

USO DE RADIO COGNITIVA PARA ASIGNACIÓN DINÁMICA DE ESPECTRO EN BANDAS NO LICENCIADAS

Víctor Hinostrero y Alejandro Barraza
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
Av. P. Elias Calles No.1210 Fovissste Chamizal
C.P. 32310 Ciudad Juárez, Chihuahua México.
Telefono: 52-656-6884800 ext. 4674, Fax: 52-656-6884841
vhinostr@uacj.mx , mbarraz@uacj.mx

RESUMEN

El crecimiento de la tecnología inalámbrica en los últimos años ha sido rápido y presenta retos importantes para el uso adecuado del espectro. Es bien conocido que el uso actual del espectro inalámbrico no es el más eficiente, por lo que se han planteado tecnologías que permitan usar de manera más eficiente este espectro. Los desarrollos en tecnologías de Radio por Software en los años noventa y en la primera década de este siglo, han permitido que la tecnología de Radio Cognitivo empiece a tomar fuerza en diversos ámbitos de los sistemas de comunicaciones inalámbricas. Este trabajo estudia la utilización de esta tecnología en la comunicación utilizando la técnica de asignación dinámica de espectro, analizando diversos escenarios que se pueden encontrar en las situaciones reales donde se usan frecuencias no licenciadas.

I. INTRODUCCIÓN.

En la actualidad, en la gran mayoría de países, las redes y aplicaciones inalámbricas están reguladas mediante una política de asignación de espectro fija: el espectro está regulado por el gobierno que administra y asigna la utilización de las diferentes bandas de frecuencia a distintas empresas, usuarios y/o servicios mediante autorización, permiso o licencia a largo plazo en amplias regiones geográficas. Cada país tiene un cuadro nacional de atribución de bandas de frecuencias, conforme lo acordado en las Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) dependiente de la ONU. El espectro es un recurso escaso donde cada vez es más difícil encontrar bandas libres para el despliegue de nuevos sistemas, especialmente en las bandas por debajo de los 3 GHz, particularmente

valiosas para los sistemas inalámbricos debido a sus favorables características de propagación.

Sin embargo, estudios recientes llevados a cabo por la FCC (Federal Communications Commission) en Estados Unidos, han demostrado que gran parte del espectro licenciado asignado está subutilizado, observándose grandes variaciones temporales y geográficas en su uso, con rangos de utilización desde el 15% al 85%[1]. Además, medidas recientes de utilización de espectro muestran que, mientras que ciertas partes son altamente utilizadas, otras permanecen prácticamente sin usar, incluso por debajo de los 3GHz. Desde esta perspectiva, que muestra la ineficiencia de las actuales políticas de asignación de espectro, diferentes organismos empezaron a considerar la necesidad de introducir reformas, no sólo para mejorar su utilización sino también para intentar proveer nuevo espectro disponible para nuevas aplicaciones. El principio básico para el diseño de estas nuevas redes es Radio Cognitiva (Cognitive Radio o CR). Según la FCC, un dispositivo de CR es un sistema de radiofrecuencia capaz de variar sus parámetros de transmisión basándose en su interacción con el entorno en el que opera [3].

Con el objetivo de aumentar la eficiencia en la utilización del espectro disponible, la FCC propuso la apertura de ciertas bandas asignadas a televisión para su uso por usuarios no licenciados, denominados usuarios secundarios, mediante técnicas de compartición del espectro basado en la oportunidad (OSS *Opportunistic Spectrum Sharing*). También en los Estados Unidos, la DARPA ha sido la primera organización en desarrollar nuevas tecnologías que permiten que múltiples sistemas de radiocomunicaciones compartan el mismo espectro mediante mecanismos adaptativos como el DSA (*Dynamic Spectrum Access*), dentro del programa *NeXt Generation Networks* (xG). El ejército de los Estados Unidos (US Army) también ha realizado investigaciones en

el mismo sentido, desarrollando técnicas ASE (*Adaptive Spectrum Exploitation*)[4].

