

# Cooperative primary user detection in multiband environments based on uniform sub-Nyquist sampling in sparse domain

Evelio Astaiza-Hoyos, Héctor Fabio Bermúdez-Orozco & Wilmar Yesid Campo-Muñoz

Facultad de Ingeniería, Grupo GITUQ, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia. [estaiza@uniquindio.edu.co](mailto:estaiza@uniquindio.edu.co), [hfbermudez@uniquindio.edu.co](mailto:hfbermudez@uniquindio.edu.co), [wycampo@uniquindio.edu.co](mailto:wycampo@uniquindio.edu.co)

Received: August 30<sup>th</sup>, de 2016. Received in revised form: February 15<sup>th</sup>, 2017. Accepted: September 25<sup>th</sup>, 2017

## Abstract

In this paper is proposed a novel cooperative Primary User (PU) detection algorithm in multiband environments (Wideband Spectrum Sensing - WBSS) based on Sub-Nyquist Sampling and Matrix Completion. In this way, addressing the problem of large number of samples to be processed when multiband signals are sampled at Nyquist rate or higher rates, seeking to improve the performance of wideband spectrum sensing in terms of detection probability. The simulation results show that the presented algorithm allows the improvement of the WBSS performance in terms of detection probability and the receiver's operational characteristics compared to other cooperative WBSS algorithms based on Sub-Nyquist sampling.

Keywords: Matrix completion; Sub-Nyquist sampling; detection probability; wideband spectrum sensing; primary user.

## Detección cooperativa de usuarios primarios en entornos multibanda basado en muestreo sub-Nyquist uniforme en el dominio disperso

### Resumen

En este artículo se propone un nuevo algoritmo cooperativo de detección de usuarios primarios (PU) en entornos multibanda (Sensado de Espectro de Banda Ancha - WBSS) basado en muestreo Sub-Nyquist y completación de matrices. Así mismo se propone una matriz de muestreo uniforme para la señal multibanda en el dominio disperso. Abordando de esta forma, el problema del gran número de muestras a procesar cuando se realiza el muestreo de señales multibanda a tasa iguales o superiores a la tasa de Nyquist, buscando mejorar el desempeño del sensado de espectro de banda ancha en términos de la probabilidad de detección. Los resultados de simulación permiten evidenciar que el algoritmo propuesto mejora el desempeño del sensado en función de la probabilidad de detección y de las características operacionales del receptor con respecto a otros algoritmos de sensado de espectro de banda ancha cooperativo basados en muestreo Sub-Nyquist.

*Palabras clave:* Completación de matrices; muestreo Sub-Nyquist; probabilidad de detección; sensado de espectro de banda ancha; usuarios primarios.

### 1. Introducción

Recientemente en las áreas de procesamiento digital de señales y comunicaciones inalámbricas, se han realizado una gran cantidad de investigaciones que abordan el problema del sensado de espectro en entornos multibanda. Donde un ámbito importante de aplicación es en los sistemas de Radio Cognitivo (CR) [1], en estos, la función de sensado de espectro (SS) cumple una tarea clave en la identificación de

porciones de espectro no utilizado (Espacios en blanco - WS) por los usuarios que poseen los derechos de uso del espectro (Usuarios Primarios - PU). Este problema es mayor cuando la función de SS requiere identificar los WS presentes en un entorno multibanda, debido a la gran cantidad de muestras a procesar por el dispositivo de radio cognitivo (CRD), dadas las altas tasas de muestreo requeridas, incrementando el tiempo de sensado y la potencia consumida por el CRD [2]. Por ello, en los últimos años, basados en la idea de una

**How to cite:** Astaiza-Hoyos, E., Bermúdez-Orozco, H.F. and Campo-Muñoz, W.Y., Detección cooperativa de usuarios primarios en entornos multibanda basado en muestreo sub-Nyquist uniforme en el dominio disperso DYNA, 84(203), pp. 110-117, December, 2017.

ocupación dispersa del canal de comunicaciones en escenarios multibanda (i.e. pocas bandas de frecuencia ocupadas y múltiples disponibles), se han trabajado diversidad de propuestas basadas en Sensado Compresivo (CS) [3,4], el cual proporciona una manera eficiente de procesar señales dispersas, es decir, que se pueden aproximar por una expansión en términos de una base adecuada, que solo tiene algunos términos significativos, esta característica permite realizar el sensado de espectro de banda ancha digitalizando la señal multibanda a tasas inferiores a la tasa de Nyquist.

En el escenario de CR, los CRD requieren efectuar permanentemente la detección de actividad de los PU en el canal de comunicaciones de la banda de interés bajo condiciones de Relación Señal a Ruido (SNR) tan bajas como sea posible (i.e. del orden de -20dB para el estándar IEEE 802.22) [5]. En este contexto, uno de los principales retos que se enfrentan en CR es la implementación del sensado de espectro de banda ancha, minimizando la tasa de muestreo requerida, garantizando alta probabilidad de detección y bajas probabilidades de omisión de detección y falsa alarma en condiciones de baja SNR. Por lo anterior, buscando mejorar el desempeño del SS de banda ancha basado en muestreo Sub-Nyquist en términos de las probabilidades mencionadas, se propone explotar la diversidad espacial mediante la cooperación de los distintos CRD en una misma región.

Por lo anterior, en este artículo se propone un nuevo método cooperativo de sensado de espectro de banda ancha, basado en CS y compleción de matrices, que permite reducir la cantidad de muestras a ser procesadas por cada CRD, minimiza la carga de información en los enlaces con el Centro de Fusión (FC) (centro de decisión cooperativo), y mejora el desempeño en términos de detección y características operacionales del receptor comparado con algoritmos similares en el estado del arte [6-9]. Para realizar la operación de muestreo, se propone una matriz uniforme en el dominio disperso; posteriormente se realiza la detección de energía por sub-banda con base en la estimación de la señal recibida en el dominio disperso mediante el algoritmo *Singular Value Thresholding* (SVT) [10], luego se toman las decisiones locales de ocupación de espectro por parte de cada CRD y son transmitidas al FC, el cual mediante la aplicación de regla OR a las decisiones locales toma la decisión final de ocupación espectral.

