

Estudio comparativo de técnicas de estimación espectral paramétricas y no paramétricas para la detección de señales GPS bajo condiciones de alto ruido

Comparison of parametric and non-parametric spectral estimation techniques for GPS signals detection in noisy conditions

Jefferson Marin, Marco Terán and Juan Aranda

Exact Sciences and Engineering School

Universidad Sergio Arboleda - Bogotá, Colombia

{jefferson.marin, juan.aranda, marco.teran}@usa.edu.co

Resumen—In this paper, we present a performance evaluation study of different spectral estimation techniques for spectrum sensing to detect weak GPS signals transmitted over high noise conditions. Traditionally, Fast Fourier Transform has been used as a mechanism to get an idea of the spectrum available. Recently, other non-conventional techniques are proposed for estimating the spectrum, such as Correlogram and Yule-Walker. A signal detector system is implemented in GNURadio, and synthetic GPS signals are generated using GPS-SDR-SIM for the comparison study. The results show that the Correlogram non-parametric technique presents better performance to detect GPS signals under lower signal-noise-ratio values ($\leq -8dB$) with the false probability of 10 % followed by Yule-Walker and Burg parametric methods.

Keywords:—GPS, software-defined radio, spectrum sensing, spectral estimation.

1. INTRODUCCIÓN

Tratar de obtener señales inalámbricas estables puede llegar a ser bastante complejo, ya que no siempre se hace con facilidad. La forma de configuración de los dispositivos transmisores, receptores, interferencias cercanas, el ruido, además de otros factores, pueden incidir drásticamente en las comunicaciones inalámbricas. Por tanto, determinar la presencia o ausencia de una señal de interés en cierto espacio geográfico, en una banda de frecuencias definidas, en algunas ocasiones se puede tornar complicado, debido a los problemas anteriormente descritos. Los satélites del sistema de posicionamiento global (GPS) emiten señales de radio y estas llegan al receptor a baja potencia lo que hace a este tipo de señales susceptibles a interferencias. Estas interferencias pueden provenir de diversas fuentes, incluidas emisiones de radio en bandas cercanas, interferencias intencionales y no intencionales [1]. En consecuencia, no siempre se pueda distinguir el contenido de la señal e incluso detectar. Detectar señales GPS es de vital importancia para obtener la ubicación de cualquier objeto en la tierra, determinar la

precisión, velocidad y el tiempo preciso de vehículos aéreos, náuticos y otros tipos de usuarios con gran precisión en el globo terráqueo. También sirve para encontrar, predecir y modificar la trayectoria de objetos en movimiento.

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 [2]. Existen diferentes técnicas de detección del espectro, entre las que se encuentra 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 [2], [3], [4]. 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) [5].

Este artículo presenta un estudio comparativo de diferentes técnicas de estimación espectral basado en la medición de probabilidades de detección al variar la relación señal/ruido (SNR), para una determinada probabilidad de falsa alarma. Para el estudio, se emplea el sistema de detección de espectro propuesto en [6], el cual se implementa en el software de procesamiento de señales GNU Radio. GNU Radio es una herramienta de código abierto utilizado para aplicaciones de Software-Defined-Radio (SDR). Las señales GPS fueron generadas de forma simulada.

El resto del artículo, se encuentra organizado como sigue: en la sección 2 se presentan los conceptos asociados a la detección y estimación espectral de señales GPS. Seguido, la sección 3 describe la metodología y la configuración experimental para la evaluación de los métodos de estimación espectral. Luego, los resultados son presentados y analizados en la sección 4. Finalmente, se presentan las conclusiones en la sección 5.

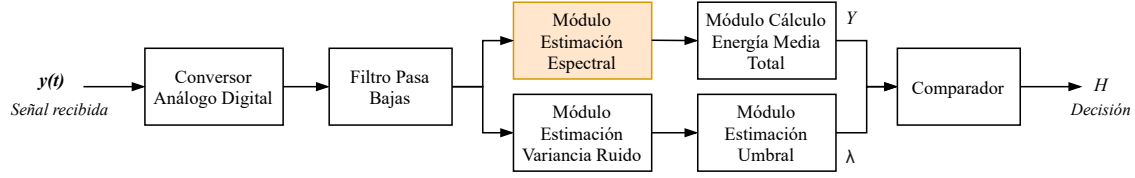


Figura 1. Esquemático del detector de energía [4].