El primer paso para la creación de un dispositivo CR es el desarrollo de técnicas que permitan la detección fiable de las partes inutilizadas del espectro, lo que se conoce como *Spectrum Sensing*. Así, un dispositivo CR debe escanear periódicamente su entorno de radiofrecuencia para detectar las partes del espectro que no están siendo utilizadas temporalmente por sus usuarios primarios. Estas bandas sin utilizar se denominan espacios en blanco o bandas blancas.

La Radio Cognitiva ha sido reconocida como la tecnología habilitadora para las redes DSA, donde los parámetros de operación de los dispositivos no licenciados pueden ser rápidamente reconfigurados de acuerdo a las condiciones cambiantes del ambiente de transmisión. Basados en la tecnología de Radio definido por Software SDR, los radios cognitivos son producto de un esfuerzo multidisciplinario que involucra expertos en redes inalámbricas, comunicaciones digitales, ingeniería de sistemas, inteligencia artificial y otras disciplinas. Como resultado de esas actividades, se espera que estos sistemas puedan simultáneamente respetar los derechos de los usuarios licenciados mientras proporciona mayor flexibilidad para acceder al espectro y por ende utilizarlo de manera más eficiente.

La radio cognitiva es una idea presentada por Joseph Mitola III en 1998 pensada como una plataforma para orientar el camino de la evolución de las comunicaciones inalámbricas, donde se tiene una “caja negra” que se adapta automáticamente a las necesidades del usuario y los recursos que presenta la red[1]. A partir de ahí esta idea ha sido abordada desde varios ángulos, uno de ellos es la utilización de los espacios inutilizados en el espectro asignado a las transmisiones de televisión. Para definir los métodos para llevar a cabo este proceso la IEEE ha creado un grupo de trabajo para desarrollar el estándar 802.22 el cual establece los estándares y protocolos de las capas físicas y de enlace de datos.

En un sistema de SR (*Software Radio*) la digitalización de la señal se realiza en la antena. Sin embargo, el estado actual de la tecnología hace que un sistema SR ideal no se pueda implementar. Por eso se considera que un SDR (*Software-Defined Radio*) es una versión de un SR implementable con la tecnología

disponible, donde la conversión se realiza en la etapa de Frecuencia Intermedia (IF). La estructura básica de un sistema SDR se compone de tres bloques o etapas, como se muestra en la figura 1. La etapa de RF se encarga de transmitir/recibir las señales de radiofrecuencia para, en el caso de recepción, adecuarlas y convertirlas a frecuencia intermedia o bien, en el caso de transmisión, amplificar y modular las señales de IF adecuándolas para su transmisión.

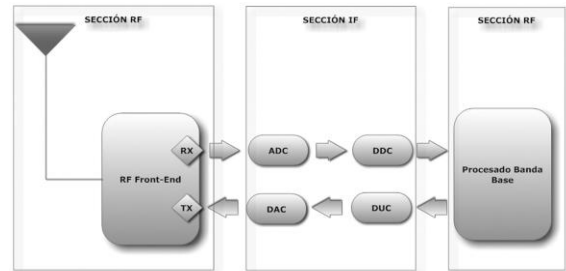


Figura 1. Estructura de un SDR

La combinación de software libre y hardware flexible generada por GNU Radio y el USRP permite a los ingenieros el diseño, desarrollo e implementación de múltiples sistemas de radiocomunicaciones a bajo costo.

En la actualidad, el SDR Forum (Software Defined Radio Forum), grupo independiente formado por la industria, científicos, ingenieros y organismos reguladores, es el encargado de dirigir el desarrollo de la tecnología SDR. Desde el punto de vista técnico, se considera que SDR es una buena alternativa para la integración y convergencia de tecnologías inalámbricas, pero su implementación comercial aun impone ciertos retos, sobre todo de tipo económico, por los costos de los equipos necesarios. Sin embargo, se espera que a corto plazo la tecnología evolucione lo suficiente, sobre todo en el campo de la microelectrónica, como para que los estándares puedan adoptarlo y crear así un verdadero soporte de capa física para la convergencia y la interoperabilidad, lo cual permite una evolución en los últimos años del concepto de SDR hacia un nivel superior como es *Cognitive Radio*.