En (Cohen et al. 2015) se presenta un algoritmo de sensado de espectro de banda ancha cooperativo, el cual se basa en dos algoritmos de recuperación del soporte conjunto de la señal multibanda, a partir de las matrices de sensado y de mediciones de cada CRD; esto implica una gran carga de información en los enlaces de comunicación entre los CRD y el FC. En [7] se propone un algoritmo de sensado de espectro de banda ancha cooperativo basado en el algoritmo de Maximización de la Expectativa (EM) propuesto en [11], para realizar la estimación y detección conjunta de la ocupación espectral en la multibanda, el algoritmo propuesto opera a una tasa de muestreo igual o superior a la tasa de Nyquist, lo cual implica que los CRD deban procesar una gran cantidad de muestras, incrementando los tiempos de sensado y la potencia consumida. En [8] se propone un algoritmo de sensado de espectro de banda ancha cooperativo

basado en muestreo sub-Nyquist multitasa, para el cual se analiza su desempeño en términos de los límites teóricos. En [9] se propone un algoritmo de sensado de espectro de banda ancha cooperativo basado en CS de dos etapas, en la primera se efectúa la reconstrucción de la señal multibanda a partir de las mediciones de cada CRD y en la segunda se realiza la eliminación de ruido, para posteriormente tomar la decisión de ocupación espectral; esto implica una gran carga de información en los enlaces de comunicación entre los CRD y el FC.

El resto del artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: En la sección II se plantea el modelo del Sistema, en la sección III se describe el método propuesto para realizar el sensado de espectro cooperativo de banda ancha basado en muestreo sub-Nyquist, en la sección IV se presenta la evaluación del desempeño del método propuesto contrastando las métricas de evaluación contra las obtenidas por los métodos de sensado de espectro cooperativo en el estado del arte, y finalmente, en la sección V se presentan las conclusiones del estudio realizado.

## 2. Modelo del sistema

Considerando un conjunto de  $q$  dispositivos de CR que operan sobre una multibanda (licenciada) con un ancho de banda total de  $B$  Hz, el cual se encuentra dividido en  $k$  sub-bandas no traslapadas de igual ancho de banda  $b$ , equivalente a  $B/k$  Hz por canal como se muestra en la Fig. 1.

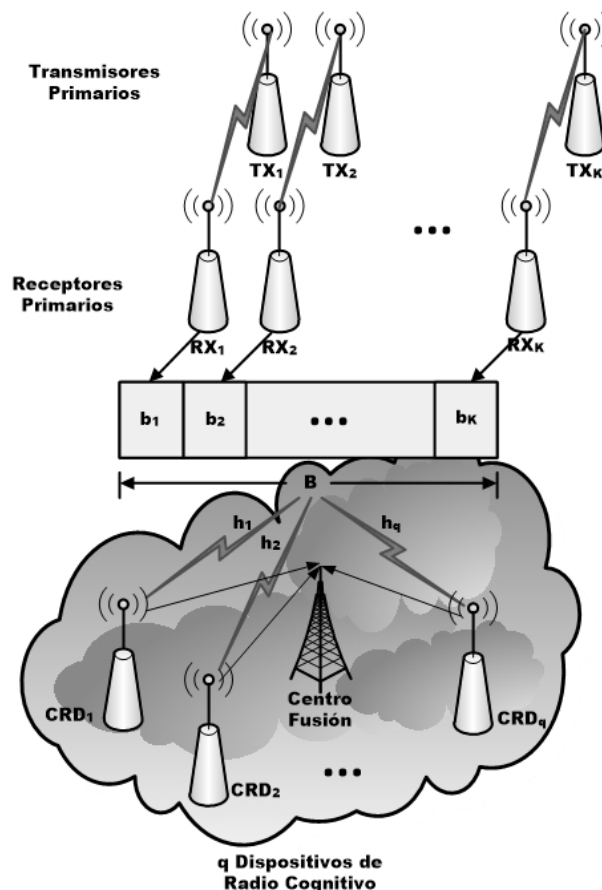


Figura 1. Escenario Sensado de Espectro de Banda Ancha Cooperativo. Fuente: Los autores

Asumiendo que las muestras de la señal multibanda  $\mathbf{x}_{i,j}(n)$  son variables aleatorias independientes que siguen una distribución normal de media cero y varianza  $\sigma_s$  ( $\mathcal{N}(0, \sigma_s)$ ), presunción que es válida para cualquier señal multibanda en la cual cada portadora se modula independientemente por flujos de datos; y asumiendo que las muestras de ruido  $\mathbf{w}_{i,j}(n)$  en cada CRD son variables aleatorias normalmente distribuidas, independientes, de media cero y varianza  $\sigma_n$ , ( $\mathcal{N}(0, \sigma_n)$ ), la señal recibida por el  $i$ -ésimo CRD en la  $j$ -ésima sub-banda con  $j = 1, 2, \dots, k$  puede expresarse como se indica en la ec.(1).

$$\mathbf{x}_{i,j}(n) = h_{i,j} \mathbf{s}_i(n) + \mathbf{w}_{i,j}(n) \quad (1)$$

donde  $\mathbf{x}_{i,j}(n)$  es la  $n$ -ésima componente de la señal recibida por el  $i$ -ésimo CRD con  $i = 1, 2, \dots, q$ , en la  $j$ -ésima sub-banda con  $j = 1, 2, \dots, k$ ,  $h_{i,j}$  representa la respuesta del canal para el  $i$ -ésimo CRD en la  $j$ -ésima sub-banda,  $\mathbf{s}_i(n)$  es la  $n$ -ésima componente de la señal transmitida por el  $i$ -ésimo PU sobre la  $j$ -ésima sub-banda y recibida por el  $i$ -ésimo CRD y  $\mathbf{w}_{i,j}(n)$  es la  $n$ -ésima componente del ruido en la  $j$ -ésima sub-banda percibido por el  $i$ -ésimo CRD.

