

IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA DETECCIÓN Y ESTIMACIÓN ESPECTRAL DE SEÑALES GPS CON TÉCNICAS NO CONVENCIONALES USANDO SOFTWARE DEFINED RADIO (SDR).

Jefferson Marin

*Escuela de Ciencias Exactas e Ingeniería
Universidad Sergio Arboleda - Bogotá, Colombia
jefferson.marin@correo.usa.edu.co*

Juan Aranda and Marco Terán

*Escuela de Ciencias Exactas e Ingeniería
Universidad Sergio Arboleda - Bogotá, Colombia
{juan.aranda, marco.teran}@usa.edu.co*

Resumen—Esta investigación se centra en establecer una metodología para evaluar el desempeño al momento de determinar la presencia o ausencia de señales de interés en las diferentes bandas del espectro electromagnético de los métodos de estimación espectral tanto paramétricos (Burg, Yule-Walker) como no paramétricos (Periodograma, FFT, Correlograma) implementados. Esto se hace a través de la medición de probabilidades de detección en función de la relación señal/ruido (SNR) y falsa alarma con el software de procesamiento de señales GNU Radio y el hardware HackRF One.

Se logró detectar señales de interés con cada uno de los métodos implementados y las mediciones experimentales muestran que los métodos paramétricos poseen un mejor desempeño que los métodos no paramétricos a pesar de tener un mayor nivel de complejidad computacional y depender su desempeño de los parámetros configurados, sin embargo, los métodos no paramétricos ofrecen un desempeño razonable en menor tiempo.

Keywords:—SDR, Power Spectrum estimation, Acquisition, Periodogram, Spectrum Sensing, Spectral analysis, Power measurement, GNSS, GPS,

1. INTRODUCCIÓN

Para detectar la existencia de señales de interés en una región geográfica definida se requiere obtener un sentido del espectro disponible, lo que comprende una serie de técnicas robustas de análisis de señales con una mayor complejidad desde el punto de vista computacional [1]. Existen diferentes técnicas de detección del espectro, entre las que se encuentran el detector de energía, el cual permite determinar la presencia o ausencia de una señal de interés comparando el nivel de salida del detector respecto a un umbral que depende del ruido [1], [2], [3]. Se puede realizar en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia más comúnmente utilizado en la literatura a través de la Transformada Rápida de Fourier (FFT), seguido de otros métodos de estimación espectral tanto paramétricos (Burg, Yule-Walker) como no paramétricos (Periodograma, FFT,

Correlograma). Con el objetivo de conocer el desempeño de cada uno de los métodos mencionados este trabajo los implementa en GNU Radio como bloques en los que se usa un detector de energía para detectar señales GPS en condiciones de baja relación señal/ruido (SNR).

Este artículo está organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se presenta la detección y estimación espectral de la señal GPS, en la sección 3 la metodología desarrollada para la evaluación de los métodos de estimación espectral, en la sección 4 resultados y finalmente en la sección 5 conclusiones.

2. DETECCIÓN DE SEÑAL

Detectar una señal consiste en obtener una medida del espectro disponible, determinando la existencia o la ausencia de usuarios licenciados o transmisiones en Radio Frecuencia (RF) en una región geográfica definida [1]. Su correcto análisis permite identificar las características de cada una de las bandas de frecuencia a través de diferentes métricas tales como el ancho de banda, retardo, capacidad, nivel de interferencia, patrones del uso del canal, entre otras, además de reconocer las ventajas o desventajas de usar estas frecuencias, la presencia o ausencia de transmisiones y finalmente los huecos espectrales [1].

Existen diferentes técnicas para detectar el espectro [1], [2], entre las que se encuentra el detector de energía, que busca un balance adecuado entre la probabilidad de falsa alarma (P_{fa}) y probabilidad de detección (P_d) para obtener un umbral λ óptimo [1] a través de la detección de energía de las señales en las bandas de frecuencias de interés sin información previa de las propiedades de la señal transmitida y con bajo nivel de complejidad en términos de implementación y computación [1], [2].

