

Práctica 2: PSD DE SEÑALES ALEATORIAS (GNURADIO)

William Andres Ariza Villamizar - 2184684
Jesus David Garcia Fontecha - 2204651

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

12 de Octubre de 2024

Resumen

This laboratory report explores the Power Spectral Density (PSD) characteristics of random binary signals and white noise in digital communications. Through a series of experiments using GNU Radio, we analyze the effects of varying samples per symbol (Sps) on signal bandwidth, power distribution, and spectral content. The study provides insights into the relationship between sampling rates, bit rates, and spectral properties of digital signals, crucial for optimizing communication system design and performance.

Keywords: Power Spectral Density, Random Binary Signals, White Noise, GNU Radio, Digital Communications, Sampling Rate

1. Introducción.

El análisis de la Densidad Espectral de Potencia (PSD) es fundamental en el diseño y evaluación de sistemas de comunicación digital [1]. Este informe examina cómo los parámetros de muestreo afectan las características espectrales de señales binarias aleatorias, ruido blanco, imágenes y sonidos. Utilizando GNU Radio como plataforma de simulación[2], investigamos la relación entre la tasa de muestreo, la tasa de bits, y las propiedades espectrales resultantes [3].

2. Metodología.

■ Experimento 1: Señal Binaria Aleatoria Bipolar

- Se utilizó el flujograma randombinayrectsignal.grc en GNU Radio.
- Se configuró una señal binaria aleatoria bipolar rectangular.
- Se varió el parámetro SPS (muestras por símbolo) con valores de 1, 4, 8 y 16.
- Para cada valor de Sps, se observó y registró:
 - La forma de la señal en el dominio del tiempo

- La PSD de la señal [4]
- Parámetros clave: tasa de bits, frecuencia de muestreo, ancho de banda

■ Experimento 2: Análisis de Ruido Blanco

- Se modificó el flujograma para analizar el ruido blanco.
- Se configuraron las "Virtual Source" para usar p4 y p5.
- Se realizaron pruebas variando el SPS con valores de 1, 4, 8 y 16.
- Para cada valor de SPS, se observó y registró:
 - La representación del ruido en el dominio del tiempo
 - La PSD del ruido [1]

3. Resultados.

3.1. Experimento 1: Señal Binaria Aleatoria Bipolar

Para una señal NRZ (Non-Return-to-Zero):

- La frecuencia de muestreo = $SPS * R_b$
- El ancho de banda teórico es aproximadamente igual a la tasa de bits: $2 * R_b = BW$

SPS	Rb [bps]	Frecuencia de Muestreo [Hz]	BW [Hz]
1	32k	32k	64k
4	32k	128k	64k
8	32k	256k	64k
16	32k	512k	64k

Tab. 1: Relación entre SPS, Rb, frecuencia de muestreo y ancho de banda.

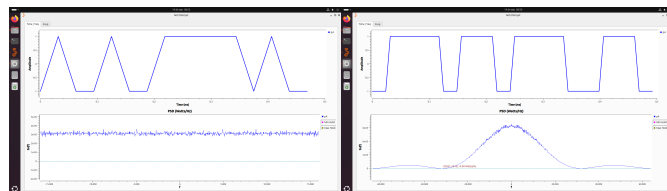


Fig. 1: SPS = 1

Fig. 2: SPS = 4

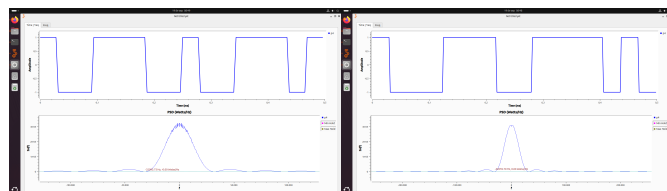


Fig. 3: SPS = 8

Fig. 4: SPS = 16

■ Observaciones:

1. **Ancho de banda:** El ancho de banda se mantuvo constante en ± 32 kHz para todos los valores de SPS. Esto se debe a que la tasa de bits (R_b) se mantuvo constante en 32 kbps. El ancho de banda de la señal está directamente relacionado con la tasa de bits, no con el SPS.
2. **Potencia:** La potencia total de la señal se mantuvo aproximadamente constante en $3e-05$ W/Hz para todos los casos. Este resultado es esperado, ya que la potencia total de la señal no depende del número de muestras por símbolo, sino de la amplitud de la señal y la tasa de bits.
3. **Efecto de SPS en la PSD:** Al aumentar SPS de 1 a 16, se observó un incremento en el número de lóbulos secundarios visibles en la densidad espectral de potencia (PSD). Esto se debe a que un mayor SPS resulta en una representación más detallada de la forma de onda rectangular en el dominio del tiempo, lo que se traduce en una mejor resolución de los lóbulos en el dominio de la frecuencia.
4. **PSD con SPS = 1:** Para SPS = 1, la PSD aparece como una línea aproximadamente constante con ruido alrededor de $3e-05$ W/Hz. Esta forma se asemeja a la PSD teórica de ruido blanco, lo cual es esperado para una secuencia de bits aleatorios muestreada una vez por símbolo.

3.2. Experimento 2: Análisis de Ruido Blanco

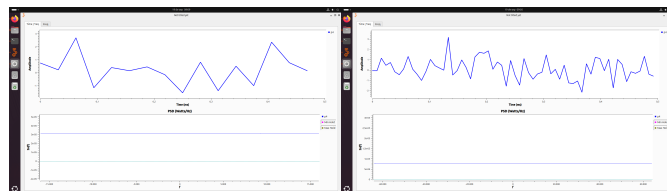


Fig. 5: Ruido SPS = 1

Fig. 6: Ruido SPS = 4

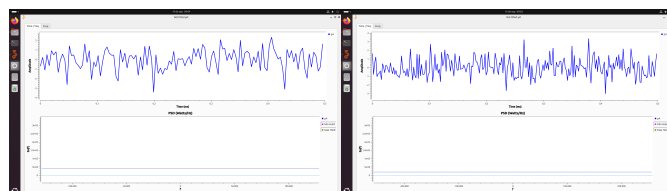


Fig. 7: Ruido SPS = 8

Fig. 8: Ruido SPS = 16

SPS	Potencia [W/Hz]
1	$3.2e-05$
4	$8e-06$
8	$4e-06$
16	$2e-06$

Tab. 2: Relación entre SPS y Potencia de la señal del ruido blanco (gaussiano).

■ Observaciones:

1. **Potencia:** La disminución de la potencia (PSD) al aumentar el SPS es un comportamiento esperado en este sistema específico. Esto se debe a que la potencia total del ruido generado se mantiene constante, pero se distribuye sobre un ancho de banda más amplio al aumentar el SPS. Como resultado, la densidad espectral de potencia (potencia por unidad de frecuencia) disminuye. [1]

3.3. Experimento 3: Análisis de Señal proveniente de una Imagen Real

Para este experimento, se modificó el flujograma para utilizar una imagen real (rana.jpg) como fuente

de datos en lugar de una fuente aleatoria. Se analizó el efecto de variar el parámetro k en el bloque Unpack K Bits y el valor de SPS (Samples Per Symbol):

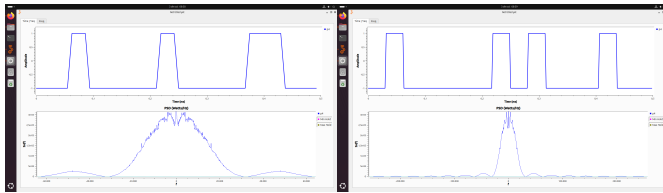


Fig. 9: Rana SPS = 4 y $K = 8$

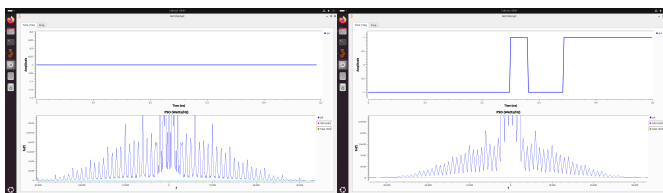


Fig. 11: Rana SPS = 4 y $K = 80$

■ Observaciones:

1. Efecto de variar k (8 vs 80):

- Con $k = 8$, la señal en el dominio del tiempo mostró transiciones más frecuentes comparado con $k = 80$
- $k = 80$ resultó en transiciones menos frecuentes, aunque la amplitud se mantuvo constante entre -1 y 1 para ambos casos.
- En la PSD, $k = 80$ mostró una concentración de energía en frecuencias más bajas comparado con $k = 8$, debido a la reducción en la frecuencia de las transiciones.