El problema de sensado de espectro en la  $j$ -ésima sub-banda, puede formularse como un problema de comprobación de hipótesis estadística, en el cual, se debe escoger entre la hipótesis  $\mathcal{H}_{0,j}$  la cual indica que la  $j$ -ésima sub-banda se encuentra disponible, y la hipótesis  $\mathcal{H}_{1,j}$  la cual indica que la  $j$ -ésima sub-banda se encuentra ocupada, lo anterior puede expresarse de acuerdo a la ec.(2).

$$\begin{cases} \mathcal{H}_{0,j}: \mathbf{x}_j = \mathbf{w}_j \\ \mathcal{H}_{1,j}: \mathbf{x}_j = h_j \mathbf{s}_j^* + \mathbf{w}_j \end{cases} \quad (2)$$

donde  $\mathbf{x}_j \in \mathbb{R}^p$  es el vector de la señal recibida por el  $i$ -ésimo CRD en la  $j$ -ésima sub-banda, con  $p$  igual a la cantidad de muestras tomadas por sub-banda,  $\mathbf{w}_j \in \mathbb{R}^p$  es el vector que representa las componentes de ruido blanco presente en la  $j$ -ésima sub-banda,  $h_j \in \mathbb{R}$  es el vector que representa la respuesta del canal en la  $j$ -ésima sub-banda, finalmente  $\mathbf{s}_j^* \in \mathbb{R}^p$  es el vector que representa la señal transmitida por el  $j$ -ésimo PU sobre la  $j$ -ésima sub-banda, donde el superíndice \* denota transpuesto.

### 3. Método propuesto de sensado de espectro cooperativo de banda ancha

El método de sensado de espectro cooperativo de banda ancha propuesto se ilustra en la Fig. 2. Inicialmente la señal multibanda  $\mathbf{x}(t)$  es recibida por cada uno de los CRD, la versión en cada CRD se denota por  $\mathbf{x}_i(t)$  con  $i = 1, 2, \dots, q$ , posteriormente la señal captada por cada CRD se muestrea con la matriz de muestreo uniforme en el dominio disperso descrita en el literal A de esta sección, donde la operación de muestreo se implementa a través de la matriz de muestreo  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ , donde  $m < n$  con  $n$  que representa la cantidad de muestras de la señal cuando se realiza el muestreo a la tasa de Nyquist y  $m$  representa la cantidad de muestras Sub-Nyquist tomadas, obteniendo el vector de muestras  $\mathbf{y}_i \in \mathbb{R}^m$ , donde  $\mathbf{y}_i = \mathbf{A} \mathbf{x}_i$ . Posteriormente, el bloque de extracción de características

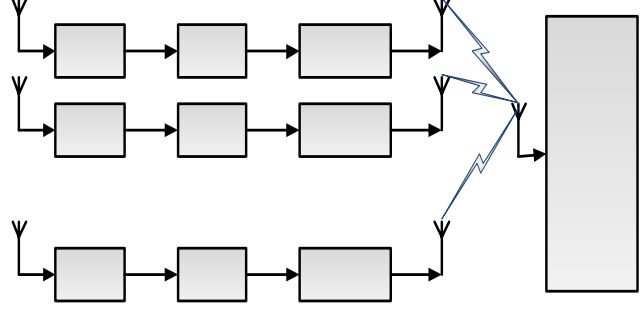


Figura 2. Diagrama en Bloques CRDs y Centro Fusión - Método Cooperativo Propuesto.

Fuente: Los autores

$$\begin{bmatrix} e^{i\frac{\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{3\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{5\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{7\pi}{10}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{6\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{12\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{18\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{24\pi}{10}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e^{i\frac{5\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{15\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{25\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{35\pi}{10}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{14\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{28\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{42\pi}{10}} & 0 & e^{i\frac{56\pi}{10}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura 3. Matriz de Muestreo Uniforme en el Dominio Disperso Propuesta. Para  $n = 10$  y Factor de Sub-muestreo 4.

Fuente: Los autores

realiza la estimación de la aproximación dispersa del vector  $\mathbf{x}_i(t)$  que se representa como  $\mathbf{x}_i[n] \in \mathbb{R}^n$ , así mismo efectúa el cálculo de la energía por sub-banda de la señal estimada. Luego, en el bloque de clasificación y detección se realiza la detección de WS en la multibanda basado en la energía en cada sub-banda de cada vector de señal estimado en cada CRD  $\mathbf{x}_i[n] \in \mathbb{R}^n$ , finalmente, se transmiten las decisiones locales de cada CRD al FC, el cual toma la decisión de ocupación final en la multibanda mediante la aplicación de la regla OR entre las decisiones parciales obtenidas en el paso anterior e informa la decisión final a los CRD a través del canal de control, el cual se asume libre de errores.

A continuación se describen las funciones realizadas por los bloques ilustrados en la Fig.2.

#### 3.1. Muestreo

El muestreo de la señal multibanda  $\mathbf{x}_i(t)$ , se realiza mediante la matriz de muestreo  $\mathbf{A}$  definida como se ilustra en la Fig. 3.

La cual cumple con el teorema 1.1 propuesto en [12]. Del proceso de muestreo sub-Nyquist, se obtienen muestras de la forma ilustrada por la ec.(3).

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{A} \mathbf{x}_i \quad (3)$$

Donde  $\mathbf{A}$  es la matriz de sensado de tamaño  $m \times n$ ,  $\mathbf{y}_i \in \mathbb{R}^m$  es el vector de mediciones y  $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^n$  es el vector que representa la señal multibanda  $k$ -dispersa [4], por lo tanto, las entradas de  $\mathbf{y}_i$  son las muestras sub-Nyquist de  $\mathbf{x}_i$ .