Las señales son detectadas comparando el nivel de salida de un detector energía respecto a un umbral que depende del ruido, este método está basado en un problema de decisión binaria (presencia o ausencia de señal) a través

de la observación de las muestras recibidas, la selección del umbral en esta técnica es crucial ya que depende de la varianza del ruido, un error en la estimación de la varianza del ruido disminuye significativamente el desempeño, esta técnica posee un desempeño limitado en condiciones de baja relación señal ruido, y en detección de señales en espectro ensanchado [1], [4]. La implementación de este método utiliza la Transformada Rápida de Fourier (FFT), entonces el valor absoluto de las muestras es elevado al cuadrado y ponderado, para luego ser comparado con un umbral de decisión que depende del ruido [5], [6], como se puede apreciar en la Fig. 1.

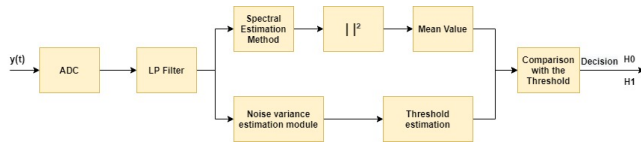


Figura 1. Esquemático del detector de energía en el dominio de la frecuencia. [3].

El algoritmo de detección está basado en el criterio de Neyman-Pearson donde se calcula la potencia total de la señal en un conjunto de n muestras [7], puede ser modelado como una prueba de hipótesis, lo cual es equivalente a decidir entre 2 hipótesis [3]:

$$y(t) = \begin{cases} H_0 = n(t) & \text{Señal Ausente} \\ H_1 = s(t) + n(t) & \text{señal presente} \end{cases} \quad (1)$$

$y(t)$: Señal recibida

H_1 : Indica que hay señal presente (señal primaria)

H_0 : Indica ausencia de señal (solo ruido)

$s(t)$: Señal transmitida

$n(t)$: Ruido blanco Gaussiano (AWGN)

H_0 : es la hipótesis nula, indica la ausencia de señal.

H_1 : es la hipótesis alternativa, indica presencia de señal

Para realizar la detección se define un umbral λ . La métrica utilizada generalmente por este tipo de detector es la energía media del total (Y) de las muestras detectadas en una banda del espectro en particular [3].

$$Y = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |X[n]|^2 \geq \lambda \quad (2)$$

Donde $X[n]$ representa las muestras recibidas en el dominio de la frecuencia. Para determinar el umbral de decisión de forma dinámica se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación [7].

$$\lambda = \mu + Q^{-1}(P_{fa})\sigma \quad (3)$$

donde μ y σ son la media y la desviación estándar de los puntos FFT promediados, $Q(\cdot)$ representa la función Gaussian Q-Function [8], [9], y P_{fa} es la probabilidad de

que el módulo de detección elija H_1 mientras que la decisión correcta es H_0 .

La regla de decisión se puede definir como [7].

$$\begin{aligned} Y > \lambda &\rightarrow H_1 (\text{Señal presente}) \\ Y \leq \lambda &\rightarrow H_0 (\text{Señal ausente}) \end{aligned} \quad (4)$$

El detector está descrito mediante dos probabilidades:

1. **Probabilidad de falsa alarma (P_{fa}):** El detector determina que hay señal cuando realmente no había señal primaria.
2. **Probabilidad de detección (P_d):** El detector determina acertadamente la existencia de señal primaria cuando hay una señal primaria.

$$\begin{aligned} P_{fa} &= P(Y > \lambda | H_0) \\ P_d &= P(Y > \lambda | H_1) \end{aligned} \quad (5)$$

2.1. Descripción de la señal GPS

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) permite determinar en toda la tierra la posición de cualquier objeto con una precisión en metros e incluso centímetros [10]. El sistema GPS usa tres bandas de frecuencias para transmitir las señales de los satélites, L1, L2, L5, y se derivan de una frecuencia fundamental de $f_0=10.23$ MHz [11].