II. MODELO DE CANAL

Se puede modelar una situación en la que existan M sistemas, cada uno formada por un par de receptor-transmisor y coexistentes en la misma área. Considere un canal con interferencia de M usuarios en tiempo discreto definido por

$$y_i[n] = \sum_{j=1}^M h_{j,i} x_j[n] + z_i[n]; i = 1, \dots, m \quad (1)$$

Donde x_i, y_i y z_i son variables Gaussianas y los procesos de ruido son i.i.d. sobre todo el tiempo con $z_i \sim CN(0, N_0)$. Asumiendo que el canal de cada transmisor a cada receptor tiene una sola derivación se define que se tiene desvanecimiento plano. La entrada del usuario i tiene la restricción de que la potencia promedio es de P_i . Se asume que cada sistema trata la interferencia como ruido. Esto conduce a un límite tratable de la capacidad de la interferencia en el canal. Además, tendrá limitaciones prácticas, tales como; la complejidad del decodificador, incertidumbre de la respuesta del canal, los límites impuestos por el retardo en el canal, etc., se puede evitar el uso de técnicas de cancelación de interferencias. Por lo tanto, el que asumamos el tratar la interferencia como ruido es realista en muchos casos. Finalmente, se asumirá que todos los sistemas utilizan códigos aleatorios Gaussianos, lo que significa que las señales transmitidas aparecerán como procesos de ruido blanco Gaussianos. Estudios recientes, demuestran que aun cuando se usan códigos no Gaussianos, los resultados se pueden extender a este escenario.

Bajo estas premisas, usando la expresión de capacidad para un canal Gaussiano de un solo usuario, podemos determinar la máxima capacidad que un sistema i puede alcanzar para potencias específicas:

$$R_i = \int_0^W \log \left(1 + \frac{c_{i,i} p_i(f)}{N_0 + \sum_{j \neq i} c_{j,i} p_j(f)} \right) df \quad (2)$$

Donde $p_i(f)$ es la densidad espectral de potencia de la señal de entrada del sistema i y donde por conveniencia definimos $c_{i,j} = |h_{i,j}|^2$. Observe que debido a restricciones de potencia $p_i(f)$ debe satisfacer:

$$\int_0^W p_i(f) df \leq P_i \quad (3)$$

El problema de espectro compartido que estamos considerando es para determinar un conjunto de potencias $\{p_i(f)\}$ para los sistemas M , que maximice una función de utilidad global dada mientras satisface los límites establecidos de potencia. Esta maximización resulta en asignaciones de potencia que son eficientes y justas en un escenario cooperativo. Enseguida se estudia la estructura de asignación óptima de potencia para cualquier opción razonable de utilidad global.

III. ASIGNACIONES ÓPTIMAS DE ESPECTRO.

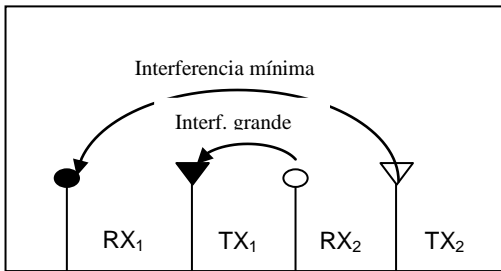
Muchos de los problemas de equidad en asignación de espectro provienen de la asimetría de los sistemas. En la figura 2 se muestran tres diferentes ejemplos donde dos sistemas operan en situaciones de asimetría. En (a) ambos sistemas tienen capacidades de potencia similares, pero debido a la localización de los transmisores y receptores, un sistema recibe mucha interferencia y el otro no. Los escenarios (b) y (c) describen situaciones en donde un sistema de alta potencia comparte espectro con un sistema de baja potencia. En (b) todas las ganancias son comparables, intuitivamente el sistema de menor potencia está en desventaja. En (c) debido a la asimetría en las ganancias ambos sistemas pueden interferir con el otro. Para concretar, se asignan parámetros específicos para cada escenario. Sin pérdida de generalidad se pueden asumir en todos los casos que $c_{1,1} = c_{2,2} = 1$, $N_0 = 1$ y $c_{2,1} = 0.5$. En el escenario (a) se selecciona $P_1 = P_2 = 10$, $c_{1,2} = 10$ y $c_{2,1} = 1$. Para escenario (b) se escoge $P_1 = 10$, $P_2 = 1$ y $c_{1,2} = c_{2,1} = 1.1$. Finalmente en escenario (c) se usa $P_1 = 10$, $P_2 = 1$ y $c_{1,2} = 0.5$ y $c_{2,1} = 10$.

