



Práctica 2: Densidad espectral de potencia de señales aleatorias (GNU Radio)

Josman Esneider Rico Torres - 2201530

Juan Pablo Diaz Lemus - 2200530

Deisy Tatiana Torres Pedraza - 2200502

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

14 de marzo de 2024

Resumen

En la siguiente práctica de laboratorio se llevó a cabo el estudio de señales binarias aleatorias rectangulares junto con señales del mundo real, como imágenes y audios. Esto se realizó mediante el software GNU Radio, el cual permite el procesamiento de señales en tiempo real mediante bloques modificables. De esta manera, se reforzaron los conceptos teóricos y se obtuvieron diferentes modulaciones como OOK, BPSK y FSK, junto con otras formas de onda en consecuencia a cambios en el flujograma. Además, se observó su comportamiento en el dominio del tiempo y la frecuencia, analizando la densidad espectral de potencia de cada señal.

Palabras clave: señal binaria aleatoria, densidad espectral de potencia, modulación OOK y BPSK.

crucial al realizar procesamientos que involucren directamente la forma en frecuencia de la señal, como el filtrado o la modulación.[1]

2. Procedimiento y análisis de resultados

De acuerdo con el flujograma correspondiente a la práctica, se comenzó realizando variaciones del valor de h que a su vez modificó 'sps' y se obtuvieron las implicaciones en el resto de parámetros del sistema, esto puede ser observado en la tabla 1.

1. Introducción

Al recibir un mensaje en las comunicaciones digitales, este suele estar definido en términos de señales cuadradas binarias, ya sean unipolares o bipolares. Para diseñar un sistema de comunicación digital, resulta crucial manejar correctamente las señales binarias aleatorias, ya que éstas modelan el mensaje recibido. Por lo tanto, es fundamental comprender la influencia de la frecuencia de muestreo, la interpolación y la densidad espectral de potencia (PSD) de estas señales para realizar un tratamiento adecuado de las mismas.

Las señales bipolares aleatorias pueden ser de diferentes tipos, siendo dos de las más comunes las señales binarias unipolares y las señales bipolares. Ambas se caracterizan por transmitir el mensaje codificado en forma de bits de manera serial. Es importante tener en cuenta que ambos tipos de señales tienen diferentes densidades espectrales de potencia (PSD), lo cual es un parámetro

Sps	Tasa de bits (bps)	Fs (Hz)	BW (Hz)
1	32000	32000	32000
4	32000	128000	128000
8	32000	256000	256000
16	32000	512000	512000

Con base en la tabla 1, se puede observar que a medida que el Sps aumenta, la frecuencia de muestreo también aumenta junto con el ancho de banda debido a que este indica la cantidad de muestras por segundo tomada, más símbolos por segundo implican más cambios de la señal a lo largo del tiempo y para satisfacer el teorema de Nyquist y evitar la pérdida de información, es necesario muestrear a una frecuencia mayor. Sin embargo, las variaciones en 'Sps' no modifican la tasa de bits, la cual permanece constante, indicando que no se encuentra relación entre Sps y la velocidad a la que se transmiten los bits.

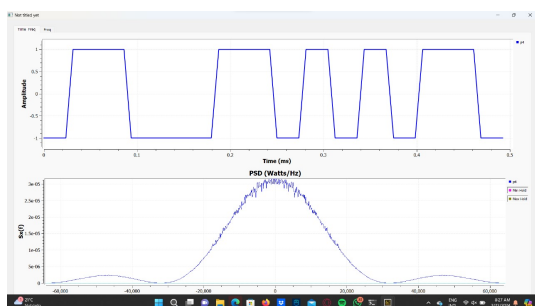


Fig. 1: Señal de salida con SPS=4.

A medida que aumenta 'h' y en consecuencia 'sps' es posible apreciar que la representación de la señal en tiempo, toma un comportamiento rectangular, mientras que en la PSD se contempla un espectro mas suave y se asemeja a una funcion sinc.

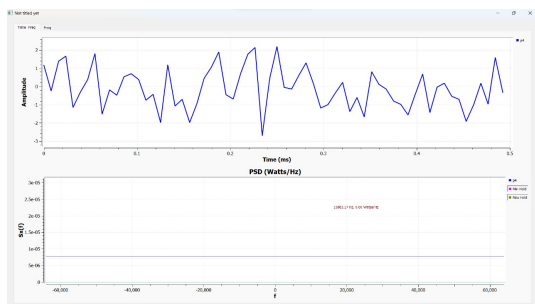


Fig. 2: Ruido blanco y su PSD.

