

Detección de señales mediante formación de coaliciones en redes de radios cognitivos

Signals detection by coalitional formation
in cognitive radio networks

Ing. Luis M. Gato Díaz², Ing. Meiby Ortiz Bouza^{1*}, Dr.Sc. Jorge Torres Gómez³

Recibido: 11/2017 | Aceptado: 02/2018

PALABRAS CLAVE

Teoría de juegos
Sensado cooperativo
de espectro
Radio cognitivo

RESUMEN:

El creciente auge de las comunicaciones inalámbricas y en especial el potencial incremento de la velocidad de datos y de usuarios en la evolución hacia la quinta generación de las comunicaciones móviles, ha contribuido a un gran despliegue de nuevos servicios inalámbricos. Con lo cual es cada vez más creciente el total de usuarios haciendo uso de las comunicaciones inalámbricas. Por otra parte, debido al alto número de usuarios en la actualidad hay escasez de frecuencias libres para poder ofrecer más servicios. Basado en estas dos problemáticas surgen las redes de radios cognitivos como un paradigma para mitigar esta escasez espectral, así como hacer control del acceso al espectro radioeléctrico. En este trabajo se propone un modelo de cooperación para sensado cooperativo de espectro en redes de Radio Cognitivo basado en Teoría de Juegos, específicamente en juegos de formación de coaliciones. Se diseñó un escenario con Usuario Secundario (SU) móviles y un Usuario Primario (PU) fijo. Para la formación de coaliciones se diseñó un algoritmo basado en una solución metaheurística. Con este algoritmo se logró diseñar un escenario en el cual los SU alcanzan altos valores de probabilidad de detección. El algoritmo fue implementado en MatLab y se comprobó su funcionamiento con 10, 15 y 50 SU. Además, se implementó en C++ para incluirlos en la plataforma del software HEATS-RT, software para la vigilancia del espectro radioeléctrico diseñado en nuestro grupo de investigación.

KEYWORDS

Game theory
Cooperative
spectrum sensing
Cognitive radio

ABSTRACT

The imminent growth of data rate and amount of users on the evolution to the fifth generation of mobile communications has contributed to a high demand for the use of the spectrum. Cognitive radio networks have arisen as a novel paradigm to mitigate the spectral scarcity that has become evident in the last few years and for making control of radioelectric spectrum access. This work proposes a cooperation model for cooperative spectrum sensing in Cognitive Radio networks based on Game Theory,

^{1*}Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría". Cuba. mortiz@cemat.cujae.edu.cu,

²Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría". Cuba. luis.gd@tele.cujae.edu.cu

³Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría". Cuba. jorge.tg@tele.cujae.edu.cu

specifically in coalition formation games. A scenario was designed with mobile SUs and a fixed PU. For the formation of coalitions an algorithm based in a metaheuristic solution was designed. With this algorithm, it was possible to design a coalition formation scenario in which SUs reach high detection probability values. The algorithm was implemented in MatLab and its operation was verified. In addition, it was implemented in C++ to be included in the HEATS-RT software platform, software for the surveillance of the radioelectric spectrum designed in our research group.

Introducción

El crecimiento de los servicios inalámbricos y los móviles en los últimos años ha producido una alta demanda en la utilización del espectro radioeléctrico. Sin embargo, este es un recurso natural limitado y por tanto la eficiencia en su uso resulta de interés para las tecnologías de las comunicaciones. Recientes estudios muestran que la política de asignación del espectro vigente en la actualidad, hace una pobre utilización del mismo (Mehdawi, Riley, Ammar, Fañan y Zolfaghari, 2015), producto a que bandas de frecuencia asignadas a un Usuario Primario (PU), se mantienen desocupadas por un largo periodo de tiempo, mientras otras presentan una alta congestión. Estas bandas de frecuencia desocupadas en un periodo de tiempo y en localización geográfica dada, son llamadas huecos en el espectro (Haykin, 2005).

Con el objetivo de mitigar esta escasez espectral surge el Radio Cognitivo (CR) como un nuevo paradigma para las comunicaciones inalámbricas (Mitola y Maguire, 1999). El CR permite el acceso, por intermitentes periodos de tiempo, a las bandas de frecuencias desocupadas. Los usuarios de Radio Cognitivo o Usuarios Secundarios (SU) pueden compartir el espectro con los PU, en momentos en los que estos no la estén ocupando, con la condición de no interferir su comunicación. La tarea fundamental de los SU es detectar la presencia o no de los PU para identificar la disponibilidad del espectro. Por tanto, el componente clave de estos sistemas de Radio Cognitivo es el Sensado de Espectro (SS) que permite detectar la actividad del espectro radioeléctrico y así hacer uso de estos huecos.