2. Efecto de variar SPS (4 vs 16):

- Para ambos valores de k , SPS = 4 produjo una señal temporal con transiciones más abruptas comparado con SPS = 16.
- SPS = 16 resultó en una señal más detallada en el dominio del tiempo para ambos valores de k , permitiendo una mejor visualización de las transiciones.
- En la PSD, SPS = 16 mostró lóbulos más definidos y una concentración de energía más pronunciada en las frecuencias bajas comparado con SPS = 4.

3. Combinaciones específicas:

SPS	K	Observaciones
4	8	<ul style="list-style-type: none"> • Señal temporal con transiciones frecuentes y relativamente abruptas (menos puntos entre ellas). • PSD con una distribución de energía más uniforme en el espectro.
16	8	<ul style="list-style-type: none"> • Representación más detallada de la señal temporal que con SPS = 4. • PSD con lóbulos más definidos y mayor concentración de energía en frecuencias bajas.
4	80	<ul style="list-style-type: none"> • Señal temporal con transiciones menos frecuentes que con $k = 8$, pero con la misma amplitud entre -1 y 1. • PSD con mayor concentración de energía en frecuencias bajas comparado con $k = 8$.
16	80	<ul style="list-style-type: none"> • La representación más detallada de la señal temporal de todas las combinaciones, mostrando claramente las transiciones menos frecuentes. • PSD con la mayor concentración de energía en frecuencias bajas y lóbulos secundarios más pronunciados.

Tab. 3: Relación entre SPS, K y observaciones de la señal.

3.4. Experimento 4: Análisis de Señal proveniente de una Fuente de Audio Real

■ Observaciones:

1. Efecto de variar k (8 vs 20):

- Con $k = 8$, la señal en el dominio del tiempo mostró transiciones más frecuentes comparado con $k = 20$.
- $k = 20$ resultó en transiciones menos frecuentes, procesando más bits simultáneamente.

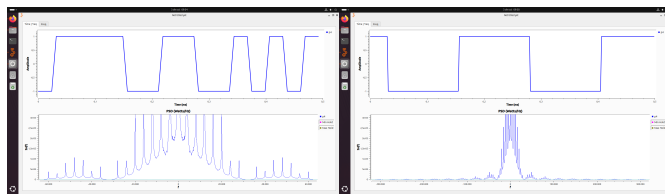


Fig. 13: Audio SPS = 4 y K = 8

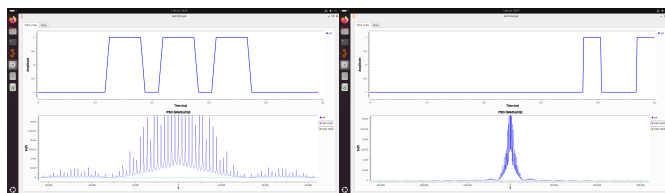
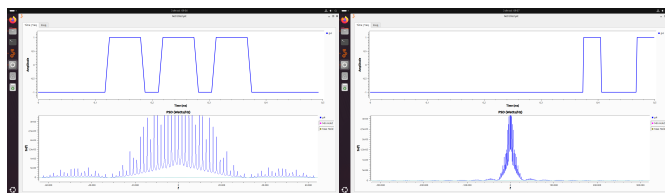


Fig. 15: Audio SPS = 4 y K = 20



- En la PSD, $k = 20$ mostró una concentración de energía en frecuencias más bajas comparado con $k = 8$, debido a la reducción en la frecuencia de las transiciones.

2. Efecto de variar SPS (4 vs 20):

- SPS = 20 resultó en una representación más detallada de la señal en el dominio del tiempo para ambos valores de k , mostrando más puntos por cada símbolo.
- En la PSD, SPS = 20 mostró lóbulos más definidos y una resolución espectral más fina comparado con SPS = 4.

3. Comparación con la señal de imagen:

Se observaron patrones más dinámicos en la PSD, posiblemente correspondientes a las variaciones en el contenido frecuencial del audio a lo largo del tiempo.

3.5. Respuestas a las preguntas de control:

- a) La combinación de bloques mostrada genera una señal donde se suma una constante de -500m y luego el resultado es multiplicado por 2. Esto permite obtener una señal NRZ.
- b) El bloque Interpolating FIR Filter aumenta la tasa de muestreo de la señal interpolando

muestras intermedias y suavizando la transición entre muestras originales. Esto permite mejorar la resolución temporal de la señal sin introducir aliasing.

