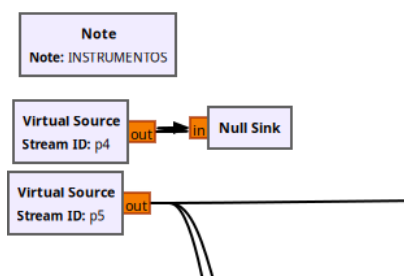
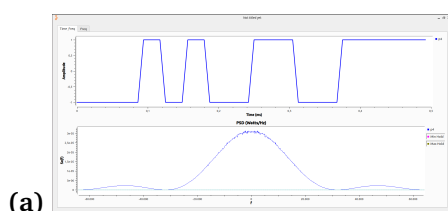


Figura 1. Cambio en el diagram de bloques

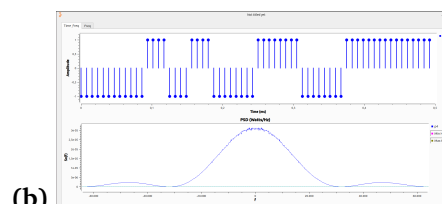
- Utilizando el flujograma original, se reemplazó el bloque "Random Source" por un bloque "File Source", el cual se configuró para leer el archivo rana.jpg, proporcionado en la guía de laboratorio. Se realizaron varias pruebas para observar el comportamiento de la señal en el dominio del tiempo y la frecuencia cuando los bits provienen de una fuente del mundo real, como en el caso de una cámara fotográfica.
- Por último, se configuró el "File source" del punto anterior por un archivo de audio sonido.wav para comprobar el comportamiento de la señal en el dominio del tiempo y la frecuencia cuando los bits provienen de una fuente del mundo real, como en el caso de un micrófono.

3. Resultados

■ Primera parte



(a)



(b)

Figura 2. a) Señal en el dominio del tiempo y PSD.

b) Señal en el dominio del tiempo muestreada y PSD.

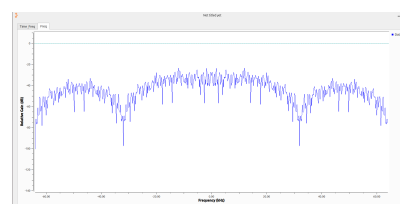


Figura 3. Espectro de la señal

Sps	Rb	Fs [Hz]	Bw [Hz]
1	32000	32000	16000
4	32000	128000	64000
8	32000	256000	128000
16	32000	512000	256000

Tabla 1: Parámetros principales de la señal.

Se trabajó con señales binarias aleatorias, variando el número de muestras por símbolo (Sps). A medida que se incrementa el Sps, el ancho de banda de la señal también aumenta, lo que mejora la resolución en el análisis de la Densidad Espectral de Potencia (PSD). Esto muestra cómo un mayor Sps amplía el espectro de la señal, proporcionando una mejor representación en el dominio de la frecuencia, algo crucial en telecomunicaciones.

■ Segunda parte

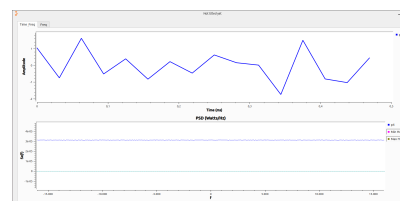


Figura 4. Señal en el tiempo y PSD del ruido blanco

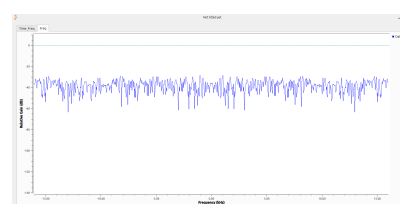


Figura 5. Espectro del ruido blanco

Sps	Nivel de Ruido	Ganancia relativa[dB]
1	3e-5	-40
4	8e-6	-40
8	4e-6	-40
16	2e-6	-40

Tabla 2: Cambios en el Ruido Blanco.