El sensado de espectro está caracterizado generalmente por dos parámetros fundamentales: la probabilidad de detección P_d y la probabilidad de falsa alarma P_{fa} . La primera es la probabilidad de detectar que hay presencia de señal cuando efectivamente la hay, y la

segunda, es la probabilidad de detectar la presencia de una señal cuando en realidad el canal está desocupado. Sin embargo, el SS se ve frecuentemente afectado por los efectos de multitrayecto y pérdida de visibilidad directa entre el PU y el SU, afectando estos valores de probabilidad. Estudios recientes demuestran que con el Sensado Cooperativo de Espectro (CSS), varios usuarios cooperando en la detección de señales, se logra una mayor tasa de detección, aunque aumenta también la tasa de falsas alarmas. Se requiere entonces lograr un compromiso que mejore P_d la manteniendo P_{fa} una por debajo de un umbral tolerable (Akyildiz y Balakrishnan, 2011).

Uno de los aspectos del sensado cooperativo de espectro es la forma en que los usuarios se organizan para realizar el sensado. En la literatura científica se han reportado dos formas fundamentales (Akyildiz y Balakrishnan, 2011) la fusión paralela (Varshney, 1997) y los modelos basados en Teoría de Juegos (Han, 2012). En la fusión paralela estos usuarios realizan el sensado de espectro individualmente, toman una decisión local y la envían a una central de fusión (FC) en la cual se toma la decisión global. Mientras que, en los modelos basados en Teoría de Juegos, estos usuarios deciden si cooperan o no, y si cooperan con cuál de sus vecinos lo hará, aportándole cierta inteligencia al sistema y una mayor eficiencia.

En los modelos basados en Teoría de Juegos, el escenario de sensado del espectro de forma cooperativa es modelado como un juego en el cual los jugadores son los usuarios secundarios de una red de Radio Cognitivo. El comportamiento de estos jugadores con respecto a la cooperación va a depender del juego específico que se modele. Por ejemplo, en un juego formando coaliciones (Wang, Song, Han y Saad, 2014), los jugadores cooperan en forma de grupos llamados coaliciones, como se muestra en la figura 1. En cada coalición, el usuario que tenga menor probabilidad de

pérdida de la detección es seleccionado como cabecera del grupo y funciona como una central de fusión para el resto de los usuarios de la coalición. Sin embargo, en un juego evolutivo (Han, 2012) los jugadores son egoístas y tienen dos posibles estrategias: cooperar o no cooperar, en dependencia de los beneficios que su decisión les pueda aportar.

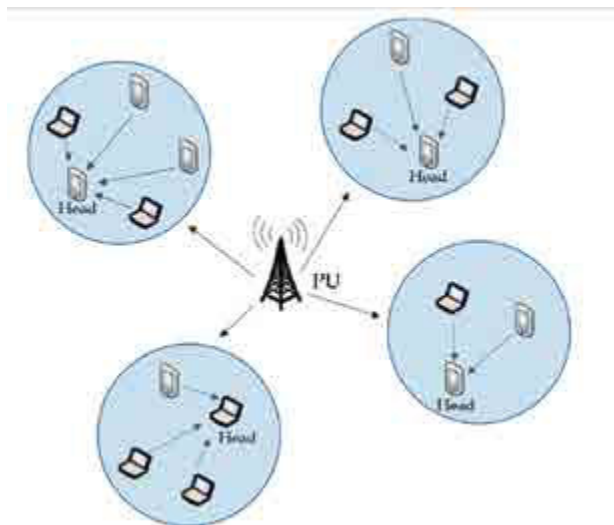


Figura 1. Modelo de Formación de Coaliciones.

La Teoría de Juegos ha sido ampliamente utilizada para estudiar el comportamiento de los usuarios que participan en el sensado cooperativo de espectro. Autores como (Hajir, Langar y Gagnon, 2016) proponen un esquema para mitigar las interferencias que sufren los usuarios de las próximas generaciones de redes móviles en el enlace descendente, debido a la disminución del tamaño de las células, proponiendo un juego de formación de coaliciones. En (Gohila y Velayudham, 2013), la Teoría de Juegos en la formación de coaliciones, es utilizada para evitar los ataques egoístas en una red ad-hoc de radio cognitiva con múltiples usuarios primarios y múltiples usuarios secundarios. Los autores en (Saad, Han, Debbah, Hjørungnes y Basar, 2009) proponen un algoritmo para la formación de coaliciones en una red de Radio Cognitivo. Con este algoritmo logran disminuir en 86,6% el valor promedio de las probabilidades de pérdidas de la detección (probabilidad que complementa la P_d) por usuario, con respecto a las de un sistema no cooperativo. Así mismo puede verse la aplicación de la Teoría de Juegos en otros trabajos ((Wang, Song, Han y Saad, 2014);

(Lai, Dutkiewicz, Liu y Vesilo, 2012); (Chen, Ji, Li y Li, 2012).