### 3.2. Extracción de características

La característica de la señal que se utiliza para realizar la operación de sensado de espectro es la energía por sub-banda, razón por la cual, el enfoque utilizado se basa en la estimación de la señal dispersa presente en la multibanda sensada. Abordando problema de encontrar la solución dispersa de  $\mathbf{y}_i = \mathbf{A}\mathbf{x}_i$ , utilizando compleción de matrices se debe resolver el problema de optimización planteado en la ec. (4)

$$\min_{\mathbf{x}_i} \|\mathbf{x}_i\|_* \quad \text{sujeto a } y_{i,j} = x_{i,j} \quad (4)$$

Donde  $\|\mathbf{x}_i\|_*$  representa la norma nuclear de  $\mathbf{x}_i$ ,  $y_{i,j}$  representa la  $j$ -ésima entrada del vector de muestras del  $i$ -ésimo CRD y  $x_{i,j}$  representa la  $j$ -ésima entrada del vector de la señal multibanda del  $i$ -ésimo CRD. Para resolver el problema planteado en la ec. (4) se utiliza el algoritmo SVT propuesto en [10], obteniendo de esta manera la estimación  $\hat{\mathbf{x}}_i$  de la señal presente en el canal a partir de las muestras  $\mathbf{y}_i$ .

### 3.3. Clasificación y detección

Para realizar la detección de energía para cada sub-banda y para cada CRD, se compara la energía de la señal recibida con un umbral de detección, decidiendo de esta forma la ocupación de una sub-banda. Por lo tanto la energía presente en cada sub-banda puede calcularse de acuerdo a la ec. (5).

$$\mathcal{E}_{i,j}(f) = |h_i|^2 \sum_{Sb_{i,j}} |\hat{\mathbf{x}}_i[f]|^2 \quad (5)$$

Donde  $\mathcal{E}_{i,j}$  representa la energía en la sub-banda  $j$ -ésima del  $i$ -ésimo CRD sobre una secuencia de  $N$  muestras,  $Sb_{i,j}$  representa la sub-banda  $j$ -ésima del  $i$ -ésimo CRD,  $h_i$  representa la respuesta del canal del  $i$ -ésimo CRD y  $\hat{\mathbf{x}}_i[f]$  representa la señal estimada en el canal del  $i$ -ésimo CRD. Luego, si la energía en la sub-banda  $j$ -ésima del  $i$ -ésimo CRD es mayor al umbral de decisión  $\mathcal{T}_{h_{i,j}}$  ( $\mathcal{E}_{i,j} > \mathcal{T}_{h_{i,j}}$ ) la decisión tomada es  $\mathcal{H}_{1,j}$  (sub-banda ocupada) en caso contrario se decide  $\mathcal{H}_{0,j}$  (sub-banda libre - WS).

Las probabilidades de detección  $P_{d_j}$ , omisión de detección  $P_{md_j}$  y falsa alarma  $P_{f_j}$  en la sub-banda  $j$ -ésima se definen como se indica en las ecs. (6), (7) y (8).

$$P_{d_j} = P(\mathcal{H}_{1,j} | \mathcal{H}_{1,j}) \quad (6)$$

$$P_{md_j} = P(\mathcal{H}_{0,j} | \mathcal{H}_{1,j}) = 1 - P_{d_j} \quad (7)$$

$$P_{f_j} = P(\mathcal{H}_{1,j} | \mathcal{H}_{0,j}) \quad (8)$$

Entendiendo como probabilidad de detección a aquella probabilidad de detección correcta de ocupación de una sub-banda o de presencia de señal de un PU en una sub-banda (decidir  $\mathcal{H}_{1,j}$  cuando  $\mathcal{H}_{1,j}$  es verdadero), por probabilidad de falsa alarma se entiende la probabilidad asociada a detectar

señal de un PU cuando en una sub-banda realmente hay un espacio en blanco (decidir  $\mathcal{H}_{1,j}$  cuando  $\mathcal{H}_{0,j}$  es verdadero) y por probabilidad de omisión de detección se entiende aquella probabilidad asociada a detectar un espacio en blanco cuando en una sub-banda hay presencia de señal de un PU (decidir  $\mathcal{H}_{0,j}$  cuando  $\mathcal{H}_{1,j}$  es verdadero).

De acuerdo al teorema del límite central [13], si el número de muestras es lo suficientemente grande ( $\geq 30$  en la práctica), las estadísticas (media y varianza) de  $\mathcal{E}_{i,j}$  asociadas a las hipótesis  $\mathcal{H}_{0,j}$  y  $\mathcal{H}_{1,j}$  son normalmente distribuidas asintóticamente y dadas por las ecs. (9) y (10).

$$E(\mathcal{E}_{i,j}) = \begin{cases} 2N\sigma_{n_{i,j}}^2 & : \mathcal{H}_{0,j} \\ (SNR_{i,j} + N)\sigma_{n_{i,j}}^2 & : \mathcal{H}_{1,j} \end{cases} \quad (9)$$

$$Var(\mathcal{E}_{i,j}) = \begin{cases} 2N\sigma_{n_{i,j}}^4 & : \mathcal{H}_{0,j} \\ 2(2SNR_{i,j} + N)\sigma_{n_{i,j}}^4 & : \mathcal{H}_{1,j} \end{cases} \quad (10)$$

Con  $\sigma_{n_{i,j}}^2$  que denota la energía del ruido en el  $i$ -ésimo CRD y  $j$ -ésima sub-banda y  $SNR_{i,j}$  denota la relación señal a ruido del  $i$ -ésimo CRD en la  $j$ -ésima sub-banda.

