

Radio Systems Intelligence Overlay Type: Analysis of Interference Mitigation Techniques

Héctor Poveda, PhD.¹, Fernando Merchan, PhD.¹, and Jouvett García, BEng.¹

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, hector.poveda@utp.ac.pa, fernando.merchan@utp.ac.pa, jovett.garcia@utp.ac.pa

Abstract– Radio intelligence is a novel approach in wireless communication systems it arises to solve the current saturation of the spectrum. There are three access schemes for intelligence radius: interweave, underlay and overlay. The overlay scheme may allow higher transmission speeds and bandwidth through the application of mitigation techniques or management interference. Through these techniques the quality and efficiency of transmission is guaranteed. This paper presents a study and analysis of these techniques that may be implemented in future wireless communication systems. The characteristics of some of the most common techniques to mitigate interference in the overlay schemes for radio intelligence systems are analyzed.

The simulation results are presented in terms of bit error for overlay systems using pre-coding techniques and spatial filtering show the good performance of these techniques in wireless communication systems.

Keywords— dynamic spectrum access, interference, overlay, radio intelligence.

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.190>

ISBN: 13 978-0-9822896-8-6

ISSN: 2414-6668

13th LACCEI Annual International Conference: “Engineering Education Facing the Grand Challenges, What Are We Doing?”
July 29-31, 2015, Santo Domingo, Dominican Republic

ISBN: 13 978-0-9822896-8-6

ISSN: 2414-6668

DOI: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.190>

Sistemas de Radio Inteligencia de Tipo Overlay: Análisis de Técnicas de Mitigación de Interferencia

Héctor Poveda, PhD, Fernando Merchan, PhD and Jouvett García, BEng
Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá,
{hector.poveda, fernando.merchan, jouvett.garcia}@utp.ac.pa

Resumen— La radio inteligencia es un novedoso enfoque en los sistemas de comunicación inalámbrica que surge para solucionar la saturación actual del espectro. Existen tres esquemas de acceso para la radio inteligencia: interweave, underlay y overlay. El esquema overlay puede permitir mayores velocidades de transmisión y ancho de banda mediante la aplicación de técnicas de mitigación o manejo de interferencias. A través de estas técnicas se garantiza la calidad y eficiencia en las transmisiones.

Este trabajo presenta un estudio y un análisis de estas técnicas que podrán ser implementadas en los futuros sistemas de comunicaciones inalámbricos. Se analizan las características de algunas de las técnicas más comunes de mitigación de interferencia en los esquemas overlay para sistemas de radio inteligencia.

Los resultados de simulación que se presentan en términos de error de bit para sistemas overlay que utilizan técnicas de precodificación y filtrado espacial muestran el buen desempeño de estas técnicas en los sistemas de comunicación inalámbricos.

*Palabras Claves—*acceso dinámico al espectro, interferencia, overlay, radio inteligencia.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha dado un crecimiento sin precedentes en las telecomunicaciones, el cual ha sido motivado en gran medida por los avances en telefonía celular, internet de banda ancha y servicios multimedia. Este crecimiento ha traído como consecuencia que el espectro de frecuencias disponible se agote rápidamente, en especial las bandas entre 3 MHz y 3 GHz, las cuales son las más favorables para los sistemas inalámbricos. Como paliativo a esta situación, se han desarrollado un sinnúmero de nuevos esquemas para transmitir y recibir información. Sin embargo, ya es necesario adoptar una nueva tecnología que tenga la capacidad de autoadaptarse a su entorno y que aproveche el espectro de manera más eficiente.

En este sentido, surgen los sistemas de radio inteligencia (RI). El concepto de RI fue concebido por Joseph Mitola III en su tesis doctoral de 1999. En la misma se define a la RI como “un sistema de comunicación que emplea modelos basados en el razonamiento para lograr un determinado nivel de competencia en los ámbitos relacionados con la radio” [1].