$$R = \left\{ R: R_i = \int_0^W \log \left(1 + \frac{c_{i,i} p_i(f)}{N_0 + \sum_{j \neq i} c_{j,i} p_j(f)} \right) df \right.$$

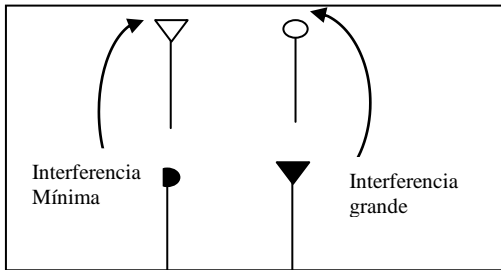
Y

$$\int_0^W p_i(f) df \leq P_i \text{ and } p_i(f) \geq 0 \text{ para } i = 1, \dots, M \quad (4)$$

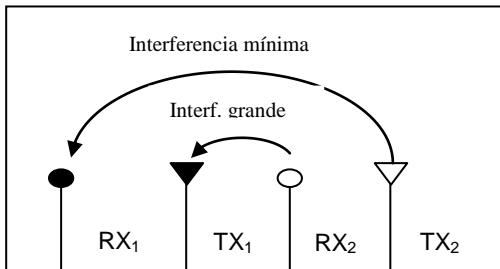
Imaginemos que en estos tres escenarios, queremos maximizar alguna función global de utilidad $U(R_1, R_2)$, que representa un objetivo de equidad. Estamos interesados en determinar el valor máximo de U y las correspondientes asignaciones de potencia del espectro que la alcanzan. Se asume que todos los parámetros son conocidos para todos los sistemas realizando la optimización. Se asume que el número de sistemas compartiendo el espectro se conocen entre sí. Algoritmos prácticos para la estimación e intercambio de parámetros están en las referencias. Sea R la velocidad alcanzable en la región:



Escenario (a) asimetría en ganancias



Escenario (b) asimetría en potencias



Escenario (c) asimetría en potencias y Ganancias.

Figura2. Ejemplos de asimetrías.

$$R^* = \left\{ (R_1, R_2, \dots, R_M) \in R : R_i \geq R_i \forall (R_1, \dots, R_{i-1}, R_{i+1}, \dots, R_M) \in R, \text{ para } i = 1, \dots, M \right\} \quad (5)$$

Donde $R = (R_1, R_2, \dots, R_M)$ y hagamos R^* el conjunto de pareto de puntos óptimos de R :

IV. ESCENARIOS NO COOPERATIVOS

En la pasada sección se ha asumido implícitamente que los M sistemas cooperan para obtener una función global maximizada asumiendo asignaciones de potencia apropiadas. La premisa anterior puede ser realista cuando los diferentes sistemas son diseñados conjuntamente con un fin común y son conformados con un estándar, regla o son pares de receptor-transmisor de un solo sistema global. Sin embargo, en un escenario de espectro compartido, donde las reglas pueden ser laxas y los sistemas pueden estar compitiendo unos con otros para ganar acceso a un medio compartido, asumir que va a haber un comportamiento egoísta es más realista. En esta sección se analiza como la falta de cooperación entre sistemas puede afectar el conjunto de velocidades de bit alcanzables.

Se considerará el mismo modelo introducido en la segunda sección, con la diferencia de que se asume que los sistemas se comportan egoístamente y racionalmente. La premisa de racionalidad significa que cada sistema nunca escogerá una estrategia dominante. Se analiza el conjunto de velocidades alcanzables en este escenario no-cooperativo usando teoría de juegos no cooperativa. Una vez que el conjunto de velocidades alcanzables es determinada, el punto de operación es escogido por el protocolo para alcanzar eficiencia y equidad. Se puede pensar de este protocolo como un estándar ampliamente conocido o como un conjunto de reglas impuestas por la autoridad. En ambos casos, los sistemas conocen el protocolo, el cual especifica como actuar en cualquier situación posible, pero se es libre de seguirlo o no. Sin embargo, cada sistema sabe que todos los demás sistemas siguen este protocolo.