Luego, las probabilidades de detección y falsa alarma del  $i$ -ésimo CRD en la  $j$ -ésima sub-banda pueden expresarse como se indica en las ecs. (11) y (12).

$$P_{d_{i,j}} = Q \left[ \frac{\mathcal{T}_{h_{i,j}} - E(\mathcal{E}_{i,j} | \mathcal{H}_{1,j})}{\sqrt{Var(\mathcal{E}_{i,j} | \mathcal{H}_{1,j})}} \right] = Q \left[ \frac{\mathcal{T}_{h_{i,j}} - (SNR_{i,j} + N)\sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt{2(2SNR_{i,j} + N)\sigma_{n_{i,j}}^4}} \right] \quad (11)$$

$$P_{f_{i,j}} = Q \left[ \frac{\mathcal{T}_{h_{i,j}} - E(\mathcal{E}_{i,j} | \mathcal{H}_{0,j})}{\sqrt{Var(\mathcal{E}_{i,j} | \mathcal{H}_{0,j})}} \right] = Q \left[ \frac{\mathcal{T}_{h_{i,j}} - 2N\sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt{2N\sigma_{n_{i,j}}^4}} \right] \quad (12)$$

Donde

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (13)$$

Por lo tanto, el umbral de decisión  $\mathcal{T}_{h_{i,j}}$  para un valor específico de  $P_{f_{i,j}}$  está dado por (14).

$$\mathcal{T}_{h_{i,j}} = Q^{-1}(P_{f_{i,j}})^2 \sqrt{2N\sigma_{n_{i,j}}^4 + 2N\sigma_{n_{i,j}}^2} \quad (14)$$

### 3.4. Decisión cooperativa

Posteriormente, se procede a decidir de forma conjunta la ocupación por sub-banda mediante regla OR entre las decisiones preliminares de cada CRD. De acuerdo a la regla de decisión OR, cuando al menos en una de las  $q$  versiones de la sub-banda (una versión por CRD) se detecta ocupación, la decisión final es que la sub-banda se encuentra ocupada. Por lo tanto las probabilidades de detección y falsa alarma por sub-banda finales se expresan de acuerdo a las ecs. (15) y (16).

$$P_{d_j} = 1 - \prod_{i=1}^q (1 - P_{d_{i,j}}) \quad (15)$$

$$P_{f_j} = 1 - \prod_{i=1}^q (1 - P_{f_{i,j}}) \quad (16)$$

Luego, las probabilidades de detección  $P_{d_j}$ , omisión de detección  $P_{md_j}$  y falsa alarma  $P_{f_j}$  en la sub-banda  $j$ -ésima se definen de acuerdo a las ecs. (17), (18) y (19).

$$P_{d_j} = 1 - \prod_{i=1}^q \left( 1 - Q \left[ \frac{T_{h_{i,j}} - (SNR_{i,j} + N) \sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt{2(2SNR_{i,j} + N) \sigma_{n_{i,j}}^4}} \right] \right) \quad (17)$$

$$P_{md_j} = \prod_{i=1}^q \left( 1 - Q \left[ \frac{T_{h_{i,j}} - (SNR_{i,j} + N) \sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt{2(2SNR_{i,j} + N) \sigma_{n_{i,j}}^4}} \right] \right) \quad (18)$$

$$P_{f_j} = 1 - \prod_{i=1}^q \left( 1 - Q \left[ \frac{T_{h_{i,j}} - 2N \sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt{2N \sigma_{n_{i,j}}^4}} \right] \right) \quad (19)$$

Finalmente, se propone calcular las probabilidades de las probabilidades de detección  $P_d$ , omisión de detección  $P_{md}$  y falsa alarma  $P_f$  de la multibanda de acuerdo a las ecs. (20), (21) y (22).

$$P_d = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \left\{ 1 - \prod_{i=1}^q \left( 1 - Q \left[ \frac{T_{h_{i,j}} - (SNR_{i,j} + N) \sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt{2(2SNR_{i,j} + N) \sigma_{n_{i,j}}^4}} \right] \right) \right\} \quad (20)$$

$$P_{md} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \left\{ \prod_{i=1}^q \left( 1 - Q \left[ \frac{T_{h_{i,j}} - (SNR_{i,j} + N) \sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt{2(2SNR_{i,j} + N) \sigma_{n_{i,j}}^4}} \right] \right) \right\} \quad (21)$$

$$P_f = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \left\{ 1 - \prod_{i=1}^q \left( 1 - Q \left[ \frac{T_{h_{i,j}} - 2N \sigma_{n_{i,j}}^2}{\sqrt{2N \sigma_{n_{i,j}}^4}} \right] \right) \right\} \quad (22)$$

### 3.1. Algoritmo propuesto

Para implementar el sensado de espectro de acuerdo al proceso descrito en los literales A, B, C y D, se propone el algoritmo que se ilustra en la Fig. 4, donde los parámetros de entrada del algoritmo son: el conjunto de entradas observadas  $\mathbf{Om}$  de acuerdo a la matriz de sensado  $\mathbf{A}$ , el vector de muestras del canal por cada CRD  $\mathbf{y}_i$ , el ancho de banda total de la multibanda  $B$ , el ancho de banda de cada sub-banda  $b$ , el tamaño del vector de muestras  $m$  y el tamaño del vector señal  $n$ , parámetro de objetivo funcional  $\tau$  definido en