En la figura 2 se muestra el comportamiento en el dominio del tiempo, donde cada muestra representa una variable aleatoria. En el dominio de la frecuencia, la densidad espectral de potencia (PSD) se representa como constante en todo el rango de frecuencias. Este comportamiento se traduce en una potencia infinita, ya que al ser constante a lo largo de su espectro, cuanto mayor sea el ancho de banda de referencia tomado, mayor será la potencia del ruido en esa región. Esto afecta la relación señal a ruido (SNR).

Al cambiar el mensaje para que tenga la forma de una señal binaria unipolar, además de las evidentes diferencias en el dominio del tiempo, se puede notar un impulso en la frecuencia cero. En la figura 3, se utiliza una señal real como entrada, en este caso, una fotografía. Lo cual se relaciona con el nivel de offset presente, dado que el área bajo la curva no es simétrica en el eje X.

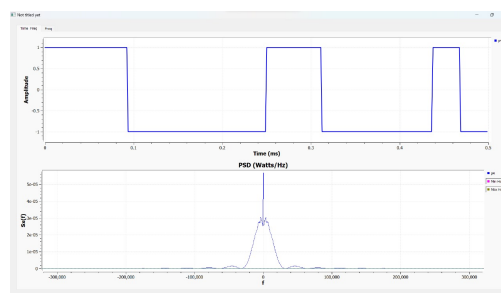


Fig. 3: Señal fuente fotográfica.

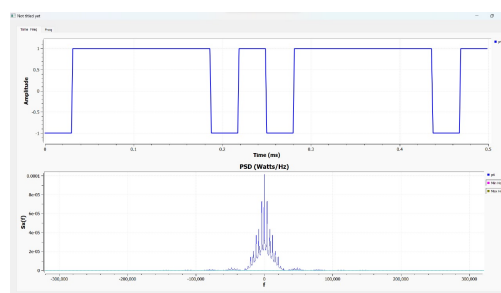


Fig. 4: Señal fuente de audio.

La señal de audio vista en la figura 4 presenta más armónicos en su respuesta en frecuencia mientras que la señal fotográfica presenta un ancho de banda continuo. El audio, a diferencia de la imagen contiene mucha mas información a lo largo de sus frecuencias, lo que se traduce en mas capacidad espectral y a su vez mas psd; La imagen tiene un fondo continuo y una frecuencia asociada a los colores, es decir, la mayor cantidad de pixeles tiene un color base, y por lo tanto, una frecuencia baja.

Otro de los bloques principales del sistema utilizado es el filtro digital de interpolación, el cual puede modificar considerablemente la forma de la señal de salida y además desempeña un papel crucial en la resolución del mensaje transmitido, como se ve en las figuras 5 y 6.

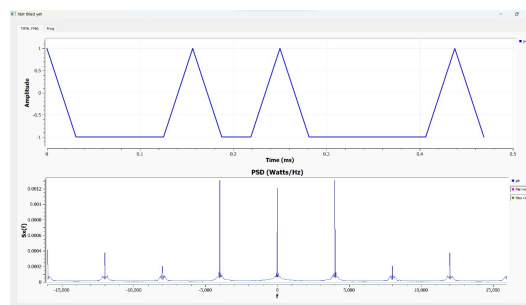


Fig. 5: Señal de audio a un SPS=1.

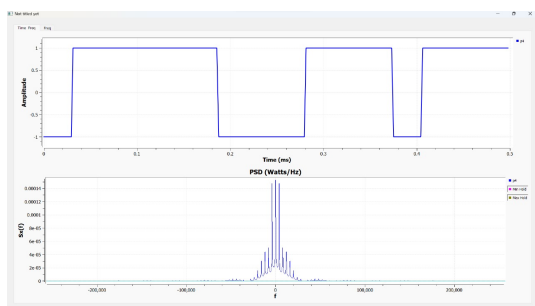


Fig. 6: Señal de audio a un SPS=16.