Las señales GPS llegan al receptor a un nivel de muy baja potencia, y La señal L1 (1575.42 MHz) de cada satélite está modulada por dos códigos pseudoaleatorios, el código de adquisición aproximada (C/A) y el código de precisión (P). Cada satélite tiene un código C/A diferente, lo que genera un ruido pseudoaleatorio distinto (PRN), clave para que el receptor identifique cada satélite. El ancho de banda de una señal GPS es superior al necesario para poder evitar en mayor medida interferencias y asegurar la comunicación entre el transmisor (satélites) y el receptor [12]. El espectro GPS se representa en la Fig. 2.

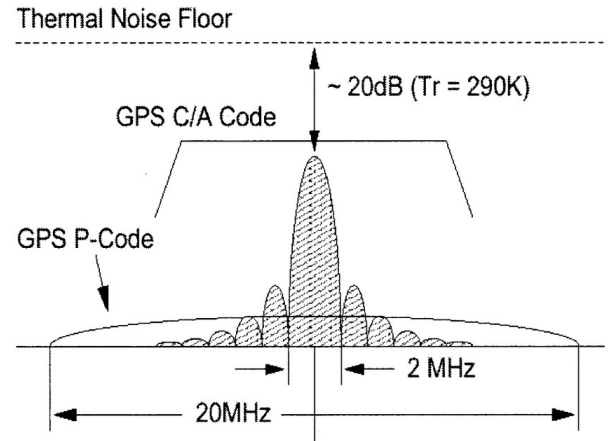


Figura 2. Espectro GPS en la banda L1. [12].

La señal GNSS en la salida del RF Front-end se puede expresar mediante la siguiente forma (6).

$$y(t, \gamma) = \sqrt{2P} h_{NM}(t - t_{rec}) h_{PRN}(t - t_{rec}) \cdots \cos(2\pi(f_{IF} + f_d)t + \varphi_0) + \eta(t) \quad (6)$$

donde,

$\gamma[t_{rec}, f_d, \varphi_0]$ – vector de parámetros de radionavegación de la señal;
 t_{rec} – tiempo de retardo;
 f_d – corrimiento Doppler de frecuencia;
 f_{IF} – frecuencia intermedia;
 P – potencia de la señal;
 h_{PRN} – función de código PRN;
 h_{NM} – función envolvente del mensaje de navegación;
 φ – fase inicial de la señal de radionavegación recibida;
 $\eta(t)$ – AWGN con media cero.

2.2. Estimación espectral de potencia

El análisis espectral considera el problema de determinar el contenido espectral de una señal en el dominio del tiempo a partir de un conjunto finito de mediciones, mediante técnicas paramétricas o no paramétricas [13, pp. 12]. La longitud de registro infinita de la secuencia de datos es una limitación importante en la calidad de la estimación del espectro de potencia [14, pp. 896].

Existen los métodos paramétricos que consisten en postular un modelo para los datos y así parametrizar el espectro para reducir el problema de estimación espectral [13, pp. 2]; por otro lado existen los métodos no paramétricos o métodos clásicos que se basan en la transformada discreta de Fourier y no necesitan obtener los parámetros de la serie de tiempo antes de usar estos métodos [13, pp. 2]. Los métodos paramétricos pueden ofrecer estimaciones del espectro más precisas en casos en donde la longitud de la señal es corta y donde los datos satisfagan el modelo asumido, de lo contrario los métodos no paramétricos superan a los paramétricos debido a su sensibilidad a errores en el modelo [13, pp. 2].

Los métodos evaluados en este trabajo son Burg, Yule-Walker (paramétricos) y Correlograma, FFT, Periodograma (no paramétricos).

3. METODOLOGÍA

3.1. Visión general

Para evaluar el desempeño de los diferentes métodos de estimación espectral implementados en GNU Radio se hace uso de la metodología descrita en la Fig. 3, como primer paso se establece una señal conocida, es decir una señal de la cual se conozcan cada uno de sus parámetros (amplitud, frecuencia, tipo de modulación, espectro, etc) con el fin

de validar los resultados obtenidos por cada método de estimación espectral.

Como segundo paso se debe seleccionar métodos de estimación espectral implementados en GNU Radio los cuales permiten obtener la densidad espectral de potencia (PSD), como los son los métodos paramétricos y no paramétricos como bloques, con parámetros configurables. Luego debe modificarse los parámetros de los métodos paramétricos de forma empírica seleccionando parámetros que brinden mayor desempeño; como métrica se usan las curvas ROC (SNR (Relación señal/ruido) vs Pd (probabilidad de detección)).

