

Revisión del potencial de antenas reconfigurables en frecuencia para sistemas de radio cognitiva

Review of the Potential of Frequency Reconfigurable Antennas for Cognitive Radio Systems

Jhon Jairo Saboyá Romero, Sergio Nicolás Chaparro Vega, Miguel Ángel Saavedra Melo*

Resumen

En este artículo se presentan brevemente los antecedentes del estudio de los sistemas de radio cognitiva (CR, por sus siglas en inglés) así como del uso de antenas reconfigurables para este tipo de sistemas, en particular las antenas eléctricamente reconfigurables en frecuencia y los métodos de reconfiguración más utilizados resaltando sus ventajas y desventajas. Adicionalmente, se presentan y describen algunas herramientas de *hardware* y software como lo son las SDR (Software Defined Radio) y GNU Radio, los cuales tienen una creciente popularidad en el ámbito de la investigación; aplicado a la evaluación del desempeño de estas antenas, dado que al ser de bajo costo y reconfigurables permiten tener una fácil implementación de diferentes esquemas de comunicaciones en donde pueden variarse desde software los parámetros del sistema.

Palabras clave:

Radio cognitiva (CR), optimización del espectro, antena reconfigurable, antena eléctricamente reconfigurable, SDR, GNU Radio.

Abstract

This article briefly presents the background of the study of cognitive radio systems (RC), as well as the use of reconfigurable antennas for this type of system, in particular the electrically frequency reconfigurable antennas and the most used reconfiguration methods highlighting their advantages and disadvantages. In addition, some *hardware* and software tools such as SDR (Software Defined Radio) and GNU Radio are presented and described, which have a growing popularity in the field of research applied to the evaluation of the performance of these antennas, given that being low cost and reconfigurable they allow an easy implementation of different communication schemes where the parameters of the system can vary from the software.

Keywords:

Cognitive radio (CR), spectrum optimization, reconfigurable antenna, electrically reconfigurable antenna, SDR, GNU Radio.

* Fecha de recibido: 26/10/2020 Fecha de aceptación: 23/12/2020

Correo electrónico: 67162513@unitec.edu.co, 67161515@unitec.edu.co, miguelasaavedra@unitec.edu.co

Citar como: Saboyá Romero, J. J., Chaparro Vega, S. N., & Saavedra Melo, M. A. (2020). Revisión del potencial de antenas reconfigurables en frecuencia para sistemas de radio cognitiva. *Revista RETO*, 8.

Introducción

El crecimiento exponencial de los servicios de comunicaciones inalámbricas ha generado una alta tasa de transmisión de datos en una variedad de servicios que incluye, entre otros, llamadas de audio/video de alta calidad, transmisiones de video en línea en directo, videoconferencias y juegos en línea. Dichos servicios utilizan el espectro en bandas fijas atendiendo a diferentes estándares establecidos, lo que ha generado un uso dinámico pero ineficiente de recursos altamente subutilizados; ello ocurre ya que la ocupación entre las varias aplicaciones inalámbricas no está adecuadamente distribuida: algunas partes están usadas en exceso, mientras otras raramente son empleadas, lo cual ha conducido a un problema de uso desbalanceado (Tawk, Costantine, & Christodoulou, 2014a). Así pues, es evidente la necesidad de lograr un sistema inalámbrico inteligente que consiga una utilización eficaz del espectro disponible, reconociendo y adaptándose apropiadamente al comportamiento espectral de su entorno. Para lograrlo se debe hacer frente a grandes desafíos en distintos niveles, incluyendo la búsqueda de las técnicas más apropiadas para elegir la mejor opción entre un grupo de bandas de frecuencias a través del aprendizaje de experiencias previas; la elección o la creación de un protocolo que permita la correcta comunicación entre dispositivos; o la obtención de las antenas adecuadas (para observar el espectro o para establecer el canal de comunicaciones), lo cual es uno de los mayores retos.

Metodología

La presente revisión sistemática de literatura tiene un enfoque cualitativo y descriptivo acerca del estado del arte de antenas reconfigurables en frecuencia para radio cognitiva. Se decide realizar una búsqueda de antecedentes en el cual se utiliza principalmente el portal IEEE Xplore, portal dedicado a recopilar publicaciones por parte de la IEEE, y usado para encontrar investigaciones de vanguardia y confiables eligiendo palabras clave en el motor de búsqueda tales como: cognitive radio, reconfigurable antenna, SDR y software defined radio; se repite este ejercicio en otras plataformas como Google Academic para complementar la información buscada. Enten-

diendo las dificultades para la construcción de antenas, se decide hacer énfasis en la búsqueda de antenas eléctricamente reconfigurables en frecuencia construidas con diodos PIN (comparativamente más sencillas de fabricar). Teniendo en cuenta los textos encontrados se empiezan a estructurar detalles relacionados con la historia de la radio cognitiva, y también se validan la razón y motivaciones de su desarrollo para después entender cómo se desempeñan en un sistema de radio cognitiva. A partir de las conclusiones presentadas en los artículos se comprueban las intenciones, dificultades y logros obtenidos. Finalmente, se buscan herramientas de *hardware* y software capaces de permitir la validación del desempeño de las antenas al lograr reproducir escenarios reales de comunicación inalámbrica en los cuales se pueda realizar reconfiguración del frente de radio en tiempo real, y que además sean económicas, de fácil uso y asequibles.