De las figuras se puede concluir que el número de muestras por segundo que agrega el bloque de interpolación para un vector h que corresponde a un vector de unos, es decir, que no modifica la señal, influye directamente en la resolución de la señal transmitida. Esto se debe a que cuanto mayor sea la tasa de muestras por segundo (SPS), mayor será el número de muestras agregadas y, por ende, mayor será la resolución final de la señal.

Esto se sustenta en base a la siguiente ecuación teórica que describe el proceso del filtro de interpolación (ecuación 1).

$$y[n] = x[n] * h[n] \quad (1)$$

Para este caso, $h[n] = u[-n + K]$, donde K puede verse como el número de muestras del filtro de interpolación, en este caso representado por SPS. Por ende se puede intuir que modificar el parámetro H del sistema puede cambiar la señal de la forma que deseemos, en este caso donde $h[n]$ se ve como un vector de unos, la señal no se ve afectada en su forma pero si en la cantidad de muestras de salida debido a la definición de la convolución discreta.

En GNU Radio [2], el bloque 'Throttle' se utiliza para controlar la velocidad a la que los datos fluyen a través del flujo de señal. Se ubica después de un interpolating filter (bloque anteriormente mencionado) para gestionar la velocidad de procesamiento, más en detalle, ayuda a evitar que el sistema se sature o que la memoria se llene debido a un procesamiento demasiado rápido.

La PSD describe la distribución de potencia de una señal en el dominio de la frecuencia. Si una señal binaria en p4 solo tiene valores de 0 ó 1 en lugar de -1 ó 1, afectaría la PSD de la señal en términos de su amplitud

y distribución espectral. Sumado a esto, aumenta considerablemente la componente media de la señal debido a que el área bajo la curva no se cancela con su parte negativa.

En GNU radio, una señal aleatoria binaria de forma rectangular no posee un ancho de banda infinito debido a que la señal que genera el software es una señal digital que está compuesta de valores discretos dados a una frecuencia de muestreo determinada que dependiendo de esta es posible tener mayor o menor calidad de la información representada en una tasa de bits, esta última limita el ancho de banda de la señal procesada.

El rango de frecuencias total que procesará el programa está definido por los valores de R_b y SPS siendo el producto de estos valores. Por otro lado, La resolución espectral es importante porque determina la capacidad del analizador de espectros para distinguir dos señales en frecuencias cercanas. Un valor más pequeño de f indica una mayor capacidad de resolución, es decir, mayor destreza para distinguir frecuencias cercanas entre sí. Esta relación se observa en la ecuación 2

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (2)$$

Las variación del parámetro K a 16 en el bloque "Unpack K Bits" significa que el bloque estará desempaquetando 16 bits de la señal de entrada en cada paso. Esto traduce el procesamiento de más bits en simultáneo, complejidad computacional, mayor ancho de banda y más precisión de la señal. Sin embargo, es importante resaltar que al tener mayor cantidad de bits con la misma velocidad de procesamiento se ve afectado el resultado dado que puede llegar a perder muestras o procesarlas incorrectamente.

El bloque 'char to float' sólo se encarga de cambiar el tipo de variable para permitir operar correctamente, esto proviene del lenguaje python ya que las inputs suelen estar definidas como 'str' y debe hacerse el cast a 'float', por ende no afecta la frecuencia de muestreo.

Teniendo más claridad en el funcionamiento de los bloques del sistema, es posible modificar el parámetro h para lograr los diferentes tipos de modulaciones como la OOK, BPSK y FSK, u otras señales como la señal diente de sierra, pulsos tipo sinc o pulsos rizados como se observa en las figuras 7, 8 y 9.

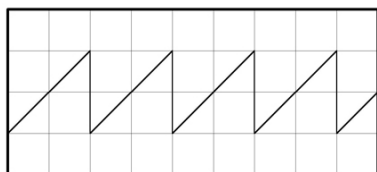


Fig. 7: Señal diente sierra.

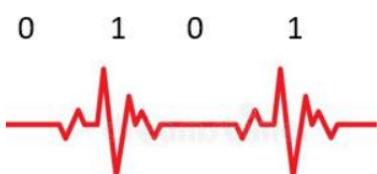


Fig. 8: Pulsos tipo sinc.

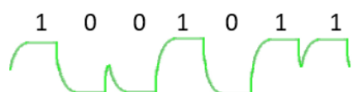


Fig. 9: Pulsos Rizados.

Para ello se plantean los siguientes valores del parámetro h .