2. MARCO TEÓRICO

2.1. 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 [5, 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 [7, pp. 896].

Por una parte, 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 [5, pp. 2]. Por otro lado, están 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 [5, 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 [5, pp. 2].

Los métodos considerados para el estudio comparativo son Burg, Yule-Walker (paramétricos) y Correlograma, FFT, Periodograma (no paramétricos). Una descripción formal de los métodos se presenta en [5].

2.2. 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 [2]. 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 [2].

Existen diferentes técnicas para detectar el espectro [2], [3], 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 [2] 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 [2], [3].

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 [2], [8]. 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 (energía media total, Y), para luego ser comparado con un umbral de decisión (λ) que depende del ruido [9], [10], como se puede apreciar en la Figura 1.

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 [11], puede ser modelado como una prueba de hipótesis, lo cual es equivalente a decidir entre 2 hipótesis (Eq. 1) [4]:

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

donde, $y(t)$ — Señal recibida;

H_1 — Indica que hay señal presente (señal primaria);

H_0 — Indica ausencia de señal (solo ruido);

$s(t)$ — Señal transmitida;

$\eta(t)$ — Ruido blanco Gaussiano aditivo (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 (V) de las muestras detectadas en una banda del espectro en particular (Eq. 2) [4].

$$V = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |Y[k]|^2 \quad (2)$$

Donde $Y[k]$ 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 [11].

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

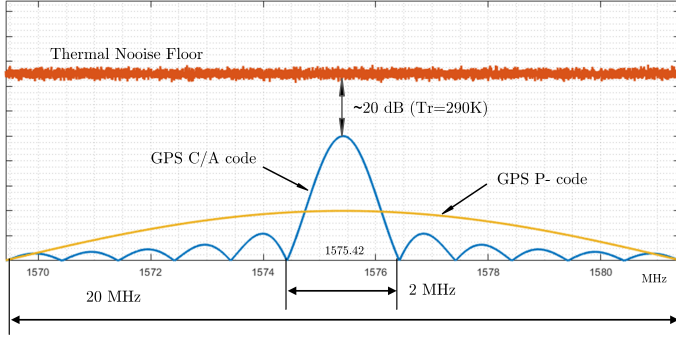


Figura 2. Espectro GPS en la banda L1 [16].

donde μ y σ son la media y la desviación estándar de los puntos FFT promediados, $Q(\cdot)$ representa la función Gaussian Q-Function [12], [13], 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 [11].

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

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.

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

2.3. 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 [14]. 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 $f_0 = 10,23 \text{ MHz}$ [15].

Las señales GPS llegan al receptor a un nivel de muy baja potencia, y la señal L1 ($1575,42 \text{ MHz}$) 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 [16]. El espectro GPS se representa en la Figura 2.

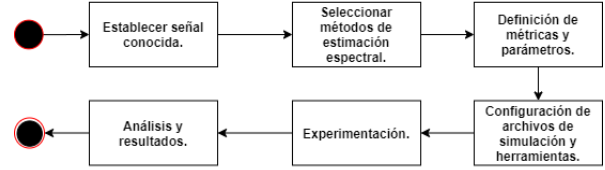


Figura 3. Diagrama de la metodología de evaluación de desempeño [6].

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

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

donde, $\gamma[t_{rec}, f_d, \varphi_0]$ – vector de parámetros de radio-navegación 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 radio-navegación recibida;

$\eta(t)$ – AWGN con media cero.

3. METODOLOGÍA

Para el estudio comparativo, se siguió la metodología propuesta en [6]. Esta metodología consiste en una serie de etapas, tal como se muestra en la Figura 3.

En una primera etapa, se establece la señal de estudio, se realiza su identificación y selección de características. Es decir, el conocimiento a priori de sus parámetros radioeléctricos (esquema de modulación, ancho de banda, frecuencia central, etc.) para validar los resultados obtenidos por cada método de estimación espectral. En la etapa posterior, se seleccionan los métodos de estimación espectral paramétricos y no paramétricos que se van a aplicar y comparar. A continuación, se identifican los parámetros óptimos y la configuración adecuada para cada uno de los métodos de estimación espectral seleccionados. Estos parámetros seleccionados maximizan el rendimiento del detector de energía, como una función de la probabilidad de detección frente a la relación señal-ruido (SNR).