La figura 3 muestra la pérdida de funcionalidad debida a la pérdida de cooperación cuando hay asimetría en las ganancias entre los sistemas. Se puede hacer un

análisis similar cuando la fuente de asimetría es la potencia de transmisión en lugar de la ganancia.

V. CONCLUSIONES:

Encontrar una asignación eficiente y equitativa de espectro requiere resolver un complejo problema de optimización. Se ha demostrado que bajo fuerte interferencia, la multi-canalización por división de frecuencia es óptima y el problema resultante de optimización es convexo. En el caso más general, se encontró que el problema tiene una dimensión finita y tiene una estructura no convexa. Encontrar algoritmos distribuidos eficientes que prueben que pueden converger a una solución óptima todavía permanece como un problema abierto.

En este trabajo, se ha asumido que se tiene un desvanecimiento plano. Un problema interesante para trabajos futuros sería extender este trabajo para un modelo general con un canal selectivo en frecuencia, la selección de métodos y castigos para hacerlo creíble requiere más estudio.

REFERENCIAS:

- [1] J. Mitola, "Cognitive Radio Architecture", Wiley-Interscience (2000).
- [2] M. Fitch, M. Nekovee, S. Kawade, K. Briggs, R. MacKenzie, "Wireless Service Provision in TV White Space with Cognitive Radio Technology: A Telecom Operator's Perspective and Experience" IEEE

Communications Magazine, Vol. 49, No 3, Marzo 2011.

- [3] S. Filin, H. Harada, H. Murakami, K. Ishizu, "International Standardization of Cognitive Radio Systems" IEEE Communications Magazine, Vol. 49, No 3, Marzo 2011.

[4] P. Pawelczak, K. Nolan, S. Wah Oh, D. Cabric, "Cognitive Radio: Ten Years of Experimentation and Development" IEEE Communications Magazine, Vol. 49, No 3, Marzo 2011.

[4] F. Berggren, B. Asp, C. Jönsson, P. Stenumgaard, N. Kviseluis, B. Thorngren, U. Landmark, J. Wessel, "Dynamic Spectrum Access, Phase 1: Scenarios and research challenges" Septiembre 2004.

[5] J. Aguilar, A. Navarro, "Radio Cognitiva: Estado del arte" Revista Sistemas y Telemática, Universidad ICESI, Vol. 9, No. 16, 2011.

[5] K. Twain, (2002). WiproSDRadio.pdf. En línea, en BroadcastPapers.com, <http://www.broadcastpapers.com/whitepapers/WiproSDRadio.pdf>

[6] J. Zhao, H. Zheng, y G. Yang, "Spectrum Sharing through Distributed Coordination in Dynamic Spectrum Access Networks." En: Wiley Wireless Communications and Mobile Computing Journal, Vol.7, No.9, November 2007. p1061-1075.

[7] <http://www.janes.com/articles/Janes-Military-Communications/AN-USC-61-Digital-Modular-Radio-DMR-United-States.html>

[8] <http://www.eda.europa.eu/genericitem.aspx?area=28&id=588>

[9] <http://gnuradio.org/redmine/wiki/gnuradio>

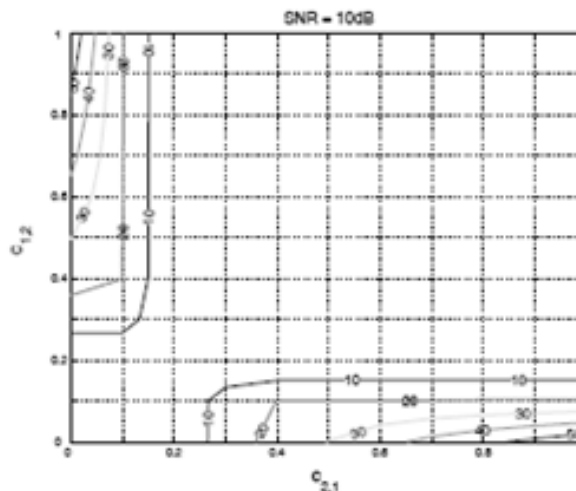


Figura 3. Pérdida de funcionalidad