Algoritmo: CWBSS	
1	Input: $\mathbf{Om}, \mathbf{y}_i, n, B, b, \tau, \delta$
2	Output: $\mathbf{ch}$
3	Var: $\mathbf{Psb}_i$ % Potencia por Sub-banda
4	Inicio
5	$Cont1 = 0$
6	$Cont2 = 1$
7	$k = B/b$
8	$K = \binom{m}{n} k$
9	Para $i = 1$ hasta $q$
10	$\mathbf{x}_i \leftarrow SVT(n, \mathbf{Om}, \mathbf{y}_i, \tau, \delta, K)$
11	$Cont2 = Cont2 + 1$
12	Para $j = 1$ hasta $k$
	$\mathbf{Psb}_i(j, (Cont1 + 1)) \leftarrow suma((Cont1 + 1), \mathbf{x}_i((Cont1 * \frac{n}{k}) hasta \mathbf{x}_i((Cont1 + 1), (Cont1 + 1) * n/k))$
13	Si $\mathbf{Psb}_i(j, (Cont1 + 1)) > 0$ luego
14	$\mathbf{ch\_sb}_i(j, (Cont1 + 1)) \leftarrow 1$
15	Sino
16	$\mathbf{ch\_sb}_i(j, (Cont1 + 1)) \leftarrow 0$
17	Fin Si
18	$Cont1 = Cont1 + 1$
19	Fin Para
20	Fin Para
21	Para $l = 1$ hasta $k$
22	$\mathbf{ch}(l) = \mathbf{ch\_sb}_i(l, 1) or \mathbf{ch\_sb}_i(l, 2) or \dots or \mathbf{ch\_sb}_i(l, q)$
23	Fin para
24	Retorna $\mathbf{ch}$
25	

Figura 4. Algoritmo de Sensado de Espectro de Banda Ancha Cooperativo CWBSS.

Fuente: Los autores

[10] y tamaño del paso definido en [10] (línea 1); el algoritmo propuesto retorna el vector de sub-bandas ocupadas y disponibles en la multibanda  $\mathbf{ch}$  por cada CRD (línea 2); se utiliza la variable auxiliar  $\mathbf{Psb}$  para almacenar la potencia por sub-banda de la multibanda detectada por cada CRD (línea 3). El proceso de sensado de espectro inicia calculando el número de sub-bandas en la multibanda (línea 7) y el número de componentes significativas de la multibanda (línea 8), posteriormente, se estima la señal recibida por cada CRD mediante la función SVT utilizando el algoritmo de compleción de matrices SVT propuesto en [10] (línea 10), posteriormente, se calcula la potencia estimada por sub-banda en cada CRD (líneas 13 a 21), finalmente se estima la presencia o no de señal en cada sub-banda utilizando la regla OR (líneas 22 a 24).

## 4. Resultados

En esta sección se analiza el desempeño del algoritmo propuesto en un escenario en el cual se presenta una señal multibanda compuesta por seis canales de 3.3MHz cada uno, los cuales aleatoriamente presentan ocupación, el objetivo es evaluar las condiciones bajo las cuales el algoritmo propuesto presenta un desempeño adecuado para el sensado de espectro, en comparación con el rendimiento de los algoritmos propuestos en [6-9].

Tabla 1. Parámetros de Simulación.

Parámetro	Valor
<b>Generación Señal Multibanda</b>	
Ancho de Banda Señal Multibanda, $BW$	20MHz
Ancho de Banda por Canal, $B$	3.3MHz
Modulación Señal en Canal	16QAM
Tasa de Símbolos, $R_s$	2Msps
Factor de Roll Off Filtro Transmisión, $\rho$	0.5
Tasa Muestreo Nyquist, $f_s$	40MHz
Número Muestras Señal Multibanda (Nyquist), $n$	2000
Frecuencias de Portadora, $f_c$	3MHz, 6MHz,
	9MHz,
	12MHz,
	15MHz y 18MHz
<b>Muestreador Sub Nyquist</b>	
Número Muestras Señal Entrada, $n$	2000
Número Muestras Señal Entrada, $m$	100
<b>Algoritmo de Sensado CWBSS</b>	
Número de Usuarios Cooperativos, $q$	2

Fuente: Los autores

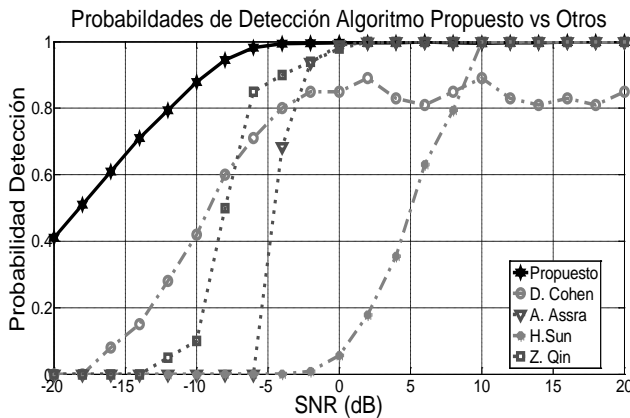


Figura 5. Desempeño Algoritmo Cooperativo Propuesto vs Otros Algoritmos de Sensado Cooperativo en Función de SNR.

Fuente: Los autores

**4.1. Escenario y parámetros de simulación**

En la implementación de la simulación del algoritmo de sensado de espectro de banda ancha cooperativo propuesto, se genera una señal multibanda de acuerdo con los parámetros de simulación que se muestran en la Tabla 1.

**4.2. Resultados de simulación, métricas, caracterización y comparación**

Para evaluar el desempeño del algoritmo de sensado de espectro propuesto, se utilizan como métricas la probabilidad de detección, analizadas en función de la relación señal a ruido de la multibanda generada y la curva de operación del receptor (ROC), comparadas con las métricas obtenidas de los algoritmos propuestos en [6-9]; los resultados obtenidos se muestran en las Figs. 5 y 6.