El método de detección del espectro es el detector de energía. Se selecciona este método debido a su bajo nivel de complejidad en la implementación y costo computacional. Este detector no requiere ningún conocimiento previo de la señal de prueba. Durante la etapa de definición de parámetros y métricas de rendimiento, se generan los ficheros de simulación necesarios de acuerdo a las características y parámetros de configuración previamente establecidos. En la etapa de ejecución de los algoritmos de simulación, se realizan las iteraciones de la simulación, considerando los tiempos de ejecución. Seguido, se procede al almacenamiento de los resultados. Las señales de prueba simuladas son

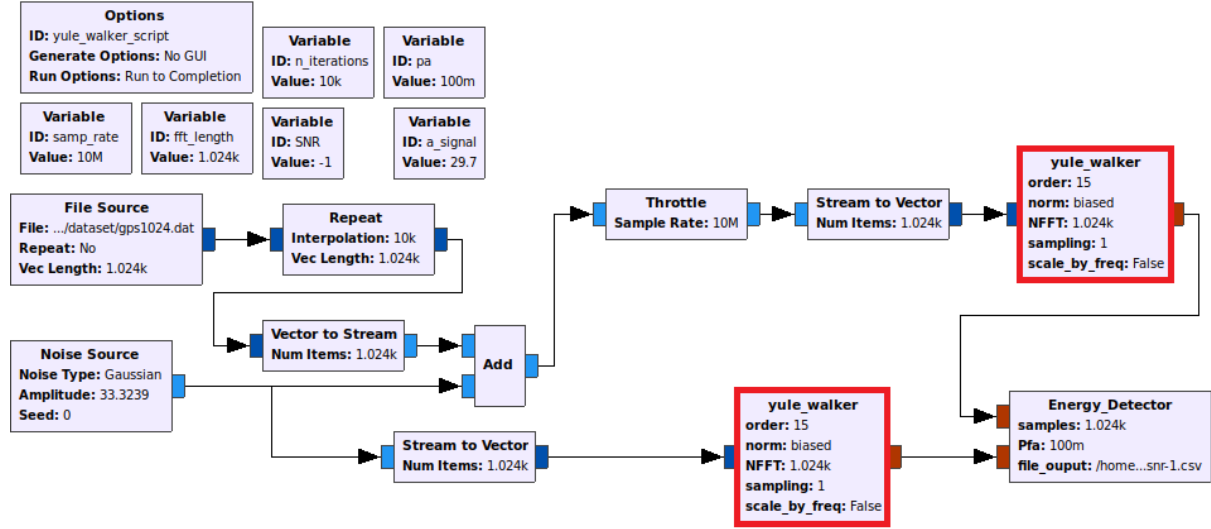


Figura 4. Diagrama de bloques para el proceso de evaluación usando los diferentes métodos de estimación espectral [6].

contaminadas con ruido de distintas potencias para obtener diferentes configuraciones de SNR. En la etapa final, se realiza la presentación y el análisis de los resultados obtenidos experimentalmente, generando como métricas de evaluación las curvas de la característica operativa del receptor (ROC).

Como parte de la metodología, los autores en [6] propusieron un sistema de detección de espectro implementado en GNU Radio, una herramienta de código abierto para aplicaciones de SDR. La Figura 4 muestra el diagrama de bloques del sistema de detección de espectro propuesto, aplicado a señales GPS y utilizando *Yule-Walker* como método de estimación espectral.

3.1. Configuración experimental

El sistema de detección de espectro implementado (Figura 4) permite automatizar el proceso de evaluación de diferentes métodos de estimación espectral a través de la ejecución de múltiples iteraciones con diferentes valores de SNR. El bloque *Repeat* ejecuta las iteraciones, repitiendo la entrada n veces. La entrada corresponde a una señal GPS simulada, almacenada en un flujo de IQ de muestras complejas y abierta por el bloque *File Source*. Para la generación de la señal GPS, se empleó la herramienta GPS-SDR-SIM. GPS-SDR-SIM genera flujos de datos de señal de banda base GPS, que se pueden convertir a RF utilizando plataformas SDR.