Sistemas de radio cognitiva

Un sistema de radio cognitiva (CR) presenta una solución potencial para los sistemas de comunicaciones inalámbricas del futuro, ya que permite mejorar el uso del espectro al interactuar con el entorno operante, haciéndolo eficiente y, más importante aún, minimizando el problema del espectro saturado (Tawk, Costantine, & Christodoulou, 2014a). Este sistema tiene la habilidad de ser consciente del uso del espectro (identificando alguna parte que no esté ocupada) y, además, posee la capacidad de conmutar para operar entre diferentes bandas de frecuencia desocupadas, logrando un modelo óptimo de comunicaciones al asignar los canales apropiados para ser usados (Mitola, 2009). La interfaz de un sistema CR consiste en dos tipos de antenas: una antena de observación (típicamente de Ultra Wide-Band (UWB)) y una antena de comunicaciones (típicamente reconfigurable). La función de la antena de observación es la de identificar bandas libres en todo el espectro de interés, mientras la antena de comunicaciones cambia dinámicamente su frecuencia de operación para establecer canales de comunicación en dichas bandas y así utilizar eficientemente el ancho de banda disponible (Hussain & Sharawi, 2014). La capacidad de la Radio Cognitiva (CR) permite

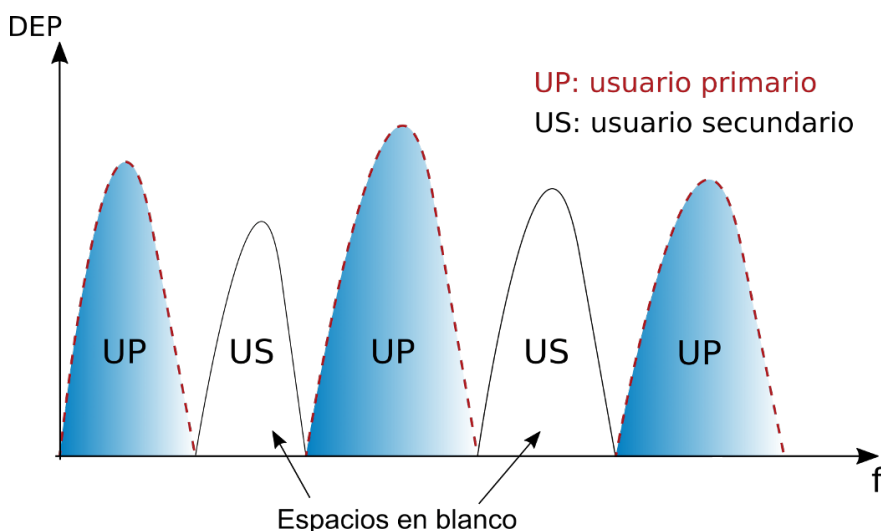
que una radio coexista con otras tomando decisiones de mitigación de interferencias. Cada radio decide repetidamente su frecuencia, forma de onda, dirección de la antena, patrón de salto, etc. Estas decisiones dependen en la situación actual del espectro, como el número y ubicación de dispositivos presentes y el canal de propagación entre cada dispositivo. (Omotere, Fuller & Qian, 2018).

En un sistema CR se deben identificar dos tipos de usuarios: primarios y secundarios. Los usuarios primarios ya están asignados en partes específicas del canal y tienen derecho al libre acceso a este en algún tiempo dado; sin embargo, no están activos todo el tiempo y no necesariamente ocupan todo el canal, por lo que el sistema puede alojar a los usuarios secundarios, a los cuales se les permitirá usar partes del canal que no están ocupadas por los usuarios primarios o partes en las que sean tolerados por estos (dependiendo el nivel de interferencia que generen). Es decir, en un sistema CR los usuarios secundarios son dinámicamente asignados para ocupar partes específicas del espectro, dependiendo de la actividad de los usuarios primarios (Jayaweera & Christodoulou, 2011; Tawk, Jayaweera, Christodoulou, & Costantine, 2011).