El grupo de investigación “Procesamiento Digital de Señales aplicado a las Comunicaciones Digitales”, inscrito en el sitio de proyectos de la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”(CUJAE) con tributo a tareas asociadas al Complejo de Investigaciones Tecnológicas Integradas (CITI), tiene como una de sus tareas diseñar un sistema para la vigilancia del espectro radioeléctrico del territorio nacional, para garantizar el uso eficiente del mismo. Con ese fin, en el proyecto se realiza actualmente la implementación de un software para la vigilancia automatizada del espectro radioeléctrico sobre una red de radios cognitivos, llamado Herramienta para el Análisis Técnico de Señales en Tiempo Real (HEATS-RT). Uno de los requerimientos de la aplicación es la capacidad de tomar decisiones de forma dinámica acerca del uso de los recursos de la red, en aras de optimizar la detección de señales.

Para este fin se propuso diseñar un sistema de cooperación basado en Teoría de Juegos, dado que estos por sus características, aportan cierta inteligencia al sistema y se ha demostrado en trabajos recientes que tienen un buen desempeño con respecto a la detección (Gohila y Velayudham, 2013); (Lai, Dutkiewicz, Liu y Vesilo, 2012); (MacKenzie y DaSilva, 2006). Se considera un escenario en el cual varios usuarios secundarios comparten una banda de frecuencia común con un usuario primario. Los usuarios secundarios fueron considerados como usuarios móviles y el usuario primario como un usuario fijo. Por esta razón se consideró para el diseño un modelo de formación de coaliciones que permite cambiar la topología de la red cuando los usuarios cambien su posición, para un mejor desempeño y permite que los usuarios tengan un margen de movilidad al mismo tiempo que sensan el espectro.

Formulación, diseño e implementación del modelo

La Teoría de Juegos tiene tres componentes fundamentales: jugadores, estrategias y utilidad o pago por la estrategia tomada. Este sistema puede ser modelado como un juego $(N; v)$, donde N es la cantidad de jugadores los cuales son los usuarios secundarios de Radio Cognitiva y v es la función de utilidad. En el juego propuesto cada SU de la coalición tiene la misma utilidad y es igual a la utilidad de esa coalición

S a la que pertenece. Por tanto, el juego propuesto $(N; v)$ de formación de coaliciones tiene utilidad no transferible.

Las estrategias de los usuarios secundarios será unirse o separarse de una determinada coalición, y si se unen, a cuál de las posibles coaliciones lo hará. Las decisiones serán tomadas en dependencia de la utilidad que estas les brinden, siempre tratando de alcanzar una mayor utilidad.

Los jugadores, los cuales son los SU, tienen como tarea fundamental el sensado de espectro para detectar la presencia o ausencia del usuario primario y evitar interferir con su comunicación. Existen varias técnicas para el sensado de espectro, las cuales han sido descritas en (Akyildiz y Balakrishnan, 2011). En el modelo propuesto, cada uno de los SU utiliza como técnica para la detección de señales el detector de energía. Esta técnica de sensado de espectro es una de las más usadas debido a su bajo costo computacional y su capacidad para realizar detección no-coherente.

El principio del detector de energía (DE) es la detección a partir de la energía de la señal recibida. Esta técnica de sensado de espectro ha sido la más estudiada y su desempeño ha sido evaluado bajo múltiples condiciones del canal de comunicación. Se han reportado mejoras a este método, tanto para sensado local como para sensado cooperativo. La señal de interés es detectada al comparar su energía con un umbral que depende del piso de ruido del canal.

El problema de sensado de espectro puede declararse como una prueba de hipótesis binaria. En esta prueba de hipótesis, H_0 representa la ausencia de la señal de interés, si el nivel de energía está por debajo del umbral y H_1 la presencia de dicha señal, si el nivel de energía está por encima.