A la señal GPS generada se le suma un ruido gaussiano. El bloque *Add* realiza la suma de la señal con el ruido. La fuente de ruido se implementa en el bloque *Noise Source*, el cual corresponde a una fuente de ruido gaussiano. A este bloque se le modifica la amplitud (Amplitude) de tal forma que se genere el valor del SNR. Seguido, se realiza la estimación del espectro a través del bloque *Yule-Walker*, tanto sobre la señal GPS, como sobre el ruido generado. Lo anterior, con el fin de identificar la presencia o ausencia de

la señal a través del bloque *Energy_Detector*. Este bloque implementa el algoritmo de detección y permite al usuario seleccionar el número de muestras y la probabilidad de falsa alarma que se usará para el cálculo. Finalmente, el bloque *Energy_Detector* 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 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 realizan simulaciones con 10,000 iteraciones para garantizar, como mínimo, una probabilidad de falsa alarma de 0.1%. 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 analiza el número de muestras correspondiente a 1 ms de la señal GPS. Como métrica, se usan las curvas ROC, que relaciona el *SNR* (Relación señal/ruido) con la P_d (probabilidad de detección).

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 y se obtiene la probabilidad de detección. Posteriormente, se grafican los datos para realizar el correspondiente análisis de resultados.

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de la evaluación del desempeño de los métodos de estimación seleccionados ante diferentes escenarios de la relación señal-ruido (SNR) y de probabilidad de falsa alarma P_{fa} , utilizando la metodología propuesta en [6].

Las Fig. 5 y Fig. 6 muestran los resultados obtenidos para la FFT (no paramétrico) y Yule-Walker (paramétrico)

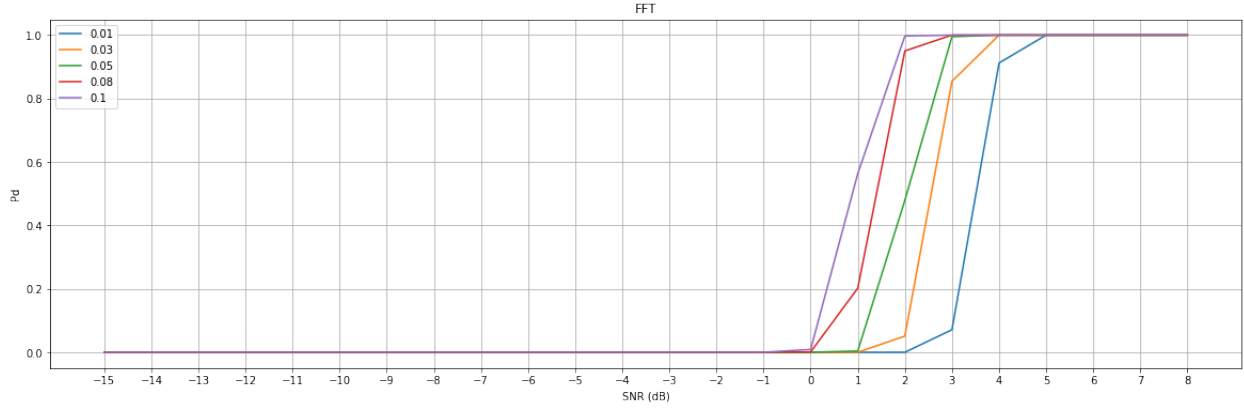


Figura 5. Curvas ROC: SNR vs Pd para diferentes probabilidades de falsa alarma P_{fa} (1,3,5,8,10 %) para la FFT.