A diferencia de los sistemas convencionales, los sistemas de RI realizan un acceso dinámico al espectro (ADE), de esta

manera flexibilizan el uso del mismo. Este ADE puede permitir que usuarios no propietarios de una banda de frecuencia (usuarios secundarios) transmitan en las mismas bandas de frecuencia que los usuarios propietarios (usuarios primarios), para lo cual se tienen que cumplir con ciertas condiciones de interferencia y se debe garantizar la calidad de servicio de los usuarios primarios [2].

Los modelos actuales de regulación del espectro no permiten la figura de los usuarios secundarios. Es por esto que ya se han planteado nuevos modelos de regulación de ADE, entre los cuales destacan el modelo dinámico de uso exclusivo, el modelo de compartición abierta y el modelo de acceso dinámico jerárquico [3]. El modelo de acceso jerárquico propone tres esquemas que son utilizados por sistemas de RI: interweave, underlay y overlay [4].

En el esquema interweave los usuarios secundarios perciben el medio ambiente para detectar la presencia de usuarios primarios, y transmiten de forma oportuna en los instantes en que los usuarios primarios están en silencio. El esquema underlay permite la transmisión continua por parte de los usuarios secundarios, siempre y cuando la perturbación creada en los sistemas primarios esté por debajo de un umbral predefinido, de manera que los usuarios primarios traten a las señales de los usuarios secundarios como ruido. El esquema overlay permite la transmisión simultánea de los usuarios primarios y secundarios en las mismas bandas de frecuencia y a niveles comparables de potencia. Esto se puede lograr mediante la combinación de procedimientos de comunicación cooperativa y técnicas de manejo de interferencias.

Debido a que el esquema overlay es el único que permite a usuarios primarios y secundarios transmitir continuamente y con niveles de potencia comparables, se podrían lograr mejores tasas de transmisión para los usuarios secundarios [2]. Para que los usuarios secundarios no afecten los mensajes de los usuarios primarios es necesario aplicar técnicas de mitigación de interferencias, las cuales deben ser tomadas en cuenta durante el diseño de las redes, para su aplicación en los transmisores y/o receptores.

Debido al interesante potencial arriba descrito que tienen los sistemas de RI de tipo overlay, el presente trabajo brinda al lector una visión general de los sistemas de RI y muestra cómo se realiza la gestión de interferencias para los usuarios primarios de sistemas de RI overlay. Se presenta un estudio y

un análisis de estas técnicas que serán implementadas en los futuros sistemas de comunicaciones inalámbricos. Se hace un énfasis principal en dos técnicas de mitigación de interferencias que se presentan como factibles para un sistema de comunicación inalámbrico: el método de precodificación de Vandermonde y la técnica de filtrado espacial.

El presente trabajo está organizado de la siguiente manera: la sección II abarca las técnicas de mitigación de interferencia en los sistemas de RI de tipo overlay con OFDM. En la sección III se explica el método de precodificación de Vandermonde, y en la sección IV la técnica de filtrado espacial. En la sección V se exponen los resultados de las simulaciones. Por último, se presentan el trabajo futuro y las conclusiones en la sección VI y VII, respectivamente.

II. TÉCNICAS DE MITIGACIÓN DE INTERFERENCIA PARA EL ESQUEMA OVERLAY

Los sistemas de RI overlay pueden mantener una comunicación continua y simultánea entre los usuarios primarios y secundarios a niveles comparables de potencia. Por lo tanto, el esquema overlay se perfila como el más viable para la implementación exitosa de sistemas de RI. Este esquema se puede combinar con una modulación ortogonal por multiplexación de frecuencias (OFDM), por las ventajas ya conocidas que presenta esta técnica de modulación.

Para aplicar las técnicas de mitigación de interferencias en los receptores de los usuarios primarios se deben realizar modificaciones físicas en los sistemas actuales [5]. Por consiguiente, es necesario que los usuarios primarios estén dispuestos a realizar estos cambios y que los usuarios secundarios asuman los costos asociados, para considerarse como una opción atractiva. En cambio, si se aplica las técnicas de mitigación en los transmisores secundarios, los sistemas actuales podrían mantenerse inalterados. Es por esta razón que la última alternativa se perfila como la más viable.