En la Fig. 5 se observa el desempeño del algoritmo propuesto contra el desempeño de los algoritmos de sensado de espectro cooperativo de banda ancha propuestos en [6-9];

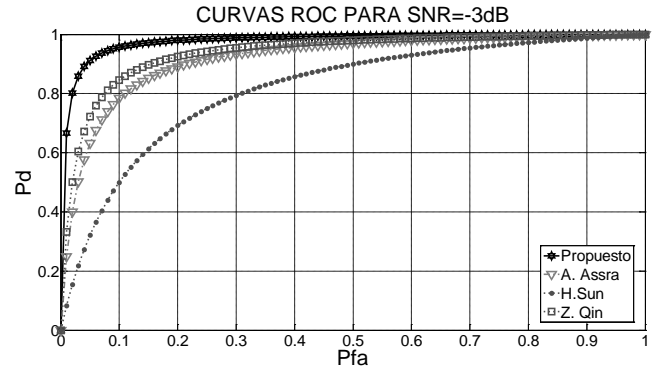


Figura 6. Curvas ROC para SNR = -3dB.

Fuente: Los autores

en la figura se puede apreciar que el desempeño de los algoritmos en [6-9] es inferior al alcanzado por el algoritmo propuesto, en función de la probabilidad de detección, de la misma forma se aprecia la probabilidad de detección para el algoritmo propuesto es aproximadamente igual a 1 para valores de SNR superiores a -5dB.

En la Fig. 6 puede observarse que el mejor desempeño en términos de las curvas de ROC es el correspondiente al algoritmo propuesto, esto debido a que el área bajo la curva del algoritmo propuesto es la mayor, lo cual indica la capacidad del algoritmo de propuesto de identificar acertadamente los WS.

Como se aprecia de igual manera en la Fig. 6, el algoritmo con peor desempeño es el propuesto por Sun en [8], ya que la curva ROC cubre una menor área que la correspondiente a los demás algoritmos. Considerando que los resultados ilustrados en la Fig. 6 corresponden a las curvas ROC de los algoritmos contrastados a una SNR de -3dB, se evidencia de nuevo que el algoritmo propuesto mejora significativamente el desempeño de los otros algoritmos en condiciones de baja SNR.

En la Fig. 7 se ilustra el desempeño del algoritmo propuesto en función de la probabilidad de detección contra la SNR de acuerdo al número de CRDs que cooperan. Aquí puede apreciarse que en la medida que la cantidad de CRDs que cooperan es mayor, la SNR a la cual se alcanza una probabilidad de detección aproximadamente igual a uno disminuye, alcanzándose el desempeño objetivo en CR para el estándar 802.22 con una cantidad aproximada de 20 CRDs cooperantes.

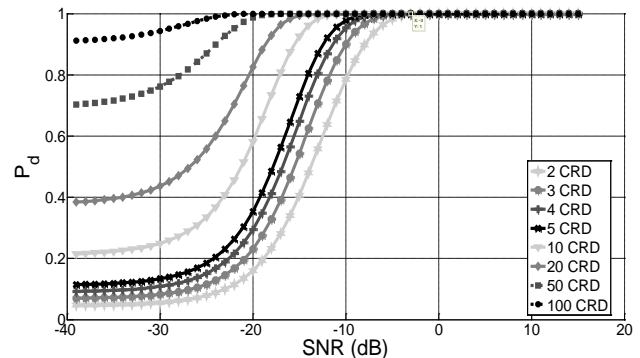


Figura 7. Probabilidad de Detección Contra SNR en Función del Número de CRDs Cooperantes (Sub-bandas=6, Sub-muestreo=10).

Fuente: Los autores

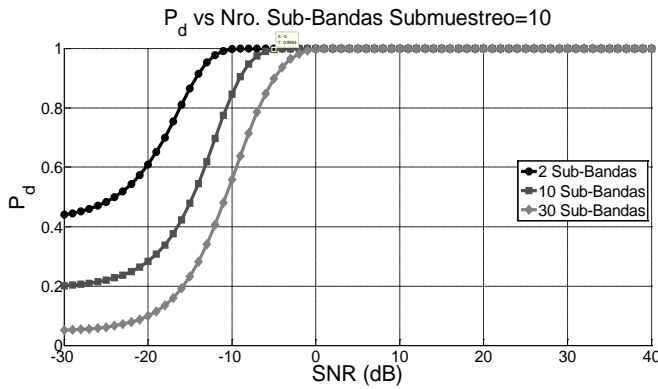


Figura 8. Probabilidad de Detección Contra SNR en Función del Número de Sub-Bandas en la Multibanda (CRDs Cooperantes =3, Sub-muestreo=10).

Fuente: Los autores

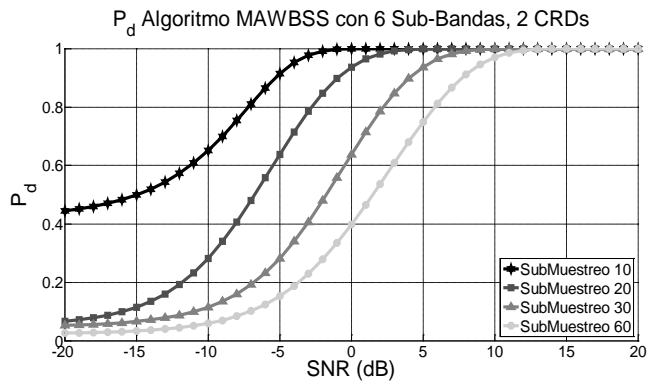


Figura 9. Probabilidad de Detección Contra SNR en Función del Factor de Sub-Muestreo (Sub-bandas=6, CRDs Cooperantes =2).

Fuente: Los autores

En la Fig. 8 se muestra el desempeño del algoritmo propuesto en función de la probabilidad de detección contra la SNR de acuerdo al número de sub-bandas definidas en la multibanda sensada. En esta, es posible evidenciar que en la medida que existe una mayor cantidad de sub-bandas en la multibanda, disminuye el desempeño del algoritmo.

En la Fig. 9 se puede evidenciar el impacto que tiene el factor de sub-muestreo en el desempeño del algoritmo. En esta figura se puede apreciar que a menor factor de sub-muestreo, mejor es el desempeño del algoritmo propuesto; alcanzándose una probabilidad de detección aproximadamente igual a 1 para una SNR de -3dB con un factor de sub-muestreo igual a 10, en un escenario donde la multibanda está conformada por 12 sub-bandas y 2 CRDs cooperantes.