Para un canal de comunicación caracterizado por el Ruido Blanco Aditivo Gaussiano y una detección basada en N muestras de la señal recibida, estas hipótesis están dadas por (1) para

$$n = 1; 2; 3; \dots; N - 1 \quad [4]$$

$$x(t) = \begin{cases} n(t), & H_0 \\ h(t)s(t) + n(t), & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

Una posible estadística de decisión que se compara con el umbral, para el detector de energía puede expresarse como (Song, Feng, Zhang y Liu, 2012):

$$E = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\frac{x[n]}{\sigma_w} \right)^2 \quad (2)$$

Este valor es comparado con un umbral η que depende de la probabilidad de falsa alarma local de los j -th usuarios. La relación del valor de este umbral con la P_{fa} es definido según el criterio de Neyman-Pearson como se expresa a continuación (Song, Feng, Zhang y Liu, 2012):

$$\eta = \sqrt{2N}Q^{-1}(P_j^{fa}) + N \quad (3)$$

La probabilidad de falsa alarma local es un parámetro de diseño, que depende de los requisitos específicos de la aplicación. Por otro lado, la probabilidad de detección local, denotada por $P\{E > \eta | H_1\}$ puede expresarse como (Song, Feng, Zhang y Liu, 2012):

$$P_d = Q\left(\frac{\eta - N(1 + \gamma)}{\sqrt{2N(1 + \gamma)}}\right) \quad (4)$$

Donde γ es la SNR del canal de sensado, percibido por el usuario secundario. En (Mitola y Maguire, 1999) y (Akyildiz y Balakrishnan, 2011) las funciones Q y Q^{-1} es la función complementaria de distribución Gaussiana y su función inversa, respectivamente.

Función de utilidad

Dependiendo de la aplicación y sus requerimientos, pueden definirse diferentes funciones de utilidad. Por ejemplo, para una aplicación de redes de sensores inalámbricos, se necesita que el consumo de energía no sea excesivo, dado que la mayoría de estos dispositivos tienen potencia limitada. Por tanto, en este tipo de sistemas es necesario una función de utilidad cuya función de costo dependa del consumo energético que implica la cooperación. En un sistema de detección de usuarios ilícitos, la utilidad debe ser favorable con el aumento de la probabilidad de detección. Para el caso específico de las Redes de Radio Cognitivo, es común utilizar una función de utilidad que depende de las probabilidades de detección y de falsa alarma. Esta función necesita lograr un *compromise*, entre alcanzar la máxima probabilidad de detección para evitar interferencias, y mantener una probabilidad de falsa alarma tolerable para no perder muchas oportunidades de acceder al espectro. Esta función de utilidad generalmente está dada por (Han, 2012); (Saad, Han, Debbah, Hjørungnes y Basar, 2009)

$$v(S) = Q_{d,S} - C(Q_{fa,S}) \quad (5)$$

Donde $Q_{d,S}$ y $Q_{fa,S}$ son las probabilidades de detección y de falsa alarma de una coalición S , respectivamente, y C es la función de costo de la probabilidad de falsa alarma de la coalición. La función de costo debe ser creciente con respecto a la probabilidad de falsa alarma de la coalición y además debe mantener un umbral de falsa alarma que no debe ser excedido por ningún usuario secundario. Una función de costo muy utilizada y que satisface dichos requerimientos es la función logarítmica *barrier-penalty* dada por (Han, 2012); (Saad, Han, Debbah, Hjørungnes y Basar, 2009)

$$C(Q_{fa,S}) = \begin{cases} -\alpha^2 \log \left(1 - \left(\frac{Q_{fa,S}}{\alpha} \right)^2 \right), & \text{si } Q_{fa,S} < \alpha \\ +\infty, & \text{si } Q_{fa,S} > \alpha \end{cases} \quad (6)$$

La función de costo está caracterizada por una asíntota para la probabilidad de falsa alarma de la coalición, denotada por α . Un ejemplo de función de costo logarítmica *barrier-penalty* se muestra en la figura 2. Cuando Q_{fa} la sobrepase el valor de α la función de costo tiende al infinito y por tanto la función de utilidad a valores negativos. Esto garantiza que no se formen grupos en los cuales la Q_{fa} sea mayor que α . Para el diseño de este sistema de cooperación se escogió $\alpha = 0,1$.

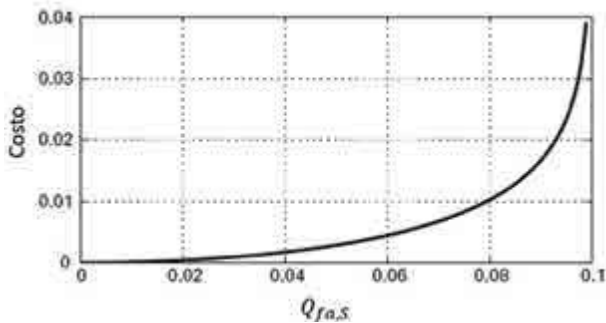


Figura 2. Función de costo logarítmica *barrier-penalty* para $\alpha = 0,1$.