Cuando se habla de mitigación de interferencia en los transmisores, lo que se busca realmente es evitar que se originen las interferencias. En el caso de mitigación de interferencia en los receptores, lo que se busca es suprimir o cancelar la interferencia presente en las señales recibidas.

Existen muchas técnicas de mitigación que se han propuesto y aplicado a sistemas inalámbricos para contrarrestar varios tipos de interferencia. Los métodos de precodificación y el filtrado espacial (conocido también como *beamforming*) resaltan como métodos efectivos y aplicables para mitigar las interferencias que los transmisores secundarios causan a las redes de los usuarios primarios. El filtrado espacial además de prevenir la interferencia causada a la red primaria, aprovecha la diversidad o la ganancia de multiplexación del sistema de RI de múltiples antenas para

mejorar su fiabilidad y eficiencia.

En algunos casos en el esquema overlay, el conocimiento causal o no causal del mensaje primario, así como su libro de códigos, pueden utilizarse para cancelar o atenuar la interferencia vista en el receptor primario y los receptores de RI [6]. En los casos en que la condición anterior es posible, la mitigación de interferencia se lleva a cabo mediante canales de RI con cooperación asimétrica [7]. Esto es, los nodos o puntos intermedios de la red de RI tienen los libros de códigos de los usuarios primarios y el transmisor secundario conoce el mensaje primario. Los transmisores secundarios pueden utilizar el conocimiento de los mensajes primarios para mitigar la interferencia causada en los receptores primarios y cooperar con las transmisiones de los usuarios primarios.

El conocimiento del estado del canal por parte del transmisor permite mejorar sustancialmente el desempeño general de los sistemas. Un gran número de técnicas que sólo utilizan información parcial o del canal en el transmisor se han presentado en [8]. En [9], la técnica de precodificación lineal *dirty-paper coding* con conocimiento no causal del mensaje primario en el receptor secundario se utiliza para cancelar por completo la interferencia en el sistema de RI. En [10], el conocimiento no causal del mensaje primario se utiliza para asignar parte de la potencia de transmisión del usuario secundario la retransmisión del mensaje primario.

Existen otras técnicas de mitigación de interferencia que están siendo implementadas exitosamente en esquemas overlay. Algunas de estas técnicas son: filtros Wiener, técnicas basadas en el dominio de transformadas como Wavelet y Chirplet, y esquemas estadísticos de orden superior.

A continuación se presentan dos técnicas para mitigar la interferencia que los usuarios secundarios le causan a los usuarios primarios en sistemas de RI overlay. Hacemos principal énfasis en estas técnicas ya que las mismas presentan características que hacen muy factible su potencial implementación en los sistemas de comunicación inalámbrica.

III. PRECODIFICACIÓN DE VANDERMONDE

El primer método de mitigación de interferencia que se presenta es el precodificador de Vandermonde. La precodificación es una técnica de procesamiento de señales empleada comúnmente con el fin de cancelar la interferencia producida por señales no deseadas. Esta técnica requiere del conocimiento del canal en el transmisor mediante la estimación del canal en el receptor, y su posterior realimentación hacia el transmisor [11].

Las matrices de Vandermonde tienen un rol central en el procesamiento de señales y son empleadas muchas veces

junto a transformadas de Fourier y transformadas de Hadamard [12].

En [15] se implementa un sistema de RI tipo overlay que utiliza modulación OFDM con N subportadoras. El sistema cuenta con un usuario primario y un usuario secundario. El transmisor secundario desconoce el mensaje y el libro de códigos del usuario primario. Se utiliza un precodificador de Vandermonde en el transmisor del usuario secundario, el cual cancela la interferencia causada al usuario primario. Los canales son selectivos en frecuencia de tipo Rayleigh, por lo que se utiliza un prefijo cíclico de tamaño L . Se supone que los coeficientes de las respuestas al impulso de los canales son complejos y corresponden a un ruido blanco aditivo Gaussiano (AWGN) con media 0 *i.i.d* $\sim w(0, \sigma_j / L + 1)$. Ver fig. 1.