Un sistema CR puede operar en dos modos di-

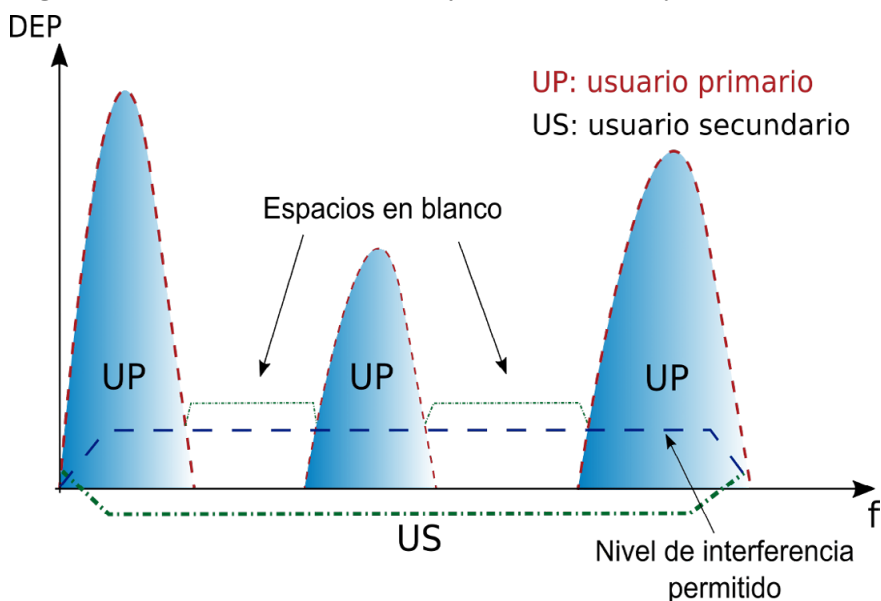
ferentes, como se muestran en las figuras 1 y 2: modos *interweave* y *underlay*.

Figura 1. Modo de operación entretejido (*interweave*)



Fuente: Tawk, Costantine, & Christodoulou (2014a).

Figura 2. Modo de operación subyacente (*underlay*)



Fuente: Tawk, Costantine, & Christodoulou (2014a).

En el primer caso, los usuarios primarios no comparten su canal con usuarios secundarios, así que la función principal del sistema consiste en encontrar espacios del espectro que no estén ocupados (espacios en blanco) y, en función de esto, decidir qué espacio de los encontrados será asignado al usuario secundario que lo solicite, el cual podrá utilizarlo sin ninguna restricción de potencia. En el segundo caso, los usuarios primarios pueden compartir canal con algún o algunos usuarios secundarios, pero hay restricciones de potencia

para los usuarios secundarios que compartan canal y, además, si algún usuario primario no tolera compartir su canal, los usuarios secundarios son forzados a transmitir en todas las bandas excepto en las que se ubican dichos usuarios primarios (Cai, Guo, & Bird, 2012; Mansour, Hall, Gardner, & Rahim, 2012).

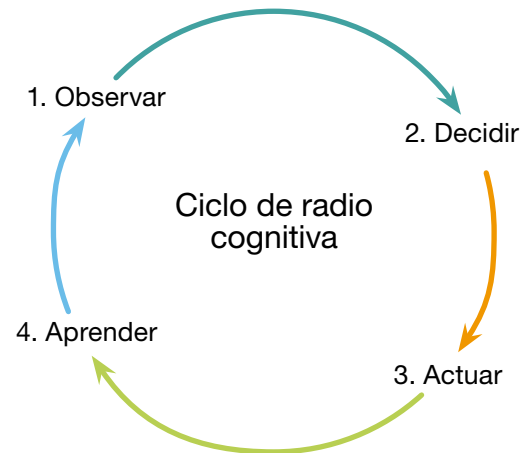
Para ambos escenarios se sigue un ciclo básico de cuatro etapas: observación, decisión, acción y aprendizaje, como se muestra en la figura 3. La observación consiste en revisar la actividad de la banda de interés: en el modo *interweave* se puede hacer observación de banda ancha (se registra toda la banda al mismo tiempo) o angosta (se hace un barrido consecutivo en secciones de la banda), y en el modo *underlay* solo se hace observación de banda ultra ancha. En la decisión se utilizan los datos adquiridos en la etapa previa para determinar los espacios en blanco o clasificar a los usuarios presentes en función de su tolerancia a los niveles de interferencia (dependiendo del modo de operación), para escoger la parte del espectro que será asignada al usuario secundario que la solicitó. En la etapa de acción se realiza la adecuación (reconfiguración) del sistema, dependiendo de la decisión tomada para que la transmisión en el canal escogido se pueda realizar. Finalmente, en la etapa de aprendizaje, se generan registros acerca de la actividad del canal para ser tenidos en cuenta posteriormente y así predecir resultados futuros (Jayaweera & Christodoulou, 2011).

El motor CR (*spectrum manager*) es considerado el cerebro del sistema y es el responsable de “manejar” e integrar esas cuatro etapas, procesando todos los algoritmos que incluyen la detección, el análisis y la clasificación, la reconfiguración de *hardware*, el manejo de niveles de potencia (según el caso) y el aprendizaje (Tawk, Costantine, Avery, & Christodoulou, 2011; Tawk, Costantine, & Christodoulou, 2014b).