El análisis del ruido blanco reveló cómo este afecta la PSD de una señal. Aunque el ruido blanco ideal tiene un espectro uniforme, las limitaciones de GNU Radio lo restringen a un rango de frecuencias. Los resultados mostraron que el ruido introduce distorsiones que degradan la calidad de la señal, lo que refuerza la importancia de mitigar el ruido en sistemas de comunicación para mantener una buena relación señal/ruido (SNR).

■ Tercera parte

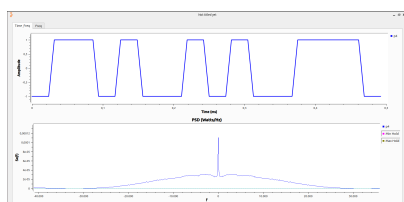


Figura 6. Señal en el tiempo y PSD imagen con sps = 4

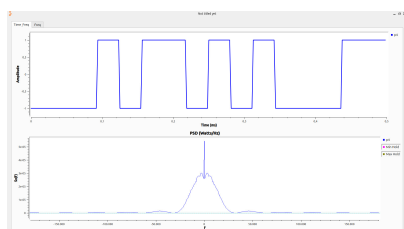


Figura 7. Señal en el tiempo y PSD imagen con sps = 16

El uso de imágenes como fuente de datos reales demostró que las señales provenientes de imágenes presentan una mayor PSD debido a su mayor contenido de información, en comparación con señales de audio.

■ Cuarta parte

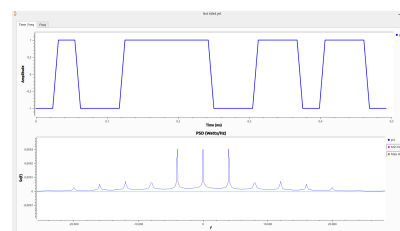


Figura 8. Señal en el tiempo y PSD audio con sps = 4

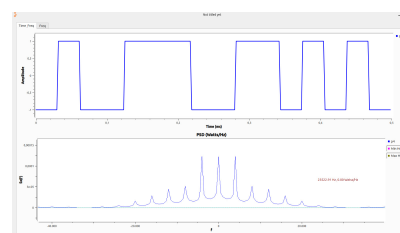


Figura 9. Señal en el tiempo y PSD audio con sps = 16

Al analizar señales de audio, se evidenció que estas ocupan menos ancho de banda y presentan una PSD menor que las señales de imagen, lo que sugiere la necesidad de ajustar parámetros según el tipo de datos transmitidos.

4. Preguntas de control

En las siguiente parte se realiza el desarrollo de las preguntas de control para dar claridad a los conceptos vistos en la practica.

- El objetivo de esta combinación de bloques es convertir la señal binaria unipolar de entrada en una señal binaria bipolar. Para lograrlo, se aplica un ajuste de desplazamiento y escalado a la señal original, lo que permite que su valor promedio se sitúe en cero y que su amplitud aumente, todo esto con el fin de mejorar el análisis de la Densidad Espectral de Potencia (PSD), ya que incrementa la energía de la señal, facilitando una mejor interpretación de sus características.

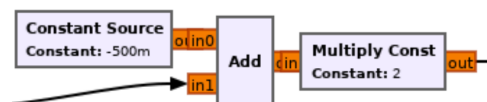


Fig 10. Combinación de bloques de Gnu Radio

- El bloque funciona como un filtro de respuesta al impulso finito (FIR), que realiza la convolución de la señal de entrada con la respuesta al impulso del filtro, representada por el vector h.