El canal entre el transmisor y receptor primario es h_{11} , mientras que entre el transmisor y receptor secundario es h_{22} . Se supone que cada usuario conoce o estima perfectamente el canal entre su transmisor y receptor. El canal entre el transmisor secundario y receptor primario es h_{21} , y se supone que el transmisor secundario estima perfectamente este canal. El canal entre el transmisor primario y el receptor secundario es h_{12} .

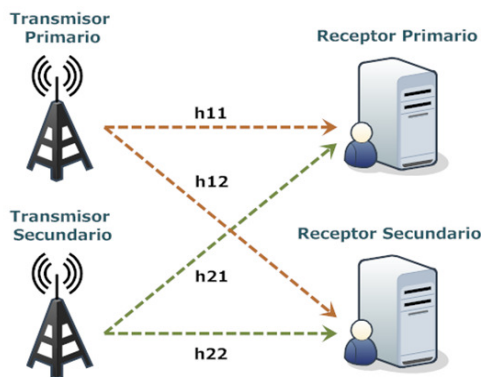


Fig. 1: Sistema de RI con un usuario primario y secundario

Las señales recibidas en los receptores primario y secundario se expresan a continuación:

$$\begin{aligned} y_1 &= \mathcal{F}(T(h_{11})x_1 + T(h_{21})x_2 + n_1) \\ y_2 &= \mathcal{F}(T(h_{22})x_2 + T(h_{12})x_1 + n_2) \end{aligned} \quad (1)$$

Donde $T(h_j)$ es una matriz Toeplitz del vector h_j , \mathcal{F} es la matriz FFT, x_k denota al vector de tamaño $N + L$ transmitido por el usuario k y n es la componente de ruido AWGN. El precodificador lineal de Vandermonde que se muestra en (2) es una matriz que corresponde a las raíces $\{a_1, \dots, a_L\}$ del polinomio $S(z) = \sum_{i=0}^L h_i^{(21)} z^{L-i}$ con

$L + 1$ coeficientes del canal h_{21} [13]. Este precodificador es utilizado solamente para el mensaje del usuario secundario.

$$V = \begin{bmatrix} 1 & \vdots & 1 \\ a_1 & \cdots & a_L \\ a_1^2 & \cdots & a_L^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_1^{N+L-1} & \cdots & a_L^{N+L-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Debido a la ortogonalidad entre el canal h_{21} y su precodificador, la condición de no interferencias siempre se mantiene para el receptor del usuario primario, independientemente de la potencia del transmisor del usuario secundario. De esta forma se convierte un canal selectivo en frecuencia a un canal Gaussiano con interferencia, en donde el receptor primario ve N canales paralelos libres de interferencia, pero el receptor secundario sí es afectado por la interferencia del mensaje primario.

IV. FILTRADO ESPACIAL

El segundo método de mitigación de interferencia a presentar es el filtrado espacial. La práctica común de utilizar múltiples antenas, ya sea en el transmisor o en el receptor del enlace inalámbrico, permite la cancelación de interferencias, un aumento de la diversidad y la mejora en la ganancia de array del sistema de a través de la combinación coherente [14]. La diversidad se traduce en una mejora de la fiabilidad del enlace debido a la disminución del desvanecimiento, y por el aumento de la robustez a la interferencia co-canal. Esta ganancia de diversidad se obtiene mediante la transmisión de las señales a través de múltiples dimensiones con desvanecimiento independiente en el tiempo, frecuencia y espacio.

De manera general, el filtrado espacial o beamforming es un método de combinación de diferentes muestras espaciales de una señal. Estas muestras provienen de varias antenas individuales o arreglos de antenas, por lo que este método puede ser aplicado en los sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO).