Recientemente incluso ya se está hablando de la interacción de la Radio Cognitiva con otros tipos de tecnología de vanguardia. Está demostrando que con la propuesta de aprendizaje profundo los modelos son capaces de predecir el tipo, forma y número de usuarios presentes en una banda de frecuencia cuando la convivencia es complicada, escenarios que los sistemas de ingeniería con-

vencional no pueden manejar (Omotere, Fuller & Qian, 2018). Por otro lado, para un sistema OFDM cognitivo, la banda ancha licenciada se resuelve en una serie de subportadoras contiguas, donde la tarea de la detección de espectro de banda ancha es categorizar las subportadoras en un conjunto de subportadoras ocupadas de PU y un conjunto de carencias inactivas, mediante prueba de subportadora individual o multiportadora. (Qing, Chen, Ali & Shen, 2019).

Figura 3. Ciclo cerrado de un sistema CR



Fuente: Tawk, Costantine, & Christodoulou (2014a).

Antenas reconfigurables

La primera referencia en la literatura acerca de antenas reconfigurables fue publicada por Schaubert (1983), y paulatinamente se han empezado a estudiar su potencial uso en una variedad de aplicaciones entre las que se encuentran sistemas Multiple In - Multiple Out (MIMO), aplicaciones satelitales y, por supuesto, los sistemas de radio cognitiva.

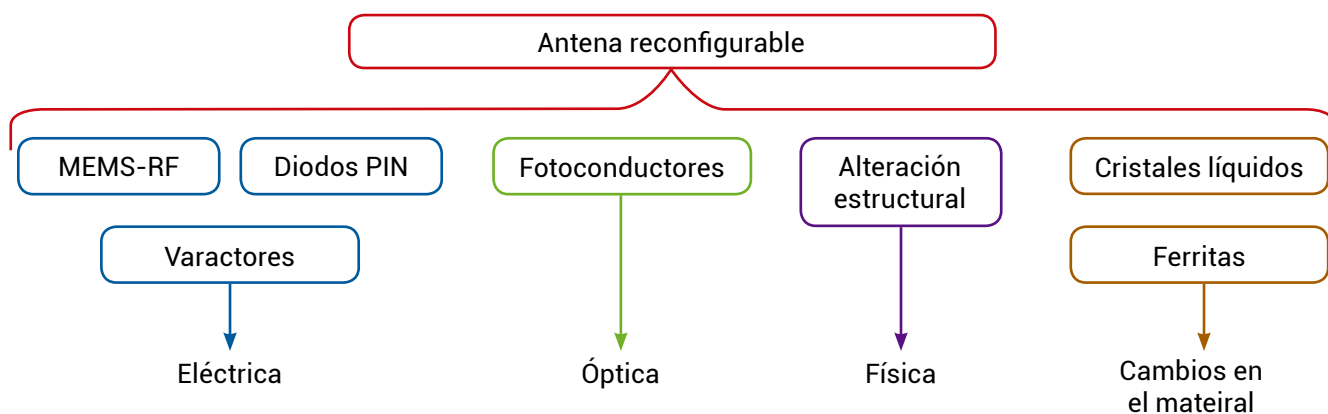
Al hablar de la reconfiguración de una antena se puede hacer referencia a cambios en su frecuencia de operación, su polarización o incluso a sus características de radiación. Existen varias ventajas al usar antenas reconfigurables: la posibilidad de soportar varios estándares para comunicaciones inalámbricas, el excelente desempeño en sistemas SDR (*Software Defined Radio*) y su *multifuncionalidad* (operar en banda angosta o ancha, operar como elemento único o como

parte de un arreglo, etc.). Por su parte, los principales costos al utilizar este tipo de antenas están relacionados con el incremento en la complejidad de su estructura y en el consumo de potencia, al incorporar elementos activos para lograr la reconfiguración deseada; asimismo, la generación de armónicos y la necesidad de una sintonización más rápida en la antena para que el sistema

funcione adecuadamente (Christodoulou, Tawk, Lane, & Erwin, 2012).

Para lograr los cambios en la antena que la hacen reconfigurable se pueden utilizar varias técnicas. Las principales son la eléctrica, la óptica, la física y el uso de materiales inteligentes, como se observa en la figura 4.

Figura 4. Principales técnicas de reconfiguración de antenas



Fuente: Christodoulou, Tawk, Lane, & Erwin (2012).

En términos generales, cualquiera de las técnicas conduce a modificar las corrientes que fluyen a través de la antena y, de esta manera, modifican también los campos electromagnéticos que esta genera para así poder adaptarse a los cambios en las condiciones de su entorno o a los requerimientos de su sistema (Christodoulou, Tawk, Lane, & Erwin, 2012). Sin importar la técnica escogida, cuando se procede a diseñar la antena reconfigurable siempre existirán tres preguntas principales que se deben responder:

1. ¿Qué característica de la antena debe ser modificada (su patrón de radiación, su frecuencia de operación, su polarización)?
2. ¿Cómo se pueden reconfigurar los elementos radiantes de la antena para lograr la modificación de la característica requerida?
3. ¿Cuál es la técnica de reconfiguración que menos afecta las características de radiación o de impedancia de la antena?