En cuarto lugar se generan archivos de simulación para cada uno de los métodos de estimación espectral con parámetros definidos previamente, para evaluarlos es necesario obtener el cálculo de la relación señal/ruido (SNR) para cada simulación y establecer la probabilidad de falsa alarma para el detector de energía implementado. Usar GNU Radio permite generar código en Python de los diagramas de bloques (.grc) y modificarlos.

Se procede con la experimentación, donde se ejecutan los algoritmos de simulación midiendo el tiempo de ejecución de las simulaciones (.py) y posteriormente se procede con el almacenamiento de los resultados. Finalmente, a través de Python se realiza la lectura y visualización de los archivos resultantes de la ejecución, con el objetivo de realizar el proceso de análisis posterior.

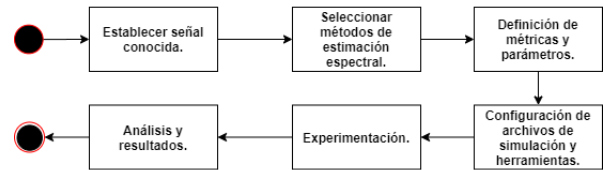


Figura 3. Diagrama de la metodología de evaluación de desempeño adoptada.

Se implementaron diferentes métodos de estimación espectral usando la librería Spectrum [15], un detector de energía [16] y módulos adicionales en GNU Radio como módulos (out-of-tree) a través de Python. Se seleccionó el dispositivo HackRF One como hardware ya que es uso libre, compatible con diferentes plataformas SDR, half duplex, su frecuencia de funcionamiento es amplia y cumple con los requerimientos para el desarrollo del sistema.

Para la generación de la señal se usó GPS-SDR-SIM. GPS-SDR-SIM genera flujos de datos de señal de banda base GPS, que se pueden convertir a RF utilizando plataformas de radio definidas por software (SDR).

Implementación del detector de Energía

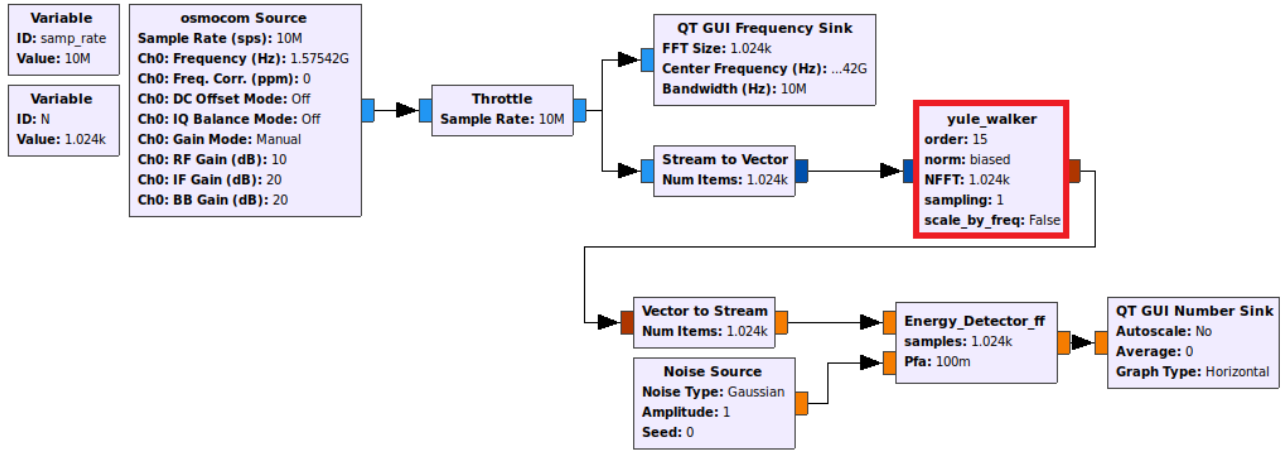


Figura 4. Diagrama de bloques del detector de energía implementado en GNU Radio usando los métodos de estimación espectral implementados.