Si desea que la señal binaria aleatoria tenga codificación de línea Unipolar RZ, el tratamiento de la señal ajustaría el offset a 0 y el escalamiento a 1, con esto la señal pasa a ser línea unipolar con retorno a 0. De manera similar, para obtener una señal de tipo manchester, hace falta únicamente modificar el escalamiento en el proceso de conversión para obtener la forma de la señal deseada.

Para la modulación OOK se plantea, teniendo en cuenta la ecuación 1, un $h[n] = \sin[n] \times u[-n+K]$, donde K corresponde al parámetro SPS del sistema. Además, se utilizó como entrada del filtro de interpolación una señal binaria unipolar para lograr el comportamiento deseado, como se observa en la figura 10. Este tipo de modulación se conoce como 'On-Off', evidenciando la ausencia de señal cuando esta nivel cero o apagada, mientras que cuando se transmite una señal portadora con amplitud máxima, lo que significa es que la señal está 'encendida'.

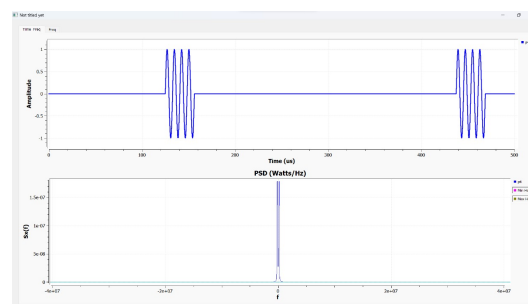


Fig. 10: Resultados obtenidos para modulación OOK.

Para la modulación BPSK se pueden usar exactamente los mismos parámetros pero en vez de usar una señal unipolar, se usa una señal bipolar como la figura 1. Se obtuvo la siguiente grafica 11 como resultado. En este tipo de modulación se utilizan dos fases de una onda portadora para representar dos símbolos binarios; Visualmente se asemeja a la misma señal invertida.

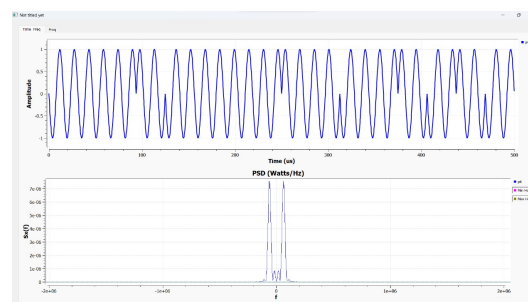


Fig. 11: Resultados obtenidos para modulación BPSK.

Al usar una señal bipolar, se observa que la señal resultante tiene un cambio de fase en los puntos donde la señal cuadrada cambia de -1 a 1 y viceversa, se mantiene su frecuencia y la PSD muestra la potencia centrada en la frecuencia central. Para obtener esta señal en GNU Radio, se cambió el valor de h por una señal sinusoidal con frecuencia variable, de la siguiente forma:

$$\sin(2\pi f_c) \quad (3)$$

La modulación FSK es una modulación en frecuencia que se modula de acuerdo a los datos binarios a transmitir. Es decir, cuando se encuentra un 1 en la señal moduladora, la frecuencia de la portadora se ajusta a una frecuencia específica f_1 , mientras que si se encuentra un -1, se ajusta a una frecuencia f_2 . Por lo tanto, la señal modulada cambia entre dos o más frecuencias para representar los bits de datos. En la figura 12 se observa dicho comportamiento.

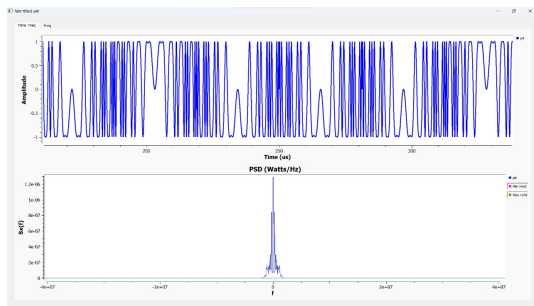


Fig. 12: Resultados obtenidos para modulación FSK.