1. El filtro actúa como un interpolador racional que ajusta la tasa de muestreo de la señal de entrada según el valor del SPS, el cual define cuántas muestras por símbolo se generan durante la interpolación. La tasa de muestreo de la señal de salida se obtiene al multiplicar la tasa de muestreo original por el SPS. Por lo tanto, un incremento en el SPS implica un aumento en la tasa de muestreo, mientras que una reducción del SPS produce una disminución proporcional en la tasa de muestreo. El filtro emplea un método basado en la regresión de cresta para calcular los coeficientes del interpolador, lo que previene inestabilidades numéricas que podrían surgir con otros métodos.
2. diagrama de flujo indica que en P3 se almacena la señal binaria unipolar de entrada, sin aplicar ningún tipo de procesamiento. Esta señal sirve como punto de partida para el análisis posterior. Para acceder a ella, es necesario conectar la etiqueta P3 al "virtual source".^{en} P4, donde se encuentran los bloques adecuados, o realizar una configuración de bloques similar.

$$3. \quad B_w = \frac{R_b \cdot S_{ps}}{2}$$

$$4. \quad F_{sps3} = \frac{F_{sps4}}{S_{ps}}$$

- La Densidad Espectral de Potencia es una medida que describe cómo se distribuye la potencia de una señal en función de la frecuencia. Generalmente, el PSD de una imagen es mayor que el de una señal de audio, ya que las imágenes contienen más información y una mayor variedad de frecuencias[1]. Esto se debe a que cada píxel de una imagen se representa con 8 bits, lo que codifica tanto el color como la intensidad. En contraste, el audio suele comprimirse con un bitrate menor, lo que reduce el tamaño del archivo y, a su vez, la calidad del sonido. El bitrate es la cantidad de bits utilizados para codificar un segundo de audio; cuanto menor sea el bitrate, mayor será la pérdida de información y menor la fidelidad del sonido.
- El bloque "Throttle" permite limitar la velocidad de procesamiento, estableciendo un límite en la tasa de muestreo para que coincida con la capacidad de procesamiento del hardware.
- Si no se realiza la conversión a una señal bipolar, la PSD de una señal binaria sería simétrica en torno a

la frecuencia cero. Esto ocurre porque la señal binaria contendría tanto valores positivos como negativos, en lugar de ser exclusivamente positiva. La PSD de una señal binaria aleatoria es periódica, con un período equivalente a la tasa de bits (R_b) de la señal. Su amplitud se mantiene constante a lo largo de todo el ancho de banda. En el caso de las señales bipolares, la PSD muestra un lóbulo principal en la frecuencia cero, que es el de mayor amplitud, junto con lóbulos secundarios a ambos lados de esta frecuencia, aunque con una amplitud menor. Por otro lado, cuando la señal es unipolar, la PSD carece de estos lóbulos secundarios y presenta una simetría alrededor de la frecuencia cero, con una amplitud constante a lo largo del espectro.

- Teóricamente el ruido blanco tiene un ancho de banda infinito porque contiene todas las frecuencias con igual intensidad. Sin embargo, en GNU Radio, este comportamiento no es completamente replicado debido a las limitaciones del sistema, como la capacidad de procesamiento y el ancho de banda disponible. En realidad, el ruido blanco que se genera en el entorno digital está restringido a un rango de frecuencias definido por la configuración del sistema y los filtros aplicados. Además, el ruido blanco en GNU Radio se crea a partir de señales con amplitud y frecuencia aleatorias, pero estas frecuencias solo abarcan el rango que el sistema puede manejar, lo que limita su ancho de banda efectivo.
- El ancho de banda de una señal binaria aleatoria con forma rectangular está condicionado por el bloque Random Source. Este componente permite la creación de una señal binaria aleatoria que presenta una forma de onda caracterizada por pulsos rectangulares. Al observar esta forma de onda, se notará que consiste en una secuencia de pulsos rectangulares. La amplitud de estos pulsos será aleatoria y su frecuencia variará, lo que influirá en el comportamiento general de la señal.
- Para calcular el número de lóbulos de la Densidad Espectral de Potencia (PSD) de una señal binaria aleatoria de forma rectangular, cuando se conocen la frecuencia de muestreo (F_s) y el número de muestras por símbolo (S_{ps}) se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$N = \frac{f_s}{R_b}$$

Donde:



N es el número total de lóbulos de la PSD.

f_s es la frecuencia de muestreo.