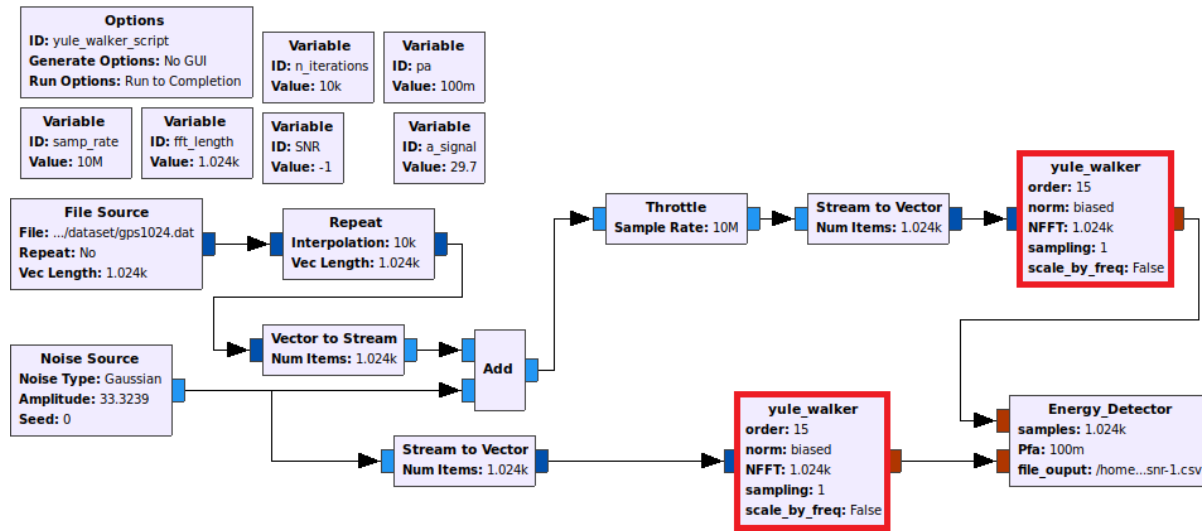


Figura 5. Diagrama de bloques para el proceso de evaluación usando los diferentes métodos de estimación espectral.

La Fig. 4 muestra el diagrama de bloques donde se realiza la detección de energía de la señal GPS usando *Yule-Walker* como método de estimación espectral.

Se obtiene la señal GPS en tiempo real, posteriormente se realiza la estimación del espectro a través del bloque *Yule-Walker*, luego se envía la salida al bloque *Energy_Detector* el cual es un bloque personalizado donde se implementa el algoritmo de detección, que permite al usuario seleccionar el número de muestras y la probabilidad de falsa alarma que se usará para el cálculo, de los datos de entrada al bloque *Energy_Detector* se calcula la media (promedio) de la señal recibida su varianza y desviación estándar, estos parámetros son usados para determinar de forma dinámica el umbral de detección de acuerdo a un piso de ruido. La energía de señal promedio se compara con el umbral para determinar si la señal está presente o no, en donde si la energía de la señal es mayor que el umbral, entonces la

señal está presente [7], [16], [4]. Finalmente se visualiza 1 si la señal está presente o 0 en caso contrario. Para seleccionar otro método de estimación espectral se cambia el bloque resaltado en rojo por el método deseado.

Para evaluar el desempeño de los métodos se realizaron simulaciones con 10.000 iteraciones con la finalidad de garantizar como mínimo una probabilidad de falsa alarma de 0.1 % para cada método de estimación espectral. Se establece un rango de SNR de [-15,8], con probabilidades de falsa alarma de $P_{fa}=0.1, 0.08, 0.05, 0.03, 0.01$, con $N=1024$. Se analizó el número de muestras correspondiente a 1 ms de la señal GPS.