Las expresiones para $Q_{d,S}$ y $Q_{fa,S}$ están dadas por (Han, 2012):

$$Q_{d,S} = 1 - \prod_{j \in S} ((1 - P_{d,j})(1 - P_{e,j}) + P_{d,j}P_{e,j}) \quad (7)$$

Donde $P_{d,j}$ y $P_{fa,j}$ son las probabilidades de detección y de falsa alarma individuales de los j -th usuarios

secundarios, respectivamente y $P_{e,j}$ es la probabilidad de error de transmisión definida en (Han, 2012).

En las ecuaciones (Wang, Song, Han y Saad, 2014) y (Hajir, Langar y Gagnon, 2016), puede observarse que mientras más usuarios formen parte de una coalición más grande será su probabilidad de detección. Por tanto, es beneficiosa la cooperación para la detección de señales. Sin embargo, puede observarse que la probabilidad de falsa alarma será también más grande cuando aumentan los usuarios en una coalición. De ahí la necesidad de lograr un compromiso entre ambas probabilidades.

Formación de coaliciones

El objetivo de la formación de coaliciones es encontrar algoritmos para caracterizar las estructuras en forma de coaliciones que forman una red, donde la gran coalición de todos los SU no es óptima. Por ejemplo, una estructura para la formación de coaliciones es presentada en (Han, 2012); (Hajir, Langar y Gagnon, 2016); (Saad, Han, Debbah, Hjørungnes y Basar, 2009); (MacKenzie y DaSilva, 2006). Antes de construir el algoritmo para la formación de coaliciones en un escenario de colaboración para el sensado de espectro, es necesario definir el concepto de partición como las posibles maneras en las que pueden agruparse una cantidad de SU. A modo de ilustración la figura 3 muestra las 5 posibles particiones para un conjunto de 3 SU.

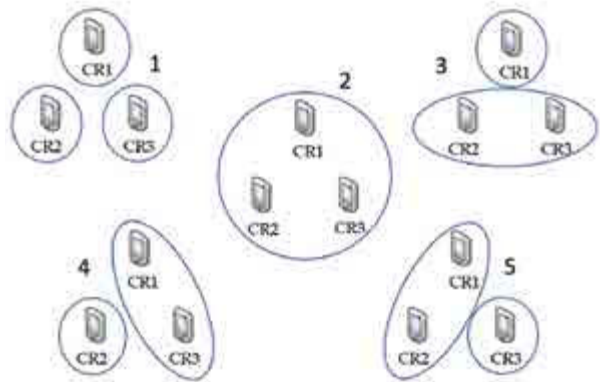


Figura 3. Posibles particiones para un conjunto de 3 SU.

Una vez definido el concepto de partición, otro aspecto importante para el diseño del algoritmo es el criterio para comparar dos particiones del conjunto de jugadores N . En este trabajo, el criterio seleccionado es un Pareto el cual se basa en que teniendo dos parti-

ciones $S = \{S_1, S_2, \dots, S_l\}$ y $R = \{R_1, R_2, \dots, R_l\}$ se dice que la partición S es preferible a R , $S > R$, si al menos uno de los jugadores de S aumenta su utilidad con respecto a la utilidad que tiene ese mismo jugador en R , sin que ninguno de los otros jugadores disminuya la suya.

Un problema desafiante con respecto a los juegos de formación de coaliciones es la cantidad de iteraciones requeridas para calcular las utilidades para cada posible partición y escoger la que aporte mayor utilidad a los SU, debido a que el número de maneras en que puede dividirse un conjunto de N jugadores crece considerablemente con el valor de N .

El número de maneras que un juego de elementos puede dividirse en subconjuntos no nulos se llama número de Bell y se denota como B_n . En [15] se puede encontrar la relación recursiva para generar los números de Bell.

El primer grupo de números Bell para $n=1,2,3,4,5$ son 1,2,5,15,52. Por ejemplo, para un conjunto de 10 jugadores existen 115975 posibles particiones, por lo que calcular las utilidades de todas estas particiones para decidir cuál aporta mayor utilidad a los usuarios, es un proceso engorroso y que sobrecarga el sistema. En los casos en los que la cantidad de SU en la red no es tan grande, pueden ser evaluadas todas las particiones y escoger la óptima en cada momento, según las SNR de los SU. Sin embargo, para casos contrarios es necesario una alternativa para la formación de coaliciones.