R_b es la tasa de bits de la señal, que puede relacionarse con Sps a través de la siguiente relación:

$$R_b = \frac{f_s}{Sps}$$

Dado que el lóbulo de la mitad se cuenta como dos, al calcular el número de lóbulos, hay que tener en cuenta que cada lóbulo principal y los lóbulos secundarios se suman, lo que implica que el resultado total se multiplica por 2 para considerar el lóbulo de la mitad. Por lo tanto, el número total de lóbulos en la PSD de una señal binaria aleatoria rectangular utilizando la frecuencia de muestreo y el número de muestras por símbolo se puede expresar como:

$$N_{total} = 2 \cdot \frac{f_s}{R_b} = 2 \cdot Sps$$

- Para calcular el rango de frecuencias que ocupa el espectro cuando se conoce R_b y Sps:

1. Calcular la frecuencia de Nyquist (F_n): $F_n = F_s / 2$
2. Calcular la frecuencia de banda base (F_b): $F_b = (F_{max} + F_{min}) / 2$
3. Calcular el ancho de banda (BW): $BW = F_{max} - F_{min}$
4. Calcular el rango de frecuencias (R_f): $R_f = 2 \cdot BW$
5. Considerar el efecto de R_b y Sps: $F_s = R_b / Sps$

Se tiene en cuenta que no son constantes universales son valores que dependen de la naturaleza de la función haciendo uso de diferentes herramientas vistas.

- La resolución espectral (R_s) de un analizador de espectros se determina al dividir la frecuencia de muestreo (F_s) por el número de puntos (N) utilizados en la Transformada Rápida de Fourier (FFT) así mismo se tienen en cuenta parámetros como la frecuencia de muestreo y la ventana de trabajo de la señal[5].
- Configurar el parámetro K como 16 en el bloque "Unpack K Bits". Aumenta la resolución de la señal, pero también reduce el rango dinámico, aumenta la memoria y el tiempo de procesamiento.

- Para el cálculo de la frecuencia de muestreo en el bloque "Unpack K Bits":

1. Frecuencia de Nyquist: Se calcula dividiendo el ancho de banda (BW) por 2: $F_n = BW / 2$.
2. Frecuencia de resolución: Se calcula dividiendo la frecuencia de Nyquist (F_n) por el número de lóbulos (N): $F_r = F_n / N$.
3. Frecuencia de muestreo: Debe ser mayor o igual que la frecuencia de Nyquist. Se puede elegir como un múltiplo de la frecuencia de resolución: $F_s = F_r \cdot M$.

- La frecuencia de muestreo a la salida del bloque "Unpack K Bits" depende de la configuración del parámetro K .

1. $K = 1$:
Si $K = 1$, el bloque "Unpack K Bits" no modifica la frecuencia de muestreo. La frecuencia de muestreo a la salida será la misma que la frecuencia de muestreo a la entrada.
2. $K > 1$:
Si $K > 1$, el bloque "Unpack K Bits" aumenta la frecuencia de muestreo por un factor de K . La frecuencia de muestreo a la salida será: frecuencia de entrada por K .

- Al cambiar chartofloat estamos cambiando la entrada directamente, es decir la cantidad de bits utilizados, la respuesta cambiaría según la cantidad de memoria que ocupemos ya sean 16, 32, 64 bits etc.

- En las señales bipolares, la PSD puede asemejarse a la del ruido blanco cuando la entrada es aleatoria, replicando el comportamiento del ruido. Esto sucede al añadir ruido a una señal arbitraria, generando una mezcla de componentes espectrales que resulta en una PSD similar a la del ruido blanco. Comprender esta relación es fundamental para optimizar sistemas de comunicación, ya que ayuda a evaluar cómo el ruido impacta la calidad de las señales.