La Fig. 5 Corresponde al diagrama de bloques en GNU Radio usado para generar un script en Python el cual permite automatizar el proceso de evaluación en la ejecución de las iteraciones con los diferentes valores de

SNR. El bloque **File Source** permite abrir las muestras de la señal GPS almacenada en un flujo de IQ de muestras complejas. El bloque **Noise Source** es una fuente de ruido gaussiano, a este bloque se le modifica la amplitud (Amplitude) de tal forma que se genere el valor del SNR. El bloque **Repeat** repite la entrada n veces, la entrada está agrupada como un vector. El bloque **Add** realiza la suma de la señal con el ruido, posteriormente se realiza la estimación del espectro a través del bloque **Yule-Walker** tanto sobre la señal como sobre el ruido con el fin de identificar la presencia o ausencia de la señal a través del bloque del detector de energía (**Energy_Detector**), este bloque genera un archivo con extensión .csv por cada valor de SNR y probabilidad de falsa alarma el cual almacena las salidas 1 si se detecta la señal 0 en caso contrario.

Para evaluar otro método de estimación espectral el procedimiento consiste en cambiar los bloques en contorno rojo por el método de estimación espectral deseado.

Para obtener la probabilidad de detección se hace uso de la razón entre el número de detecciones que el detector de energía determina acertadamente la presencia de la señal y el número de iteraciones. Para cada valor de SNR y P_{fa} se abre el archivo en formato .csv a través de Python se obtiene la probabilidad de detección, posteriormente se grafican los datos para realizar el correspondiente análisis de resultados.

4. RESULTADOS

La metodología propuesta permitió evaluar el desempeño de los métodos de estimación ante diferentes escenarios (P_{fa} y SNR). Se grafica la probabilidad de detección vs la relación señal/ruido (SNR) para cada método evaluado. El detector de energía permitió detectar la presencia de señales de interés (señales GPS) con probabilidad de falsa alarma entre 1 % y 10 % de acuerdo al teorema de Neyman-Pearson implementado a través de un bloque en GNU Radio. La Fig. 6 y Fig. 7 muestran los resultados obtenidos para la FFT (no paramétrico) y Yule-Walker (paramétrico) evaluados de acuerdo a diferentes probabilidades de falsa alarma. Si la probabilidad de falsa alarma aumenta el detector es menos selectivo al momento de obtener la probabilidad de detección, por ejemplo, con una probabilidad de falsa alarma de 1 % para la FFT el detector obtiene una probabilidad de detección del 100 % a un valor SNR de 5 dB, mientras que una probabilidad de falsa alarma del 10 % el detector obtiene una probabilidad de detección del 100 % a un valor SNR de aproximadamente de 2 dB; en el caso de Yule-walker el detector determina una probabilidad de detección del 100 % a un valor SNR de -2 dB para una probabilidad de falsa alarma del 1 %, y para una probabilidad de falsa alarma de 10 % se obtiene a -5 dB. Cabe resaltar que una elevada probabilidad de falsa alarma puede ocasionar que el detector determine con mayor probabilidad la existencia de señal cuando realmente no había señal.

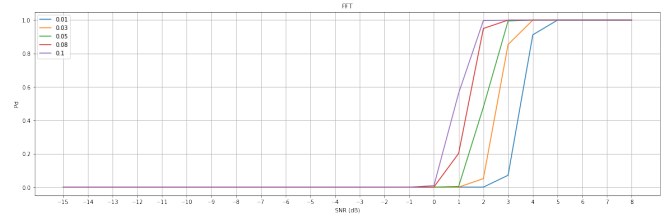


Figura 6. SNR vs Pd para diferentes probabilidades de falsa alarma P_{fa} (1,3,5,8,10 %) para la FFT.

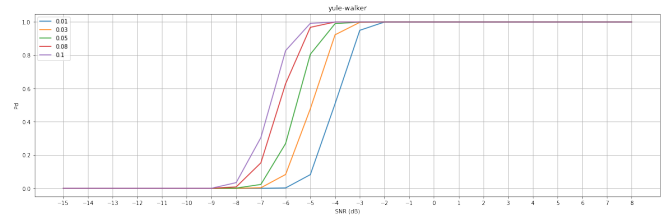


Figura 7. SNR vs Pd para diferentes probabilidades de falsa alarma P_{fa} (1,3,5,8,10 %) para el método Yule-walker.