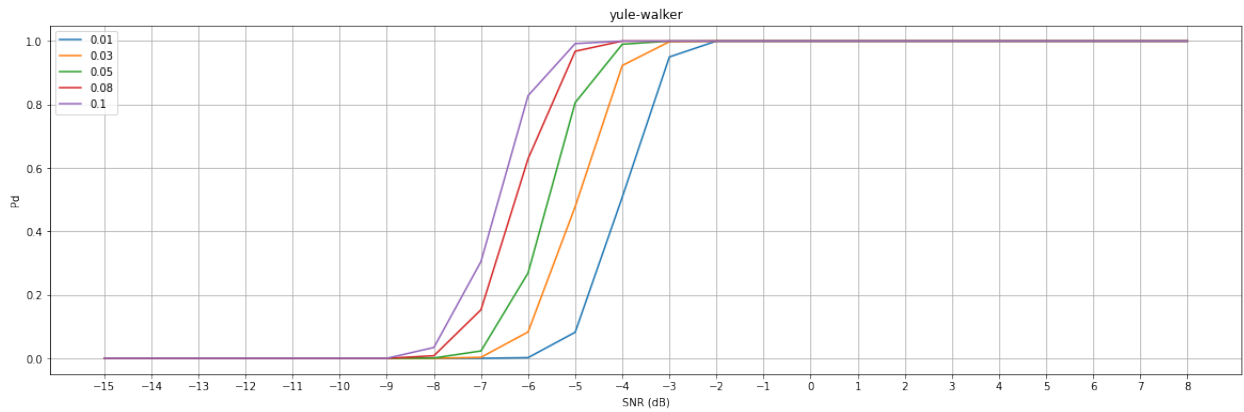


Figura 6. Curvas ROC: SNR vs Pd para diferentes probabilidades de falsa alarma P_{fa} (1,3,5,8,10 %) para el método Yule-walker.

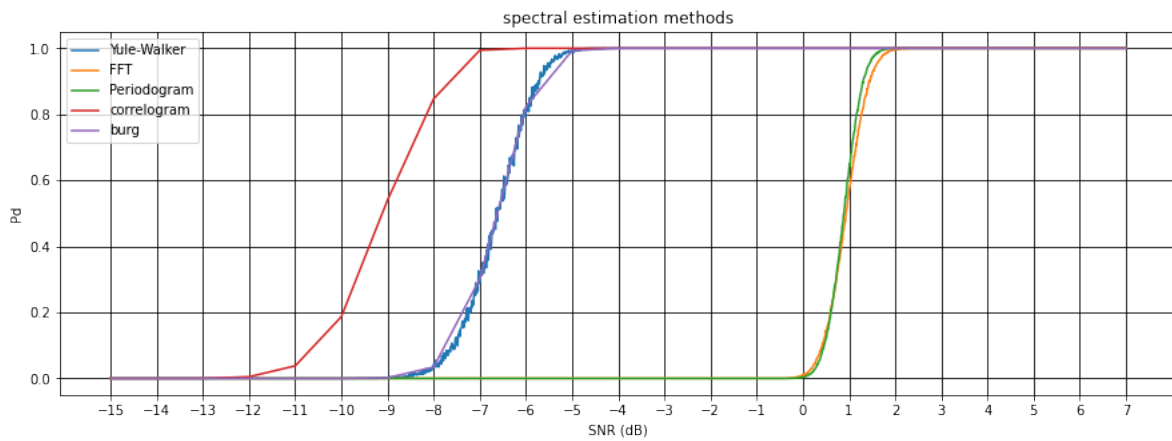


Figura 7. Curvas ROC: SNR vs Pd para métodos paramétricos y no paramétricos implementados con P_{fa} de 0.1.

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 probabi-

lidad 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.

En la Figura 7, 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. El desempeño de los métodos depende de los datos tomados de la señal objetivo y parámetros configurados. Los métodos paramétricos Burg y Yule-Walker poseen un desempeño similar, 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

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. Mediante 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.

En este trabajo, se realizó un estudio comparativo de métodos de estimación espectral no convencionales (i.e., diferente a la FFT), aplicados a señales GPS en condiciones de alto ruido. Los métodos paramétricos permitieron obtener detección de señales GPS a más bajos valores de 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.

Referencias

- [1] "GPS.gov: GPS Spectrum and Interference Issues." <https://www.gps.gov/spectrum/> (accessed Jul. 20, 2020).
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Stoica, Petre and Moses, Randolph L and others. *Spectral analysis of signals*. Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, NJ. 2005.
- [6] M. Terán, J. Aranda, J. Marin, E. Uchamocha, and G. Corzo-Ussa, "A methodology for signals intelligence using non-conventional techniques and software-defined radio," to appear in 2021 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM), 2021, pp. 1–6.
- [7] J. G. Proakis and D. G. Manolakis, *Digital signal processing: principles, algorithms, and applications*, 3rd ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 1996.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] G. J. M. Llames 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] E. D. Kaplan y C. Hegarty, Eds., *Understanding GPS/GNSS: principles and applications*, Third edition. Boston; London: Artech House, 2017.
- [15] "GPS.gov: GPS Spectrum and Interference Issues." <https://www.gps.gov/spectrum/> (accessed Jul. 20, 2020).
- [16] 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.