Para obtener la figura 12 en GNU Radio, se tuvo en cuenta la frecuencia variable dentro del seno, asegurando el cambio en la frecuencia de la señal, esto se logró, cambiando el valor de h por la siguiente expresión:

$$\sin(2 * \pi * (\sin(2 * \pi * f_c))) \quad (4)$$

Para que la señal binaria tenga la forma de los latidos del corazón se modifica h y el FIR Interpolating Filter con el fin de obtener una representación digitalizada de una forma de onda de un electrocardiograma. Para ello se utiliza la siguiente expresión 3 como entrada del sistema, correspondiente a una señal unipolar.

$$\text{np.concatenate}(-1 \times e^{-3x} + 0,5, 0,5, e^{-3x}) \quad (5)$$

La ecuación anterior es la función utilizada para la creación de la señal cardíaca 13. En ella se realiza una concatenación de 3 terminos para lograr el objetivo planteado.

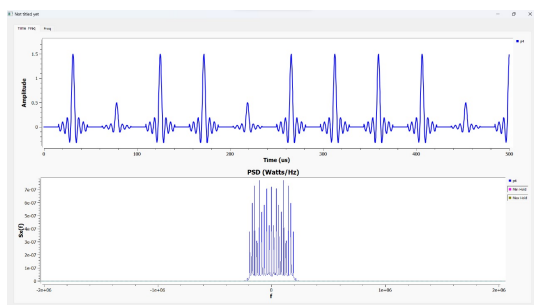


Fig. 13: Resultados obtenidos para señal cardíaca.

Finalmente, para la generación de los pulsos rizados se tomaron en cuenta los siguientes conceptos teóricos:

- Concepto de convolución de la ecuación 1.
- Comportamiento de una señal modulada en BPSK.

El primer paso fue la definición matemática de lo que corresponde a un pulso rizado. En este caso, se definió como una señal definida por partes, como se puede ver en la siguiente expresión:

$$H[n] = -e^{-3n} + 0,5u[-n + 146] \times u[n] \quad (6)$$

$$H[n] = 0,5u[-n + 646] \times u[n + 146] \quad (7)$$

$$H[n] = e^{-3n}u[n + 646] \quad (8)$$

La implementación en código se realiza con la librería NumPy de Python [3], específicamente con la función 'concatenate'. Al definir la función y pasarla como parámetro H del filtro de interpolación, cuya señal moduladora es una cuadrada bipolar, se obtienen los siguientes resultados.

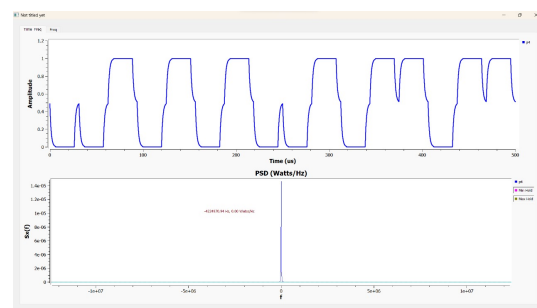


Fig. 14: Resultados obtenidos para la Figura 9.

Todos los códigos, sistemas y soportes utilizados durante la práctica se pueden encontrar en el siguiente enlace: https://github.com/Lilith022/labcom2_2024_1/tree/Practica_2

3. Conclusiones

- Se pudo observar que el efecto del filtro de interpolación es fundamental para obtener una señal con mayor resolución. El aumento del parámetro Sps , que resulta de la interpolación, permite incrementar la resolución de la señal al aumentar la frecuencia de muestreo. Esto implica que se toman más símbolos por segundo de la señal, lo que ayuda a evitar la pérdida de información y mejora la calidad de la señal resultante.
- Se confirmó que utilizando el parámetro h y el filtro FIR de interpolación, es posible generar una variedad de modulaciones, como OOK, BPSK, FSK y



otras señales planteadas. Estas modulaciones se lograron utilizando una señal cuadrada binaria unipolar y bipolar como señal moduladora, según lo requerido en cada caso.

- Es importante identificar y conocer el papel que desempeñan los elementos que hacen parte del tratamiento de las señales a tiempo real debido a que esto permite tener un control mas preciso de las señales que se manejan y como ocurre el flujo de información a traves de estos sistemas.

Referencias

- [1] H. Ortega and O. Reyes, *Comunicaciones Digitales basadas en radio definida por software*. Editorial UIS, Octubre 2019.
- [2] “Gnu radio open-source software, list of blocks.” [Online]. Available: wiki.gnuradio.org
- [3] “Numpy documentation.” [Online]. Available: <https://numpy.org/>