- El diagrama se acomodó de tal manera que se pudieron obtener los diferentes resultados esperados, obteniendo así un análisis más amplio a cada una de las modulaciones y posibles respuestas de una señal cuadrada.

- Se le proporcionaría un vector más amplio, ya que mayor sea el valor del vector mas se parecerá a la señal Unipolar RZ ya que este valor de h está asociado a la cantidad de muestras que se desean tomar al momento de hacer un proceso de filtrado.
- Se cambiaría el vector por el mismo valor de muestras, pero intercalando por -1 cada vector de por medio; $h = [1, -1, 1, -1, 1, -1]$.
- Para que la señal se parezca a la figura 4 se debe modificar directamente el vector por un vector que contenga únicamente ceros y unos, representando en que instantes se quiere que pase o no la información $h = [1, 0, 1, 0]$ y también es necesario aumentar la cantidad en la interpolación del bloque FIR FILTER.
- Para que la señal utilizada se parezca a una forma de señal BPSK es necesario modificar el vector h de tal manera quede así: $h = [1, 1, 1, -1]$ y también es importante aumentar la cantidad de interpolación del bloque FIR FILTER.
- Para poner la señal FSK en el sistema utilizado no es posible ya que no se puede hacer cambio en la frecuencia para poder desfasarla y disminuirle el periodo.
- Para que la señal en concreto se parezca a un latido de corazón se aumentó la interpolación y especificar el vector h de la siguiente forma; $h = [1, -1, 0.5, -1, 0.5, 0, -1, 1]$.
- Se modificó el valor del h para poder tener una señal con rizado, haciendo que este vector sea progresivo.
- La comparación entre las señales bipolares y unipolares en términos de Densidad Espectral de Potencia (PSD) radica en la cantidad de energía que cada tipo de señal presenta. Las señales unipolares exhiben picos de potencia significativamente más altos en su PSD, ya que solo utilizan valores positivos. En contraste, las señales bipolares, que alternan entre valores positivos y negativos, muestran picos de potencia más sutiles. Esto se debe a que la presencia de componentes negativos puede reducir la energía total en ciertas frecuencias, haciendo

que los picos en su PSD sean menos marcados que en las señales unipolares.

5. Conclusiones

A través de esta práctica, se profundizó en el análisis de señales aleatorias y su Densidad Espectral de Potencia (PSD), utilizando GNU Radio para estudiar cómo los parámetros de muestreo y el ruido influyen en las señales. El aumento en la tasa de muestreo mostró un mayor ancho de banda y resolución, mejorando la transmisión de datos. Además, el ruido blanco afectó significativamente la PSD, destacando la importancia de su mitigación en sistemas reales. Finalmente, el análisis de señales provenientes de imágenes y sonidos evidenció cómo el tipo de datos impacta el diseño de sistemas de comunicación, mejorando su eficiencia y robustez.

Referencias

- [1] . T. D. C. C, L. A. L, "Radio definida por software: Una mirada a las tendencias y aplicaciones," *Análisis frecuencial y de la densidad espectral de potencia de la estabilidad de sujetos amputados*, 2020.
- [2] National, "Diferencia entre calcular el espectro de potencia y la densidad del espectro de potencia de una señal." [Online]. Available: <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z0000015A5tSAE&l=es-CO>
- [3] O. R. H. Ortega, "Comunicaciones digitales basadas en radio definida por software."
- [4] O. J. T. Rojas, "Psd de señales aleatorias (gnuradio)." [Online]. Available: https://lms.uis.edu.co/ava/pluginfile.php/30288/mod_resource/content/4/Laboratorio%203.%20PSD_2024_2.pdf
- [5] rohde schwarz, "Entendiendo el funcionamiento básico del analizador de espectro." [Online]. Available: <https://www.rohde-schwarz.com/lat/productos/prueba-y-medicion/essentials-test-equipment/spectrum-analyzers/entendiendo-el-funcionamiento-basico-del-analizador-de-espectro-256005.html>