Una propuesta para la formación de coaliciones en redes donde el espacio de búsqueda de las particiones es muy grande, es emplear soluciones meta heurística. Se propone una solución en la cual se evalúa la utilidad en una cantidad razonable de posibles particiones. De las particiones evaluadas se escoge la de mayor utilidad, incluso cuando esta no es necesariamente la solución óptima. Siguiendo esta idea el algoritmo propuesto para las próximas simulaciones, evalúa de manera aleatoria en un grupo de particiones a lo largo de un cierto número de iteraciones, quedándose con la partición que mayor utilidad aportó a los SU.

En este algoritmo, a un conjunto de N jugadores $N = \{1, 2, 3, 4, \dots, N\}$ expresado como vector $1 \times N$ se le asigna un vector $1 \times N$ cuyas componentes son números naturales α_i y que pueden tomar valores aleatorios desde 1 hasta N . El número correspondiente a cada SU le indica a cuál coalición

pertenecerá, como se describe en la figura 4 para un escenario con 15 SU.

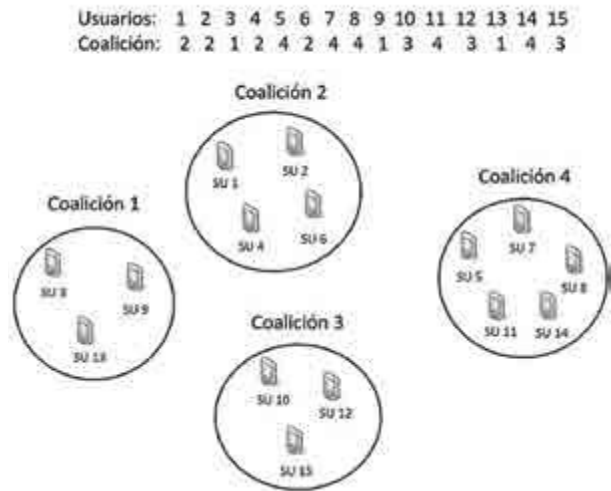


Figura. 4. Posible partición en un escenario de 15 SU empleando el algoritmo propuesto con una solución meta heurística.

Materiales y métodos

En este trabajo se diseñó un modelo de formación de coaliciones donde los SU son móviles y el PU es fijo. Cada SU está equipado con un detector de energía con técnica de sensado de espectro. Se escogió una función de utilidad que logra un compromiso entre aumentar la Q_d y mantener una Q_{fa} tolerable, $Q_{fa} \leq 0,1$.

Para escenarios con una mayor cantidad de SU se diseñó un algoritmo para la formación de coaliciones basado en una solución metaheurística. El algoritmo fue implementado en MatLab y simulado en escenarios con 10, 15 y 50 SU.

Resultados y discusión

Este algoritmo fue implementado en Matlab para comprobar su funcionalidad. Además, para la inclusión de este algoritmo de cooperación en la plataforma de HEATS-RT, fue necesaria su implementación en C++.

Para las simulaciones se consideraron tres escenarios con 10, 15 y 50 SU. En el primer escenario con 10 SU los resultados del MatLab se muestran en la figura 5.

Como puede observarse, se formaron 4 coaliciones para 10 SU para un instante determinado con unos valores de SNR determinados. Las coaliciones formadas pueden verse en la figura 6. Además, se puede observar

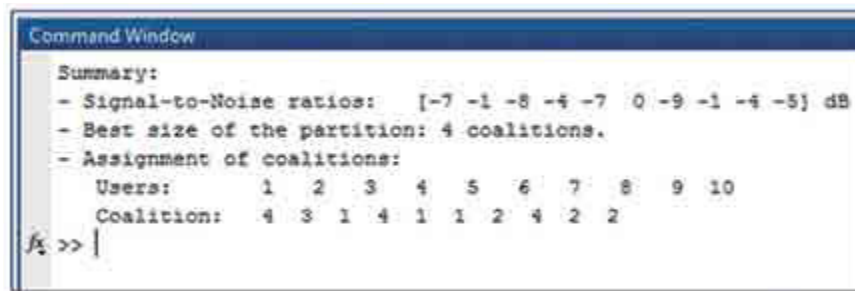


Figura. 5 Resultados del MatLab para un escenario de 10 SU.

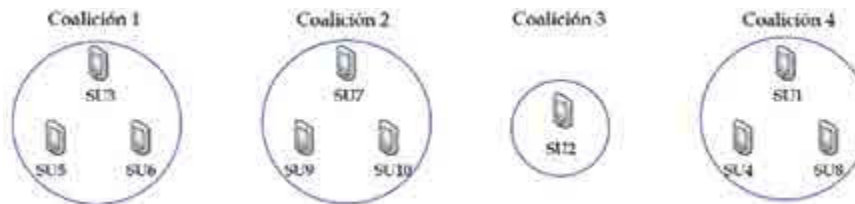


Figura. 6 Coaliciones formadas para 10 SU según los resultados del MatLab.

en la figura 7 el aumento de las P_d de los SU al final del algoritmo con respecto a las P_d que tenían cuando comenzaron en un escenario no cooperativo.