Así pues, la elección de la mejor alternativa para el diseño de las antenas dependerá de la

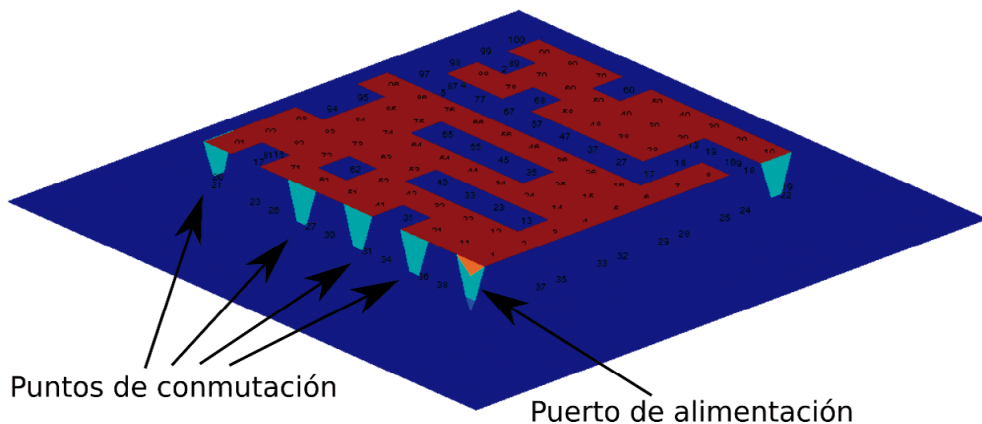
respuesta a estas preguntas (y de otras consideraciones técnicas y económicas). Para la reconfiguración en frecuencia de antenas compactas para su uso en un sistema CR, que es la aplicación objeto de interés en este artículo, la mejor opción es la reconfiguración eléctrica.

Antenas eléctricamente reconfigurables

La reconfiguración en este tipo de antenas depende de componentes electrónicos como diodos PIN, varactores, RF-MEMS (Radio Frequency Microelectromechanical System) y otros tipos de interruptores que se encargan de redistribuir las corrientes superficiales de la estructura. Esta es una de las alternativas más fáciles de implementar para reconfigurar antenas, a pesar de los problemas asociados como la interferencia, las pérdidas de señal, los efectos indeseados de las líneas de transmisión para controlar los interruptores y la no linealidad de los interruptores (Christodoulou, Tawk, Lane, & Erwin, 2012).

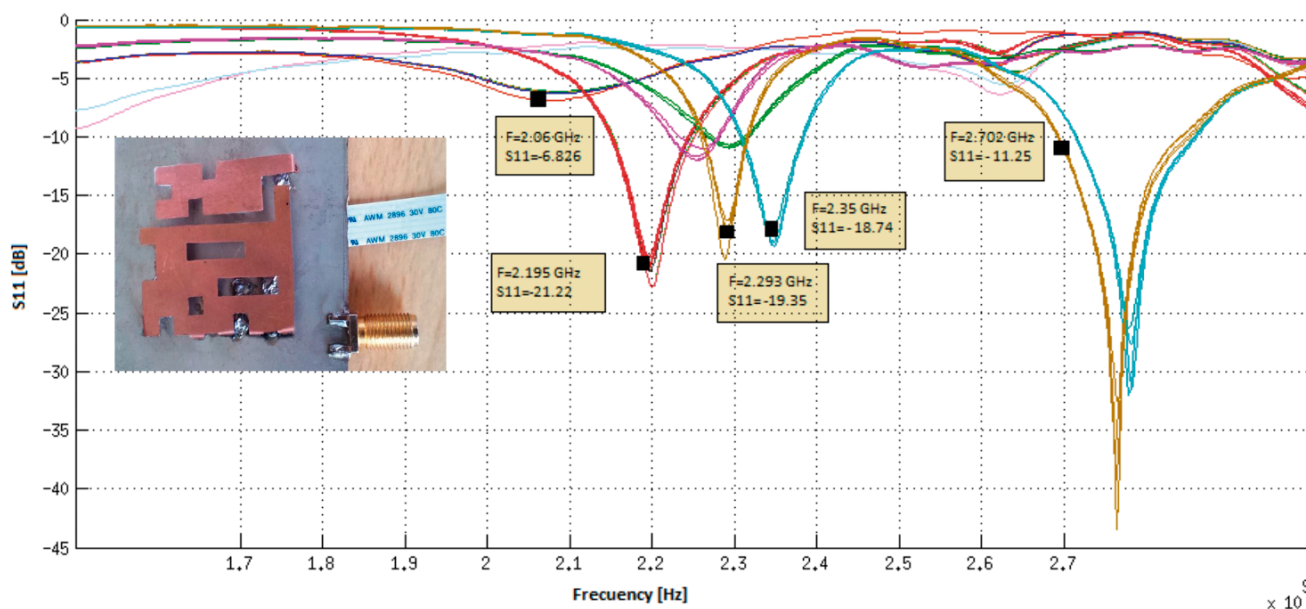
Un ejemplo de este tipo de antena se presenta en Rodríguez, Saavedra, Ramírez y Araque (2014). En este trabajo se describen el diseño, la fabricación y la validación experimental de una antena compacta reconfigurable en frecuencia usando diodos PIN como interruptores: la antena se reconfigura en la banda de 1.7 a 2.7 GHz y para su diseño se utilizaron técnicas de optimización evolutiva. En las figuras 5 y 6 se presentan el diseño final obtenido y el comportamiento medido de la antena, que demuestra la validación del concepto que integra la metodología del diseño, la optimización y la fabricación.