1) El parámetro "Interpolation" se ajusta a "SPS" (Samples Per Symbol) para mantener la coherencia temporal entre las muestras y los símbolos. Si se coloca otro valor, la relación entre los símbolos y las muestras cambiaría, alterando la representación temporal de la señal. Cuando aumentamos sps la señal se ve más limpia. Esto porque el muestreo está agarrando mayor densidad de datos de la señal de entrada y la imagen de la PSD es más precisa. 2) Para analizar la señal en p3, se debería agregar un bloque de visualización, como el "Time Sink", para observar la forma de la señal en el dominio del tiempo, o un "FFT Sink" para analizar su espectro.

3) El ancho de banda de la señal en p4 se puede calcular con la fórmula:

$$BW = Rb/2 * SPS$$

4) La frecuencia de muestreo en p3 se calcula como:

$$fs3 = fs4 * SPS$$

c) La diferencia en las PSD se debe a las características estadísticas del contenido original (audio o imagen). El audio tiene variaciones más continuas en el tiempo, mientras que la foto tiene transiciones más abruptas, lo que afecta la distribución espectral.

d) El bloque "Throttle" regula la tasa de procesamiento de la señal para evitar que el sistema consuma demasiados recursos, estableciendo una frecuencia de muestreo constante en simulaciones sin hardware conectado.

e) Si la señal binaria solo tiene valores de 0 o 1, la PSD cambiaría, mostrando un componente de baja frecuencia más pronunciado, ya que no existiría una distribución simétrica de la energía alrededor de 0.

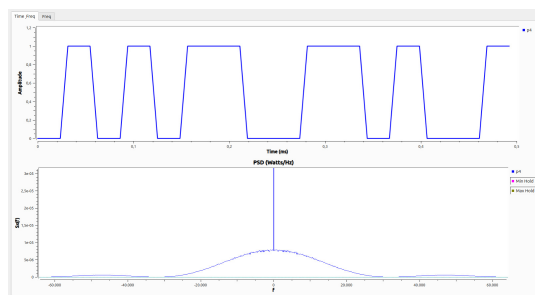


Fig. 17: Imagen de señal cuadrada con valores 0-1 y su PSD, con su componente más pronunciada en baja frecuencia.

f) En GNU Radio, el ruido blanco no tiene un ancho de banda infinito debido a las limitaciones del filtro y la frecuencia de muestreo. Solo se observa un ancho de banda finito, limitado por la frecuencia de muestreo utilizada.

g) En GNU Radio, el ancho de banda de una señal binaria aleatoria rectangular es finito debido a la limitación de la frecuencia de muestreo y el filtrado aplicado. No es posible observar su naturaleza teórica de ancho de banda infinito en la práctica.

h) El número de lóbulos de la PSD puede aproximarse con la fórmula:

$$N_{lobulos} = f_s / R_b$$

i) El rango de frecuencias del espectro se puede calcular como:

$$BW = R_b / 2 * SPS$$

j) La resolución espectral (f) del analizador se calcula como:

$$f = f_s / N$$

k) Si se configura K como 16, el bloque 'Unpack K Bits' descompondrá cada byte en 16 bits, lo cual generaría un flujo de bits mayor y afectaría la velocidad de procesamiento de la señal.

l) La frecuencia de muestreo a la entrada se puede calcular usando la relación:

$$f_s = N_{lobulos} * BW$$

m) La frecuencia de muestreo a la salida será

la frecuencia de muestreo de entrada multiplicada por la cantidad de bits por símbolo descomprimidos en el bloque.

n) La frecuencia de muestreo a la salida será la misma que la frecuencia de entrada, ya que el bloque 'Char to Float' solo convierte el formato de los datos sin alterar la tasa de muestreo.

o) La PSD de una señal binaria aleatoria bipolar será similar a la de ruido blanco cuando SPS sea 1.

p) Se debe ajustar el filtro interpolador o modificar el generador de señal para que la forma de onda de salida adopte una forma triangular o de dientes de sierra.

q) Para una codificación Unipolar RZ, se debe insertar un bloque que establezca los niveles de la señal a 0 entre cada bit activo.

r) Para implementar la codificación Manchester NRZ, se debe agregar un bloque de codificación que alterne la polaridad en la mitad de cada bit, generando la forma característica de la señal.