Un sistema de filtrado espacial puede ser considerado como un procesador de señales que combina diferentes muestras espaciales de una señal, y que puede ser usado tanto en la transmisión y la recepción. Asimismo, con el filtrado espacial se logra aislar a una señal específica de la interferencia que le causan otras señales. De esta manera se puede separar las fuentes con contenido de frecuencia superpuesto que se originan en diferentes localizaciones geográficas [15].

En el filtrado espacial, la amplitud y la fase de cada elemento de antena se pueden ajustar para dirigir la señal hacia la dirección deseada y minimizar la interferencia en otras direcciones.

En los sistemas de RI con múltiples antenas, el filtrado espacial está diseñado para maximizar la razón señal a interferencia (SIR) del usuario secundario, que se define como la razón entre la potencia de la señal recibida en un receptor secundario y la interferencia total creada en todos los receptores primarios. Así se reduce al mínimo la interferencia total causada a todos los receptores primarios [16].

En [17, 18] se utiliza la técnica de filtrado espacial en una red que consiste en múltiples usuarios primarios y secundarios transmitiendo simultáneamente en las mismas frecuencias.

En [19] se propone un nuevo esquema de filtrado espacial MIMO en el que no se le causa interferencia al usuario primario y al mismo tiempo se le provee la mayor ganancia de canal posible al usuario secundario. En la fig. 2 se muestra el diagrama del sistema propuesto.

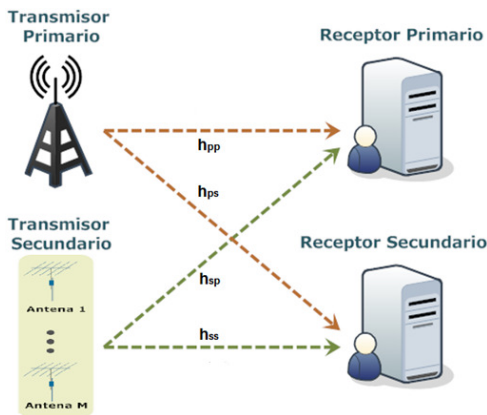


Fig. 2: Modelo del sistema propuesto de RI con filtrado espacial

El canal entre el transmisor y receptor primario es h_{pp} , y entre el transmisor primario y receptor secundario es h_{ps} . Se supone que la estación base del usuario secundario conoce perfectamente los canales entre ella y los receptores primario y secundario, representados por h_{sp} y h_{ss} , respectivamente. Las señales recibidas (sin tomar en consideración el ruido AWGN) en los receptores primario y secundario son y_p y y_s , respectivamente. Las mismas están descritas por:

$$\begin{bmatrix} y_p \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{pp} & h_{sp} \\ h_{ps} & h_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_p \\ w_s d_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{pp} d_p & h_{sp} w_s d_s \\ h_{ps} d_p & h_{ss} w_s d_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

En donde d_p y d_s son las señales transmitidas por el

usuarios primario y secundario, respectivamente. Para el usuario secundario, $h_{sp} = [h_{sp,1} \ h_{sp,2} \ \dots \ h_{sp,M}]$ y $h_{ss} = [h_{ss,1} \ h_{ss,2} \ \dots \ h_{ss,M}]$ son las respuestas del canal para los enlaces correspondientes, y el vector que contiene los pesos o coeficientes para la estación base es $w_s = [w_{s,1} \ w_{s,2} \ \dots \ w_{s,M}]^T$. El vector w_s debe satisfacer la condición

$$h_{sp} w_s = 0 \quad \forall L \quad (4)$$

Donde L es el número de trayectos debido a la selectividad en frecuencia del canal. El coeficiente $w_{s,1}$ se selecciona de tal forma que

$$w_{s,1} = -\frac{1}{h_{sp,1}} \sum_{m=2}^M h_{sp,m} w_{s,m} \quad (5)$$

Además, para poder maximizar la ganancia del canal del usuario secundario, w_s se deben determinar conforme a:

$$w_s = \arg \max_{x \in X} |h_{ss} x| \quad (6)$$

Donde x es un conjunto de vectores que satisfacen (4). La complejidad de implementación del filtrado espacial es moderada, y el factor de supresión es alto si existen suficientes antenas [20]. Debido a las características mencionadas, el filtrado espacial es un candidato prometedor para los sistemas de RI en esquemas overlay.