A continuación en la Fig. 8 se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas para obtener el desempeño de los métodos de estimación espectral implementados; para ello se estableció una probabilidad de falsa alarma del 10 % con diferentes valores de SNR. En el desarrollo de las simulaciones ante un elevado número de iteraciones los métodos paramétricos toman más tiempo que los métodos no paramétricos debido a la complejidad computacional que estos exigen al realizar la estimación de los modelos. El desempeño de los métodos depende de los datos tomados de la señal y parámetros configurados. Los métodos paramétricos burg y Yule-Walker poseen un desempeño similar en el sistema propuesto, al igual que los métodos no paramétricos FFT y periodograma. El método del correlograma es el que a través de las simulaciones permitió detectar señales a más bajo SNR.

5. CONCLUSIONES

La metodología propuesta permitió evaluar diferentes métodos de estimación espectral paramétricos y no paramétricos para la detección de señales de interés bajo dos escenarios probabilidad de falsa alarma y relación señal ruido, con el objetivo de determinar la presencia o ausencia de usuarios licenciados o transmisiones de radio frecuencia en una región geográfica determinada.

Los métodos paramétricos permitieron obtener detección de señales GPS a más bajos SNR que los métodos no paramétricos con una determinada probabilidad de falsa alarma, mientras que los métodos no paramétricos poseen mejor desempeño en el tiempo de ejecución.

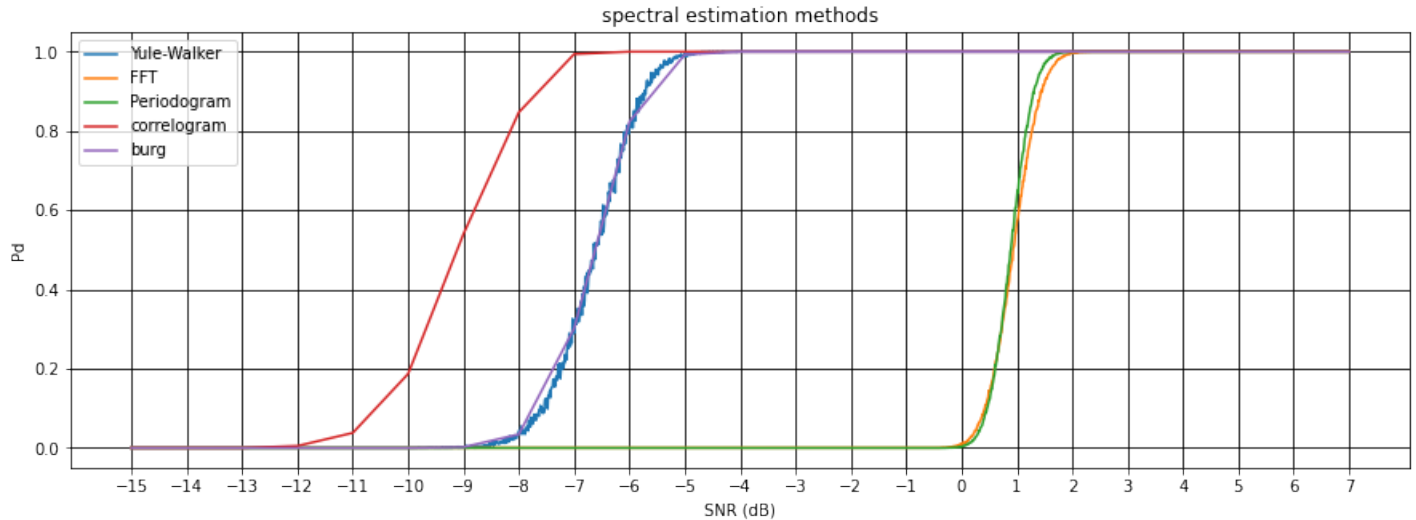


Figura 8. SNR vs Pd para métodos paramétricos y no paramétricos implementados con P_{fa} de 0.1.

El espectro es un recurso muy valioso en los sistemas de comunicaciones inalámbricas, a través de las oportunidades que ofrece la radio cognitiva y la detección de oportunidades de espectro disponible se puede utilizar este recurso de manera más eficiente, y a través de la implementación de nuevos métodos de estimación espectral y su correspondiente evaluación de eficiencia se obtiene una visión de otros métodos para diferentes aplicaciones en el campo del análisis de señales. Su desarrollo en el software GNU Radio permite tener una solución portable, mantenible, y auto configurable. Esta investigación puede aplicarse sobre otras señales y sobre otros métodos de estimación espectral siendo tema de investigación para futuros trabajos.