s) Para generar una señal OOK, se puede modificar el flujo de datos de tal manera que los bits "1" se mantengan y los bits "0" se apaguen completamente, ajustando el FIR para modelar estos estados.

t) Se debe agregar un bloque de modulación que aplique una inversión de fase para los bits "1", manteniendo la fase para los bits "0", implementando así la modulación BPSK.

u) Para que la señal binaria tenga la forma de los latidos del corazón, se puede modificar el bloque de interpolación FIR para ajustar su respuesta en frecuencia, incorporando un generador de forma de onda que emule la señal de los latidos del corazón. Esto puede implicar el uso de un bloque de función de pulso o de envolvente.

v) Para modificar la señal binaria de manera que adopte la forma que se muestra en la Figura 6, se pueden ajustar los parámetros del bloque FIR Interpolating Filter para alterar la forma de la señal resultante. También se puede utilizar un bloque de forma de onda personalizada para definir la forma específica requerida.

w) La densidad espectral de potencia (PSD) de una señal binaria bipolar presenta lóbulos más definidos y una menor concentración de energía en bajas frecuencias en comparación con una señal unipolar. En la señal bipolar, los valores de -1 y +1 alternan, lo que introduce un



equilibrio en la energía a lo largo del espectro, mientras que en la señal unipolar, la energía se concentra en frecuencias más bajas, ya que solo presenta valores de 0 y 1. Gráficamente, la PSD de la señal bipolar se caracteriza por la existencia de lóbulos más amplios y una caída más rápida en las frecuencias más altas, mientras que la PSD de la señal unipolar muestra un mayor contenido en bajas frecuencias y lóbulos más estrechos.

4. Conclusiones.

- El laboratorio demuestra la importancia del parámetro SPS en la representación espectral de señales digitales. Mientras que el ancho de banda principal se mantiene constante debido a la tasa de bits fija, el aumento de SPS permite una mejor resolución de la estructura fina del espectro. Esto tiene implicaciones importantes en el diseño de sistemas de comunicación, donde se debe equilibrar la eficiencia espectral con la fidelidad de la señal y los requisitos de ancho de banda.
- El ancho de banda de una señal digital está principalmente determinado por la tasa de bits, no por el SPS.
- Aumentar el SPS mejora la resolución espectral, permitiendo observar más detalles en la PSD sin cambiar el ancho de banda total.
- La potencia total de la señal se mantiene constante independientemente del SPS, lo cual es crucial para el diseño de sistemas de comunicación eficientes.
- En el caso del ruido blanco, la disminución observada en la PSD al aumentar el Sps es consistente con el diseño del sistema en GNURadio, donde la potencia total del ruido se distribuye sobre un ancho de banda más amplio. Esto demuestra la importancia de considerar cómo se implementa y procesa el ruido en sistemas prácticos.
- La simulación en GNURadio proporciona una valiosa perspectiva sobre cómo los parámetros de muestreo afectan la representación espectral de señales y ruido en sistemas de comunicación digital.
- Es fundamental comprender la relación entre la tasa de muestreo, el ancho de banda y la representación espectral para optimizar el diseño de sistemas de comunicación, equilibrando la eficiencia espectral con la calidad de la señal y los requisitos de potencia.
- La interacción entre el desempaquetado de bits (k) y la tasa de muestreo (SPS) ofrece un equilibrio entre la fidelidad de la representación de la señal y la eficiencia espectral. En particular, valores altos de k (como 80 o 20) permiten procesar más datos simultáneamente, mientras que valores altos de SPS (como 16 o 20) proporcionan una representación más suave de la señal, aspectos fundamentales en el diseño de sistemas de comunicación robustos y eficientes.

Referencias

- [1] J. Nocedal and S. J. Wright, *Numerical Optimization*, 2nd ed. New York: Springer Science & Business Media, 2014.
- [2] W. A. David Fontecha, "Communications ii repository, 2024-2, group b1," 2024, accessed: 2024-09-05. [Online]. Available: https://github.com/DavidFontecha/CommunicationsII_2024_2_B1
- [3] J. Shewchuk, "An introduction to the conjugate gradient method without the overwhelming math," 1994, accessed: 2024-09-05. [Online]. Available: <https://www.cs.cmu.edu/~quake-papers/painless-conjugate-gradient.pdf>
- [4] R. H. Byrd and J. Nocedal, "Numerical optimization," *SIAM Review*, vol. 48, no. 3, pp. 487–489, 2006.