La siguiente sección muestra los resultados de simulación de las técnicas de mitigación de interferencia presentadas en este documento.

V. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En esta sección analizamos el desempeño de error en términos de razón de error de bit (BER) para los usuarios primarios en un sistema que utiliza el precodificador de Vandermonde, y otro que utiliza el filtrado espacial.

En el caso de la modulación de Vandermonde utilizamos una modulación BPSK y se supone un canal de seis trayectos ($L=6$). No se utiliza una modulación OFDM ya que no se puede combinar de manera simple la modulación OFDM y el precodificador de Vandermonde.

En el caso del filtrado espacial se utilizan 64 subportadoras OFDM, 64 elementos para la transformada de Fourier, CP de tamaño 16 y modulación BPSK. Se considera un transmisor de dos antenas y un canal de transmisión de seis trayectos ($M=2$ y $L=6$).

En ambos casos se supone que el canal es estimado perfectamente y se considera un ruido AWGN de varianza

unitaria

En la fig. 3 se muestran las curvas del desempeño de error obtenidas para ambos sistemas. Los resultados de las simulaciones presentadas comprueban el funcionamiento de las técnicas de mitigación de interferencia propuestas.

Como se aprecia, ambos sistemas tanto el precodificador de

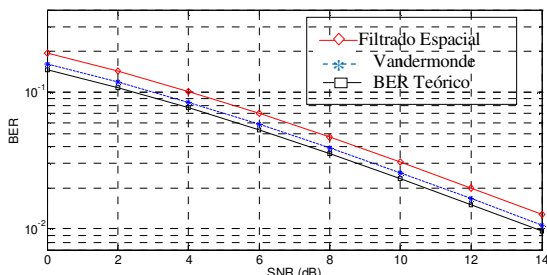


Fig. 3: Curvas de BER para los sistemas propuestos.

Vandermonde como el filtrado espacial mitigan de la interferencia causada por el usuario secundario al usuario primario. Sin embargo, ambos presentan una ligera degradación en su desempeño. Por un lado, en el caso del precodificador de Vandermonde la degradación es en alrededor de 1 dB para diferentes valores de BER. Por otro lado, utilizando filtrado espacial la degradación es alrededor de 2 dB para diferentes valores de BER.

Un transmisor que utiliza un precodificador de Vandermonde puede mitigar de una manera más eficiente la interferencia que un transmisor que utiliza filtrado espacial. Además, en un transmisor con filtrado espacial el costo del hardware es mayor debido a la necesidad de la utilización de múltiples antenas y cadenas de radiofrecuencia. Sin embargo, al no poder combinar una modulación OFDM con un precodificador de Vandermonde se limita de manera significativa la tasa de transmisión del sistema.

VI. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La inclusión de sistemas de RI junto a sistemas de radio convencionales se perfila como una importante tecnología que permitirá a usuarios secundarios aprovechar al máximo los recursos libres o subutilizados actualmente por parte de los usuarios primarios.

En este trabajo se pudo evaluar el funcionamiento de dos sistemas de RI overlay con técnicas de mitigación de interferencia para usuarios primarios. En el primer caso se estudió un sistema con una etapa de precodificación de Vandermonde, y en el segundo se incluyó una etapa de filtrado espacial. En ambos casos los resultados fueron satisfactorios y demuestran que estas técnicas pueden ser empleadas en los sistemas para mitigar efectivamente la interferencia que le causan los usuarios secundarios a los usuarios primarios.

Estos esquemas podrían ser considerados en algún estándar en el futuro. Sin embargo, un aspecto importante que debe cumplirse para que esto ocurra, es que además de garantizar la calidad de servicio de los usuarios primarios, los usuarios secundarios deben poder realizar comunicaciones fiables. Por esta razón, en un futuro se propone el estudio de técnicas que permitan garantizar la calidad de servicio al sistema de RI.