Referencias

- [1] L. F. Pedraza, F. Forero, and I. P. Páez, "Detección de espectro para radio cognitiva," *Ingeniare. Rev. chil. ing.*, vol. 20, no. 2, pp. 197–210, Aug. 2012, doi: 10.4067/S0718-33052012000200007.
- [2] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 116–130, First Quarter 2009, doi: 10.1109/SURV.2009.090109.
- [3] D. M. M. Plata and Á. G. A. Reátiga, "Evaluation of energy detection for spectrum sensing based on the dynamic selection of detection-threshold," *Procedia Engineering*, vol. 35, pp. 135–143, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.04.174.
- [4] A. Nafkha, M. Naoues, K. Cichon and A. Kliks, "Experimental spectrum sensing measurements using USRP Software Radio platform and GNU-radio," 2014 9th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM), Oulu, 2014, pp. 429–434, doi: 10.4108/icst.crowncom.2014.255415.
- [5] D. Cabric, A. Tkachenko, and R. W. Brodersen, "Experimental study of spectrum sensing based on energy detection and network cooperation," in *Proceedings of the first international workshop on Technology and policy for accessing spectrum - TAPAS '06*, Boston, Massachusetts, 2006, pp. 12-es, doi: 10.1145/1234388.1234400.
- [6] G. J. M. Llamas and A. S. Banacia, "Spectrum sensing system in software-defined radio for determining spectrum availability," in 2016 International Conference on Electronics, Information, and Communications (ICEIC), Danang, Vietnam, Jan. 2016, pp. 1–5, doi: 10.1109/E-LINFOCOM.2016.7562961.
- [7] J. Jagannath, H. M. Saarinen, and A. L. Drozd, "Framework for automatic signal classification techniques (FACT) for software defined radios," in 2015 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications (CISDA), Verona, NY, USA, May 2015, pp. 1–7, doi: 10.1109/CISDA.2015.7208628.
- [8] S. Malluri and V. K. Pamula, "Gaussian Q-function and Its Approximations," 2013 International Conference on Communication Systems and Network Technologies, Gwalior, 2013, pp. 74–77, doi: 10.1109/CSNT.2013.25.
- [9] Yixian Liu, Chunyan Zeng, Hongjiang Wang and Gang Wei, "Energy detection threshold optimization for cooperative spectrum sensing," 2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control, Shenyang, 2010, pp. 566–570, doi: 10.1109/ICACC.2010.5486887.
- [10] E. D. Kaplan y C. Hegarty, Eds., *Understanding GPS/GNSS: principles and applications*, Third edition. Boston; London: Artech House, 2017.
- [11] "GPS.gov: GPS Spectrum and Interference Issues." <https://www.gps.gov/spectrum/> (accessed Jul. 20, 2020).
- [12] G. Montagna et al., "A 35-mW 3.6-mm2 fully integrated 0.18- μ m CMOS GPS radio," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 38, no. 7, pp. 1163–1171, July 2003, doi: 10.1109/JSSC.2003.813298.
- [13] P. Stoica and R. L. Moses, *Spectral analysis of signals*. Upper Saddle River, N.J.: Pearson/Prentice Hall, 2005.
- [14] J. G. Proakis and D. G. Manolakis, *Digital signal processing: principles, algorithms, and applications*, 3rd ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1996.
- [15] T. Cokelaer and J. Hasch, "'Spectrum': Spectral Analysis in Python," *JOSS*, vol. 2, no. 18, p. 348, Oct. 2017, doi: 10.21105/joss.00348.
- [16] A. Bello, B. Biswal, S. Shetty, C. Kamhoua, and K. Gold, "Radio frequency classification toolbox for drone detection," in *Artificial Intelligence and Machine Learning for Multi-Domain Operations Applications*, Baltimore, United States, May 2019, p. 69, doi: 10.1117/12.2514759.