Figura 5. Geometría final de radiador



Fuente: Rodríguez, Saavedra, Ramírez, & Araque (2014).

Figura 6. Parámetro de reflexión medido en la antena



Fuente: Rodríguez, Saavedra, Ramírez, & Araque (2014).

Antecedentes sobre antenas eléctricamente reconfigurables

Dado que el diseño de antenas para aplicaciones de CR es un tema de gran interés en la implementación de este tipo de sistemas, el énfasis se ha centrado en el diseño de una antena de comunicaciones reconfigurable, utilizando interruptores de microondas con una antena de detección UWB en la banda de interés; no obstante, continúan siendo extensos los esfuerzos pendientes relacionados con la obtención de sistemas con antenas más compactas, integradas, en los que ambas puedan reconfigurarse, y que cuenten con una cantidad significativa de estados.

Los estudios de Cai, Guo y Bird (2012) y Mansour, Hall, Gardner y Rahim (2012), por ejemplo, muestran antenas reconfigurables de comunicaciones, pero no las antenas de detección; en los de Tawk y Christodoulou (2009) y Tawk, Costantine, Avery y Christodoulou (2011) se presentan antenas reconfigurables de comunicación embebidas en las de detección, sin embargo, no son suficientemente compactas y los estados reconfigurables son escasos. Por su parte, Tawk, Costantine y Christodoulou (2014b) presentan antenas MIMO para los dos modos de operación de CR, aunque de nuevo con antena de detección de banda ancha en modo *interweave* y con una antena de comunicación embebida en la de detección (que es de nueva cuenta UWB) en modo *underlay*, las cuales, al ser MIMO, adquieren un gran tamaño (70*80 mm).

Construir las dos antenas eléctricamente reconfigurables en frecuencia permite corregir en tiempo real errores de transmisión y recepción de la información y, además, logra una significativa reducción del tamaño, el peso y el volumen finales del sistema, lo que se traduce en una disminución de costos de fabricación y en una adaptabilidad a mayor número de aplicaciones. Además, el modo *interweave* permite una administración adecuada del espectro sin la necesidad de hacer análisis de protocolo para respetar las especificaciones particulares de cada sistema de comunicación primario encontrado en la banda; ello ya que no siempre es necesario, como se puede leer por ejemplo en Pedraza, Forero y Páez (2014), donde se justifica el despliegue de tecnologías como los sistemas CR en

algunas zonas urbanas como la de Bogotá; así se demuestra que dentro del rango de frecuencias de 54 MHz a 6 GHz el espectro está altamente subutilizado por parte de los usuarios primarios y también que existen vastos espacios en blanco en el mismo rango. Por todo lo anterior, es viable la propuesta de diseñar y fabricar antenas eléctricamente reconfigurables en frecuencia, integradas (esto es, que el elemento radiante sea común a ambas antenas), con un tamaño comparativamente pequeño y con una cantidad importante de estados reconfigurables (estimados en seis, los cuales dependerán del tamaño de la antena) y evaluar su desempeño en un sistema CR en modo *interweave*.

Por otro lado, también se están desarrollando antenas reconfigurables con la intención de ampliar el rango de frecuencias aceptadas y observadas, esto puede verse en la antena reconfigurable diseñada por Cleetus. R y Bala. G (2019), trabajando en la banda de UWB entre las frecuencias de 3.14 GHz a 10.6 GHz, la antena reconfigurable aquí propuesta trabaja con seis interruptores que funcionan con diodos PIN conectados a la alimentación y que permiten reemplazar una configuración preliminar propuesta que trabaja en UWB y recibe todo el rango disponible, las seis configuraciones conmutan por tanto en una serie de bandas estrechas dividiendo el rango de UWB anteriormente mencionado. Aunque este caso se limita a un diseño y análisis por medio de un simulador, es posible concluir y ver su compatibilidad con CR.

Finalmente, están diseños como el propuesto por Zhao. X, Riaz. S y Geng. S (2019) el cual fue construido y evaluado para verificar su desempeño, en este caso se logró un sistema MIMO de UWB, la estructura de la antena contiene dos elementos, la antena monopolar impresa de forma triangular plana que trabaja en conjunto con un varactor y con diodos PIN, de esta manera logra cubrir un espectro de 1GHz a 4.5GHz y tiene un amplio rango de reconocimiento del espectro entre 0.9GHz a 2.6GHz usando el ajuste del diodo varactor. Además, se logró tener un sistema de tamaño compacto midiendo tan solo 27 x 56mm², dando como conclusión un sistema eficiente, con pocas pérdidas, compacto y funcional, este es el primer prototipo del sistema, pero se puede decir que luce prometedor.