## 5. Conclusiones

En este artículo se propone un novedoso algoritmo de sensado de espectro cooperativo de banda ancha en dispositivos de CR basado en compleción de matrices, demostrándose que mediante el algoritmo propuesto es posible realizar la función de sensado de espectro de banda ancha utilizando una cantidad de muestras menor a las

obtenidas a la tasa de Nyquist, alcanzando un desempeño superior a otros algoritmos de sensado de espectro cooperativo propuestos en el estado del arte. Así mismo permite realizar la función de sensado de espectro de banda ancha de forma eficiente y cumpliendo con los requerimientos de CR respecto a detección confiable en condiciones de baja SNR.

## Referencias

- [1] Mitola III, J., Cognitive radio an integrated agent architecture for software defined radio, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden, 2000.
- [2] Mishali, M., Eldar, Y.C., Dounaevsky, O. and Shoshan, E., Xampling: analog to digital at sub-nyquist rates. *IET Circuits Devices & Systems*, 5(1), pp. 8-20, 2011. DOI:10.1049/iet-cds.2010.0147.
- [3] Baraniuk, R.G., Compressive sensing. *IEEE Signal Processing Magazine*, 24(4): pp. 118-121, 2007.
- [4] Astaiza, E., Bermudez, H.F. and Campo, W.Y., Efficient wideband spectrum sensing based on compressive sensing and multiband signal covariance. *IEEE Latin America Transactions*, 15(3), pp. 393-399, 2017. DOI: 10.1109/TLA.2017.7867167.
- [5] IEEE P802.22b/D5, April 2015. IEEE Draft standard for information technology-telecommunications and information exchange between systems wireless regional area networks (WRAN)-Specific requirements Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands Amendment: Enhancement for Broadband Services and Monitoring Applications, pp. 1-312, may 2015.
- [6] Cohen, D., Akiva, A., Avraham, B. and Eldar, Y.C., Centralized cooperative spectrum sensing from sub-nyquist samples for cognitive radios. *IEEE*, pp. 7486-7491. 2015. DOI: 10.1109/ICC.2015.7249523.
- [7] Assra, A., Yang, J. and Champagne, B., An EM Approach for cooperative spectrum sensing in multiantenna CR networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(3), pp. 1229-1243. DOI: 10.1109/TVT.2015.2408369.
- [8] Sun, H., Nallanathan, A., Cui, S. and Wang, C.-X., Cooperative wideband spectrum sensing over fading channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(3), pp. 1382-1394, 2016. DOI: 10.1109/TVT.2015.2407700.
- [9] Qin, Z., Gao, Y., Plumbley, M.D. and Parini, C.G., Wideband spectrum sensing on real-time signals at sub-nyquist sampling rates in single and cooperative multiple nodes. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 64(12), pp. 3106-3117, 2016. DOI: 10.1109/TSP.2015.2512562.
- [10] Cai, J.-F., Candés, E.J. and Shen, Z., A singular value thresholding algorithm for matrix completion. *SIAM Journal on Optimization*, 20(4), pp. 1956-1982, 2010. DOI: 10.1137/080738970.
- [11] Guo, Q. and Huang, D., EM-Based joint channel estimation and detection for frequency selective channels using gaussian message passing. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 59(8), pp. 4030-4035, 2011. DOI: 10.1109/TSP.2011.2153201.
- [12] Recht, B., A simpler approach to matrix completion. *The Journal of Machine Learning Research*, 12, pp. 3413-3430, 2011.
- [13] Gnedenko, B.V. and Kolmogorov, A.N., Limit distributions for sums of independent random variables. Reading, Mass, Addison-Wesley, 1954.

**E. Astaiza-Hoyos**, es MSc. en Ingeniería, área de Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia (2008), Ing. en Electrónica de la Universidad del Cauca, Colombia (1998). Actualmente candidato a Dr. en ciencias de la Electrónica. Profesor asociado en la Universidad del Quindío, Colombia, programa de Ingeniería Electrónica, Investigador del grupo de Investigación en Telecomunicaciones de la Universidad del Quindío – GITUQ. Áreas de interés: Comunicaciones inalámbricas, sensado de espectro.  
ORCID: 0000-0003-2706-0962.

**H.F. Bermúdez-Orozco**, es MSc. en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Colombia (2010), Ing. en Electrónica de la Universidad del Cauca, Colombia (2000). Actualmente candidato a Dr. en Ingeniería Telemática. Profesor asociado en la Universidad del Quindío, Colombia, programa de Ingeniería Electrónica, Coordinador del grupo de Investigación en Telecomunicaciones de la Universidad del Quindío – GITUQ. Áreas de interés: Comunicaciones inalámbricas, sistemas radiantes y propagación, modelado de tráfico de servicios telemáticos.  
ORCID: 0000-0002-8101-3764

**W.Y. Campo-Muñoz**, es Ph.D. en Ingeniería Telemática de la Universidad del Cauca, Colombia, (2014), MSc. en Ingeniería, Área Telemática, Universidad del Cauca (2009), Ing. en Electrónica de la Universidad del Cauca, Colombia, (1998). Profesor asistente en la Universidad del Quindío, Colombia, programa de Ingeniería Electrónica, Investigador del grupo de Investigación en Telecomunicaciones de la Universidad del Quindío – GITUQ. Áreas de interés: Telemática, IPTV, modelado de tráfico de servicios telemáticos y comunicaciones inalámbricas.  
ORCID: 0000-0001-8585-706X



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería  
Eléctrica e Ingeniería de Control

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica

Mayor información:

E-mail: [ingelcontrol\\_med@unal.edu.co](mailto:ingelcontrol_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 52 64