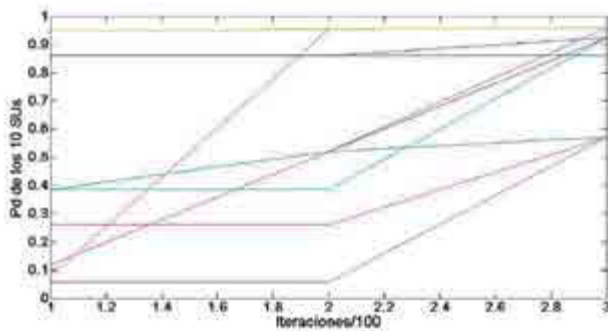


Figura. 7 P_d de los 10 SUs a lo largo de las iteraciones recorridas por el algoritmo.

En el segundo escenario con 15 SU se formaron 4 coaliciones. En la figura 8 se muestra el aumento de las P_d de los SUs al final del algoritmo con respecto a

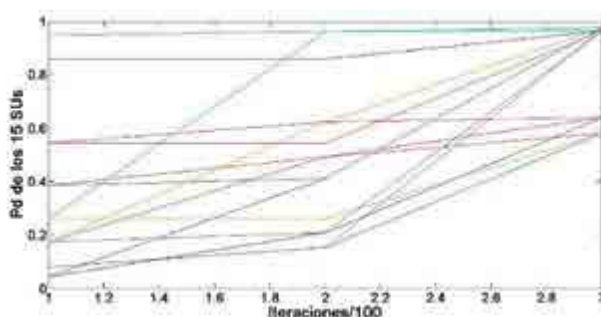


Figura. 8. P_d de los 15 SUs a lo largo de las iteraciones recorridas por el algoritmo.

las P_d que tenían cuando comenzaron en un escenario no cooperativo. Cada línea corresponde a SU.

En el tercer escenario con 50 SU se formaron 10 coaliciones. En la figura 9 se observa el aumento de las P_d de los SU al final del algoritmo con respecto a las P_d que tenían cuando comenzaron en un escenario no cooperativo.

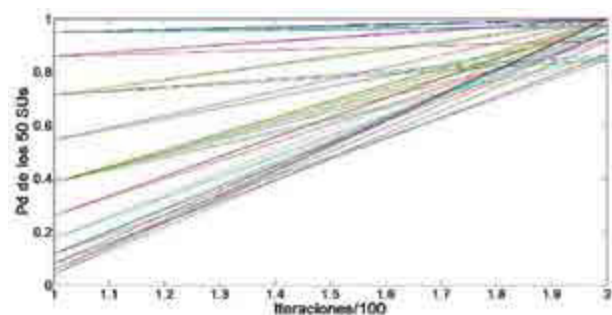
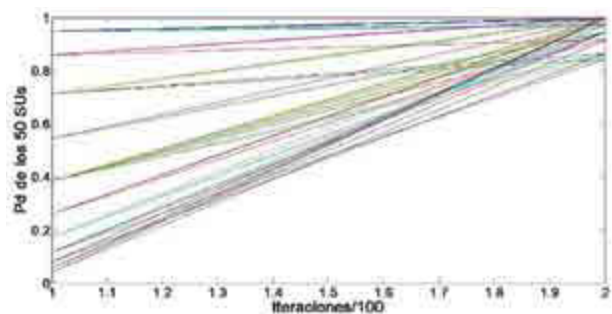


Figura. 9. a) P_d de los 50 SU a lo largo de las iteraciones recorridas por el algoritmo, b) Figura a ampliada donde se distinguen las 10 coaliciones formadas.

El objetivo de este algoritmo es encontrar la mejor manera en la que pueden agruparse ciertos SU en un

momento y lugar determinado, si estas condiciones varían cambiará la forma en que estos están agrupados. A lo largo del algoritmo se evalúan posibles combinaciones y al final este nos devuelve de las evaluadas cuál es la que mayor utilidad le aporta a los SU. En las figuras 7, 8 y 9 se pueden observar las P_d de los SU al inicio que comienzan sensando individualmente el espectro, es decir en un escenario no cooperativo y la última de las iteraciones muestra las P_d de los SU agrupados en coaliciones. En cada coalición todos los usuarios tienen la misma P_d .