Herramientas de hardware y software para validación de antenas

El paso final después del diseño, simulación y fabricación de antenas es la evaluación de su desempeño a través de la medición de sus parámetros electromagnéticos. Para lograr esto existen varias alternativas como contar con un analizador de espectros, un analizador vectorial de redes (VNA) e incluso herramientas más sofisticadas como una cámara anecoica (incluyendo analizador). Sin embargo, estas alternativas suponen una inversión importante de dinero que en ocasiones no está al alcance, así que una alternativa para verificar indirectamente el desempeño de las antenas puede ser a través del uso de equipos de bajo costo y de software libre como lo son los SDR y GNU Radio.

Respecto a la herramienta de software, GNU Radio es un programa informático gratuito y de código abierto el cual trabaja con bloques para el procesamiento de señales para la implementación de esquemas de radio por medio de software, es compatible con varios tipos de *hardware* externo de RF para transmisión y recepción, o sin *hardware*, en escenarios de simulación, por lo que es ampliamente utilizado por la academia a nivel mundial para apoyar investigaciones que tengan relación con comunicaciones principalmente inalámbricas, según informa su fabricante en la página web. Este software cuenta con bloques predefinidos para demoduladores, decodificadores, filtros, modelos de canal, elementos de sincronización, ecualizadores entre muchos otros tipos de bloques de procesamiento de señales. Además, esta herramienta también administra el flujo de información entre los bloques con ayuda de un método de conexión que tiene en cuenta el tipo y tamaño de los datos, e igualmente se pueden programar e incluir fácilmente bloques personalizados si son necesarios que se pueden escribir en lenguaje de programación Python. Los bloques de procesamiento de señales son realizados en C++, pero Python es usado como lenguaje de scripts para interconectarlos y generar así el diagrama de flujo. El generador de interfaz SWIG (Simplified Wrapper and Interface Generator) se utiliza como el compilador de in-

terfaz que permite la integración entre lenguaje C++ y Python (GNURadio, 2020:Online).

Por otro lado, respecto a los dispositivos SDR, estos son tarjetas de desarrollo que hacen parte de un paradigma de diseño para comunicaciones inalámbricas. Este concepto fue ideado por Joseph Mitola en 1992, quien precisó la expresión para una variedad de radios que ejecutan el procesamiento de señales en el software sin utilizar circuitos integrados dedicados en el *hardware* (Arslan, 2017). En otras palabras, un SDR puede ser reprogramado y reconfigurado haciendo uso de herramientas de software para permitir así que el mismo *hardware* sea utilizado en la implementación de gran variedad de radios para diferentes estándares de comunicación, permitiendo con esto el uso del SDR para gran cantidad de aplicaciones. El modelo de SDR ideal presentado por Mitola incluye una antena y un convertidor digital analógico (ADC) en la recepción, y un convertidor analógico digital (DAC) y otra antena en la transmisión, dejando el mando de las demás funciones a los procesadores reprogramables, que se encargan de implementar los filtros, mezcladores, demodulador y demás elementos necesarios (Mitola, 2009).

Así pues, dado que los recursos mencionados anteriormente tienen la particularidad de ser de fácil acceso y manejo, y sobre todo útiles para el estudio de las antenas y la transmisión/recepción de las señales, observando de manera gráfica o numérica el comportamiento del sistema, se convierten, junto con un equipo de cómputo de gama media, en una alternativa valiosa para la etapa de validación de las antenas.

Conclusiones y futuro de la reconfiguración de antenas para radio cognitiva

Es indiscutible el creciente interés en la investigación de sistemas CR debido al enorme potencial que ofrecen en la solución de problemas de comunicaciones inalámbricas; relacionados con la congestión en los canales y la administración inadecuada del espectro. Parte fundamental de estos sistemas es la reconfiguración de sus ante-

nas para la adaptación a su entorno, aspecto en el cual, a pesar de presentar algunas desventajas.

La opción de utilizar interruptores de microondas como elementos de conmutación es la de mayor acogida debido a la facilidad en la implementación que estos ofrecen, además de tener una relativa facilidad en la obtención y accesibilidad de los materiales y una construcción más orgánica el cual es posible de realizar en el laboratorio de la Universidad.

Asimismo, el desarrollo de herramientas como GNU Radio y los SDR han facilitado e incentivado este tipo de investigaciones, dando pie a un desarrollo constante y un estudio e implementación cada vez más accesible a este tipo de sistemas ya que reducen significativamente los costos asociados a los equipos de alta gama, al tiempo que permiten estimar indirectamente el desempeño del sistema completo y de las antenas en particular con la ejecución de esquemas de comunicaciones de muchos tipos en los cuales puedan manipularse parámetros como la frecuencia de operación, ancho de banda, tipo de modulación, operaciones de filtrado, etc., y se puedan también establecer algunas métricas de desempeño del sistema relacionadas con calidad del servicio como BER, retardos e incluso comportamiento de ruido. ●

Agradecimientos

Deseamos mostrar nuestra gratitud a la Corporación Universitaria Unitec por el apoyo presentado al semillero de investigación EmSyT, por su constante acompañamiento y ayuda en la realización del presente artículo de investigación.