REFERENCIAS

- [1] J. Mitola, "Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications," in *Mobile Multimedia Communications*, 1999 on. IEEE, 1999, pp. 3–10.
- [2] M. Song, C. Xin, Y. Zhao, and X. Cheng, "Dynamic spectrum access: from cognitive radio to network radio," *Wireless Communications, IEEE*, vol. 19, no. 1, pp. 23–29, 2012.
- [3] N. Zurutuza, "Cognitive radio, fundamental performance analysis for interweave opportunistic access model," EE359 Project, Stanford University, 2012.
- [4] R. Blasco-Serrano, J. Lv, R. Thobaben, E. Jorswieck, and M. Skoglund, "Multiantenna transmission for underlay and overlay cognitive radio with explicit message-learning phase," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2013, no. 1, p. 195, 2013.
- [5] H. Poveda, G. Ferre, and E. Grivel, "Robust frequency synchronization for an OFDMA uplink system disturbed by a cognitive radio system interference," in *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2011 IEEE International Conference on*. IEEE, 2011, pp. 3552–3555.
- [6] L. Li, F. A. Khan, M. Pesavento, and T. Ratnarajah, "Power allocation and beamforming in overlay cognitive radio systems," in *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd*. IEEE, 2011, pp. 1–5.
- [7] A. M. Wyglinski, M. Nekovee, and T. Hou, *Cognitive radio communications and networks: principles and practice*. Academic Press, 2009.
- [8] M. Trivellato, S. Tomasin, and N. Benvenuto, "Channel quantization and feedback optimization in multiuser MIMO-OFDM downlink systems," in *Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM*. IEEE, 2008, pp. 1–5.
- [9] N. Devroye, P. Mitran, and V. Tarokh, "Achievable rates in cognitive radio channels," *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 52, no. 5, pp. 1813–1827, 2006.
- [10] A. Jovicic and P. Viswanath, "Cognitive radio: An information-theoretic perspective," *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 55, no. 9, pp. 3945–3958, 2009.
- [11] G. García Blázquez, "Técnicas de precodificación lineal para coordinación de celdas en sistemas MIMO," 2010.
- [12] R. C. Qiu, Z. Hu, H. Li, and M. C. Wicks, *Cognitive Radio Communication and Networking: Principles and Practice*. John Wiley & Sons, 2012.
- [13] L. S. Cardoso, M. Kobayashi, O. Ryan, and M. Debbah, "Vandermonde frequency division multiplexing for cognitive radio," in *Signal Processing Advances in Wireless Communications, 2008. SPAWC 2008. IEEE 9th Workshop on*. IEEE, 2008, pp. 421–425.
- [14] H. Bolcskei, "Mimo-ofdm wireless systems: basics, perspectives, and challenges," *Wireless Communications, IEEE*, vol. 13, no. 4, pp. 31–37, 2006.
- [15] M. Brandstein and D. Ward, *Microphone arrays: signal processing techniques and applications*. Springer, 2001.
- [16] S. Yiu, M. Vu, and V. Tarokh, "Interference reduction by beamforming in cognitive networks," in *Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008*, pp. 1–6.
- [17] L. Zhang, Y.-C. Liang, Y. Xin, and H. V. Poor, "Robust cognitive beamforming with partial channel state information," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 8, pp. 4143–4153, 2009.

- [18] G. Zheng, S. Ma, K.-K. Wong, and T.-S. Ng, "Robust beamforming in cognitive radio," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 9, no. 2, pp. 570–576, 2010.
- [19] J. Kim, S. Kim, O.-S. Shin, and Y. Shin, "A cognitive beamforming scheme for coexistence of incumbent and cognitive radios," in *Consumer Communications and Networking Conference, 2009. CCNC 2009. 6th IEEE. IEEE, 2009*, pp. 1–4.
- [20] O. Sunuwar, "A study of distributed beamforming in cognitive radio networks," 2013.