Conclusiones

Para el diseño de un modelo de cooperación basado en Teoría de Juegos es necesario definir las reglas del juego que se quiere diseñar. En este trabajo se diseñó un modelo de formación de coaliciones donde los SU son móviles y el PU es fijo. Cada SU está equipado con un detector de energía con técnica de sensado de espectro. Se escogió una función de utilidad que logra un compromiso entre aumentar la Q_d y mantener una Q_{fa} tolerable, $Q_{fa} \leq 0,1$. Para mantener la Q_{fa} menor que ese valor se escogió una función de costo logarítmica *barrier-penalty* que crece con Q_{fa} y garantiza una asíntota en un valor $\alpha=0,1$.

Se escogió un juego de utilidad transferible, en este modelo la utilidad del SU cuando se una a la coalición va a ser igual a la de la coalición y todos los usuarios

funcionarán como un solo usuario con una probabilidad de detección Q_d . Un problema con respecto a los juegos de formación de coaliciones es la cantidad de particiones en las que pueden distribuirse los usuarios para cooperar. En estas particiones se evalúa la utilidad de las coaliciones y se escoge la partición que mayor utilidad le aporte a los SU. Cuando el número de usuarios aumenta, el proceso de evaluar la utilidad de las particiones se convierte en un proceso más engorroso y con mayor costo computacional. Por lo que se hace necesario encontrar soluciones para este problema.

Para escenarios con una mayor cantidad de SU se diseñó un algoritmo para la formación de coaliciones basado en una solución metaheurística. El algoritmo fue implementado en MatLab y simulado en escenarios con 10, 15 y 50 SU y logró encontrar particiones en el amplio espacio de búsqueda con muy buenos resultados con respecto a la detección, en las que todos los SU aumentaron su probabilidad de detección considerablemente. Una de las tareas en el grupo de investigación “Procesamiento Digital de Señales aplicado a las Comunicaciones Digitales” es la implementación de un software (HEATS-RT) para la vigilancia automatizada del espectro radioeléctrico sobre una red de radios cognitivos. Por esta razón, los algoritmos diseñados fueron también implementados en C++ para incluirlos en la plataforma de HEATS-RT.

Referencia

- Chen, L., Ji, H., Li, Y. y Li, X. (2012). Distributed cooperative spectrum sensing for cognitive radio networks. Paper presented at the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC).
- F. Akyildiz, Lo, B. F. y Balakrishnan, R. (2011). Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: A Survey. *Computer Physics Communications*, 4(1), 40-62.
- Gohila, G. V. S. y Velayudham, A. (2013). A novel coalition game theory based resource allocation and selfish attack avoidance in cognitive radio ad-hoc networks. Paper presented at the IET Chennai Fourth International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2013).
- Hajir, M., Langar, R. y Gagnon, F. (2016). Coalitional games for joint cotier and crosstier cooperative spectrum sharing in dense heterogeneous networks. *IEEE Access*, (99), 1.

Han, Z. (Ed.). (2012). *Game theory in wireless and communication networks: theory, models, and applications*: Cambridge University Press.

Haykin, S. (2005). Cognitive radio: brain empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(2), 201-220.

Lai, J., Dutkiewicz, E., Liu, R. P. y Vesilo, R. (2012). Comparison of cooperative spectrum sensing strategies in distributed cognitive radio networks. Paper presented at the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM).

MacKenzie, A. y DaSilva, L. (Eds.). (2006). *Game Theory for Wireless Engineers*: Morgan & Claypool.

Mehdawi, M., N. G. Riley, N., Ammar, M., Fanan, A. y Zolfaghari, M. (2015). Spectrum occupancy measurements and lessons learned in the context of cognitive radio. Paper presented at the 23rd Telecommun. Forum Telfor, TELFOR 2015.

Mitola, J. y Maguire, G. Q. (1999). Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, 6(4), 13-18.

Saad, W., Han, Z., Debbah, M., Hjørungnes, A. y Basar, T. (2009). Coalitional games for distributed collaborative spectrum sensing in cognitive radio networks. Paper presented at the IEEE Conference on Computer Communications. IEEE INFOCOM 2009.

Song, J., Feng, Z., Zhang, P. y Liu, Z. (2012). Spectrum sensing in cognitive radios based on enhanced energy detector. *IET Communications*, 6(8).

Varshney, P. K. (Ed.). (1997). *Distributed detection and data fusion*. New York: Springer.

Wang, T., Song, L., Han, Z. y Saad, W. (2014). Distributed cooperative sensing in cognitive radio networks: An overlapping coalition formation approach. *IEEE Transactions on Communications*, 62(9), 3144–3160.

Weissstein, E. W. (Ed.). (2002). *CRC Concise Encyclopedia of Mathematics* (2 ed.): CRC Press