Referencias

Autores, Varios: gnruradio. url: <https://www.gnuradio.org/about/>. 2020. – Accedido 01-07-2020

Arsilan, H., (2017), *Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems (Signals and Communication Technology)*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag. – ISBN 1402055412

Cai, Y., Guo, Y. J., & Bird, T. (2012). A frequency reconfigurable printed yagiuda dipole antenna for cognitive radio applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60(6), 2905-2912.

Christodoulou, C., Tawk, Y., Lane, S., & Erwin, S. (2012, Jul). Reconfigurable antennas for wireless and space applications. *Proceedings of the IEEE*, 100(7), 2250-2261.

Cleetus, R. & Bala, G. (2019). Design and Analysis of a Frequency Reconfigurable Antenna for Ultra-wide band and Cognitive Radio Applica-

tions. *2019 International Conference on Signal Processing and Communication (ICSPEC)*, INDIA: IEEE Xplore 2019, pp 1-4.

Easterbrook, S., Singer, J., Storey, M.-A., & Damian, D. (2008). Selecting empirical methods for software engineering research. En Shull, F., Singer, J. & Sjøberg, D.I.K. (Eds.), *Guide to advanced empirical software engineering* (pp. 285-311). Londres: Springer.

Hussain, R. & Sharawi, M. S. (2014). A cognitive radio reconfigurable MIMO and sensing antenna system. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, 257-260.

Jayaweera, S. K. & Christodoulou, C. G. (2011, Mar). *Radiobots: Architecture, algorithms and real-time reconfigurable antenna designs for autonomous, self-learning future cognitive radios*. The University of New Mexico, Technical Report EECE-TR-11-0001. Recuperado de http://digitalrepository.unm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1035&context=ece_rpts

Mansour, G., Hall, P. S., Gardner, P., & Rahim, M. K. A. (2012). Tunable slot-loaded patch antenna for cognitive radio. *Antennas and Propagation Conference (LAPC)*, Loughborough, pp. 1-4. DOI: 10.1109/LAPC.2012.6403069

Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC), República de Colombia. (2004). *Resolución 689 de 2004*. Bogotá, 21 de abril de 2004. Recuperado de https://www.redjurista.com/Documents/resolucion_689_de_2004_ministerio_de_comunicaciones.aspx#/

Mitola, J. (2009). Cognitive radio architecture evolution. *Proceedings of the IEEE*, 97(4), 626-641.

Omotere, O., Fuller, J. & Qian, L. (2018). Spectrum Occupancy Prediction in Coexisting Wireless Systems using Deep Learning. *IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. USA: IEEE Xplore 2018, pp 1-7.

Pedraza, L., Forero, F., & Páez, I. (2014, Jan). Evaluación de ocupación del espectro radioeléctrico en Bogotá-Colombia. *Ingeniería y Ciencia*, 10(20), 127-143.

Qing, H., Chen, S., Ali, M. & Shen, B. (2019). Signal Assemblage Based Wideband Spectrum Sensing for OFDM Cognitive Radios. *2019 21st International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*. China: IEEE Xplore 2019, pp. 1.

Rodríguez, D., Saavedra, M., Ramírez, G., & Araque, J. (2014). Realization of a compact reconfigurable antenna for mobile communications. *IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, pp. 284-287. DOI: 10.1109/APWC.2014.6905549

Schaubert, D. (1983, Jan). *Frequency-agile polarization diversity microstrip antennas and frequency scanned arrays*. U.S. Patent 4 367 474. The United States Of America representado por The Secretary Of The Army.

Tawk, Y., Costantine, J., Avery, K., & Christodoulou, C. (2011). Implementation of a cognitive radio front-end using rotatable controlled reconfigurable antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59(5), 1773-1778.

Tawk, Y., Costantine, J., & Christodoulou, C. (2014a, Feb). Cognitive-radio and antenna functionalities: A tutorial. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 56(1), 231-243.

Tawk, Y., Costantine, J., & Christodoulou, C. (2014b). Reconfigurable filtennas and mimo in cognitive radio applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(3), 1074-1084.

Tawk, Y., Jayaweera, S. K., Christodoulou, C. G., & Costantine, J. (2011, Dec). A Comparison between different cognitive radio antenna systems. *International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*, pp. 1-5.

Tawk, Y. & Christodoulou, C. (2009). A new reconfigurable antenna design for cognitive radio. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 8, 1378-1381.

Zhao, X., Riaz, S., & Geng, S. (2019). A Reconfigurable MIMO/UWB MIMO Antenna for Cognitive Radio Applications. National Nature Science Foundation of China (NSFC). *China: IEEE Access* 2019, pp. 1-9